

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№9 2018

Направления:

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

**05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И
МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**05.11.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ**

**05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

Казань

2018

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №9 2018г. – Казань:
Научно-технический вестник Поволжья, 2018. – 124 с.

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.ntvr.ru, и в Научной электронной библиотеке (участвует в программе по формированию РИНЦ).

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

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» № 12025.

Главный редактор Р.Х. Шагимуллин

Редакционная коллегия

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

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

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

УДК 60

ББК 30-1

ISSN 2079-5920

© Научно-технический вестник Поволжья, 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>В.В. Харьков, А.Н. Николаев</i> ВЫБОР МОДЕЛИ КИНЕТИКИ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	7
---	---

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

<i>В.Ш. Ройтенберг</i> ОБ ОДНОМ СЛУЧАЕ БИФУРКАЦИЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТРАЕКТОРИИ КУСОЧНО-ГЛАДКОГО ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ	12
<i>Л.С. Сабитов, Н.Ф. Кашапов, И.К. Киямов</i> ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС) ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОБОЛОЧЕК ЗАКРЫТОГО ПРОФИЛЯ	16
<i>Л.С. Сабитов, Н.Ф. Кашапов, И.К. Киямов, О.И. Ефимов</i> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОГО УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ СТЕРЖНЕЙ	19

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>В.Ю. Долуда, Н.В. Лакина, Р.В. Бровко, С.П. Михайлов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ МЕТАНОЛА С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В РЕАКТОРЕ С НЕСТАЦИОНАРНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ	22
<i>Е.А. Зеленская, Н.П. Шабельская, В.М. Чернышев, А.А. Нестеров</i> СИНТЕЗ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ШПИНЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ NiO – CuO – Fe ₂ O ₃ – Cr ₂ O ₃	25
<i>О.А. Платонова</i> ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ АВТОЛИЗАТОРА	29

05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>А.С. Андреев, Е.В. Дороговцева, Е.А. Сутыркина</i> УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ АНТРОПОМОРФНОЙ РУКИ РОБОТА	34
<i>А.П. Буйносков, Е.В. Федоров</i> МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПРЕССОРОВ ЛОКОМОТИВА	39
<i>Г.Е. Кокиева, Г.А. Герасимова, И.В. Гоголева</i> ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФАКТОРЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА МИКРОБНОГО СИНТЕЗА В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФЕРМЕНТАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ	42
<i>Г.Е. Кокиева, Л.А. Дарбасова, Н.Н. Неустроев</i> КОНСТРУКТИВНАЯ ОСОБЕННОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГОСЯ УСТРОЙСТВА ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ И АКТИВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА КОРМОВОГО БЕЛКА	45
<i>Г.Е. Кокиева, И.А. Савватеева, Т.Г. Дмитриева</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АППАРАТА ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ С ПОДВОДОМ КИСЛОРОДА, СОДЕРЖАЩИМ МЕХАНИЧЕСКОЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО	48
<i>С.Л. Марулин, А.П. Буйносков</i> РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ	51
<i>В.И. Митряйкин, Т.А. Зайцева, Р.М. Габсаттаров, А.А. Хабибуллин</i> РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ВЫВИХА ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА С РАЗЛИЧНЫМИ ПАТОЛОГИЯМИ	55

<i>П.М. Салов, Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, С.В. Солин, А.Н. Егоров, И.С. Васильев, А.Ю. Орлов, С.Р. Васильев, Д.А. Коновалов, А.М. Сидельников, В.В. Филиппов</i>	
НАГРЕВАНИЕ И ОСТЫВАНИЕ ЗАГОТОВОК ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	61
<i>П.М. Салов, Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, С.В. Солин, С.О. Красилов, С.Е. Майков, А.С. Петров, Д.А. Софронов, С.А. Тимофеев, Е.В. Петров</i>	
РОЛЬ ТЕПЛООВОГО ФАКТОРА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	64

05.11.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

<i>И.В. Грубрин, И.Ю. Лыгина</i>	
КОМПЕНСАЦИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТИ КАНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	67
<i>В.В. Епин, Р.В. Цветков</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОГО ВЫСЫХАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ	70
<i>И.В. Нелин, Д.А. Охотников, М.С. Виноградов</i>	
БЕСКОНТАКТНАЯ ВИБРОДИАГНОСТИКА ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ	73
<i>И.В. Нелин, М.К. Седанкин, В.А. Скуратов, М.В. Мартьянова, Л.Ю. Мершин</i>	
МИНИАТЮРНАЯ АНТЕННА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВНУТРЕННЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА	77
<i>О.В. Тихоненкова, П.И. Бегун, Т.В. Сергеев, Д.В. Зеленова, П.И. Толкачёв</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОСТУРАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	82
<i>А.Т. Шляхов, Х.С. Биктимирова, А.Г. Шляхова</i>	
КАЛОРЕМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МОДИФИКАЦИЯХ ГАЛЛИЯ	86

05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Р.Р. Гатауллин</i>	
ГИБРИДНЫЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ТАТАРСКОГО ЯЗЫКА НА ОСНОВЕ ПРАВИЛ И СТАТИСТИКИ	89
<i>А.А. Гришин, С.П. Строев</i>	
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОВЕДЕНЧЕСКОГО СКОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА	93
<i>М.Л. Долженкова, Г.А. Чистяков</i>	
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ НА ОСНОВЕ ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ	99
<i>А.А. Кротких, П.В. Максимов</i>	
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО АЛГОРИТМА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ, НЕ ТРЕБУЮЩЕГО ПРОЦЕДУРЫ ФИЛЬТРАЦИИ	103
<i>П.В. Максимов, А.А. Кротких, Б.И. Ронжин</i>	
РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА НА БАЗЕ LEVEL-SET МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ	107
<i>Н.А. Москат</i>	
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРАФИКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ СКОРОСТНЫМ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ Ж.Д.Т.	111

АННОТАЦИИ

THE RELEASE MAINTENANCE

- V.V. Kharkov, A.N. Nikolaev* SELECTION OF KINETICS MODEL FOR DISPERSED MATERIAL DRYING TO COMPUTING EXPERIMENT 7

01.01.00 — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — MATHEMATICS

- V.Sh. Roitenberg* ON ONE CASE OF BIFURCATIONS OF A PERIODIC TRAJECTORY OF A PIECEWISE SMOOTH VECTOR FIELD 12
- L.S. Sabitov, N.F. Kashapov, I.K. Kiyamov* THEORETICAL AND EXPERIMENTAL METHODS OF CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF HIGH-RISE STRUCTURES MADE OF THIN-WALLED BEAMS OF CLOSED PROFILE SHELLS 16
- L.S. Sabitov, N.F. Kashapov, I.K. Kiyamov, O.I. Efimov* THE THEORETICAL FRAMEWORK FOR THE ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN STATE OF THE REFERENCE CONNECTION NODE OF TUBULAR RODS 19

02.00.00 — CHEMICAL SCIENCES

- V.Y. Doluda, N.V. Lucina, R.V. Brovko, S.P. Mikhailov* STUDY CATALYTIC TRANSFORMATIONS OF METHANOL TO OBTAIN A STRAINED HYDROCARBONS IN THE REACTOR WITH AN UNSTEADY TEMPERATURE FIELD 22
- E.A. Zelenskaya, N.P. Shabelskaya, V.M. Chernyshev, A.A. Nesterov* SYNTHESIS AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SPINELS IN THE SYSTEM NiO – CuO – Fe₂O₃ – Cr₂O₃ 25
- O.A. Platonova* DEEP SEWAGE TREATMENT WITH USING A NEW DESIGN OF THE AUTOLYZER 29

05.02.00 — TECHNICAL SCIENCES — MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

- A.S. Andreev, E.V. Dorovotseva, E.K. Sutyrykina* MOTION CONTROL OF AN ANTHROPOMORPHIC ROBOT ARM 34
- A.P. Buinosov, E.V. Fedorov* METHOD OF DETERMINING THE PERFORMANCE OF COMPRESSORS LOCOMOTIVE 39
- G.E. Kokieva, G.A. Gerasimova, I.V. Gogoleva* FACTORS OF PRODUCTION THE INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF MICROBIAL SYNTHESIS 42
- G.E. Kokieva, L.A. Darbasova, N.N. Neusteroiv* CONSTRUCTIVE PECULIARITY OF MIXING DEVICE AT INTENSIFICATION AND ACTIVATION OF FOOD PROTEIN PRODUCTION 45
- G.E. Kochieva., I.A. Savvateeva, T.G. Dmitrieva* MATHEMATICAL MODELING OF APPARATUS FOR CULTIVATION OF MICROORGANISMS WITH OXYGEN SUPPLY CONTAINING MECHANICAL MIXING DEVICE 48
- S.L. Marulin, A.P. Buinosov* THE RESULTS OF THE MODELING OF HARDENING LOCOMOTIVE PARTS DURING HEAT TREATMENT 51
- V.I. Mitryaykin, T.A. Zaitseva, R.M. Gabsattarov, A.A. Khabibullin* THE CALCULATION OF CRITICAL LOADS FOR DISLOCATION OF THE ENDOPROSTHESIS OF THE HIP JOINT WITH VARIOUS PATHOLOGIES 55
- P.M. Salov, D.P. Salova, T.G. Vinogradova, S.V. Solin, A.N. Egorov, I.S. Vasilyev, A.Yu. Orlov, S.R. Vasilyev, D.A. Konovalov, A.M. Sidelynikov, V.V. Filippov* HEATING AND COOLING OF PREPARATIONS AT VNUTREN-NEM GRINDING IN THE CONDITIONS OF LIMITED RIGIDITY OF TECHNOLOGICAL SYSTEM 61

<i>P.M. Salov, D.P. Salova, T.G. Vinogradova, S.V. Solin, S.O. Krasilov, S.E. Maykov, A.S. Petrov, D.A. Sofronov, S.A. Timofeev, E.V. Petrov</i> ROLE OF THE THERMAL FACTOR WHEN GRINDING THE BURIED SURFACES	64
---	----

05.11.00 — TECHNICAL SCIENCES — INSTRUMENTATION, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>I.V. Grubrin, I.U. Ligina</i> THE COMPENCTION OF CHANNEL NONIDENTITY IN MULTICHANNEL INFORMATION-MEASURING SYSTEMS	67
<i>V.V. Epin, R.V. Tsvetkov</i> THE RESEARCH OF UNEVEN DRYING OF SOME AQUEOUS SOLUTIONS FOR HYDROSTATIC LEVELING SYSTEMS	70
<i>I.V. Nelin, D.A. Okhotnikov, M.S. Vinogradov</i> CONTACTLESS VIBRATION DIAGNOSTICS OF THE CAR ENGINE	73
<i>I.V. Nelin, M.K. Sedankin, V.A. Skuratov, M.V. Martyanovs, L.Y. Mershin</i> MINIATURE ANTENNA FOR MONITORING THE INTERNAL BRAIN TEMPERATURE	77
<i>O.V. Tikhonenkova, P.I. Begun, T.V. Sergeev, D.V. Zelenova, P.I. Tolkachyov,</i> EXPERIMENTAL STUDY OF THE LUMBAR SPINE DURING DYNAMIC POSTURAL LOADS	82
<i>A.T. Shlyakhov, Kh.S. Biktimirova, A.G. Shlyakhova</i> CALORIMETRIC RESEARCHES OF PHASE TRANSITIONS IN CRYSTAL MODIFICATIONS OF GALLIUM	86

05.13.00 — TECHNICAL SCIENCES — COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

<i>R.R. Gataullin</i> HYBRID MORPHOLOGICAL ANALYSER OF TATAR LANGUAGE USING RULES AND STATISTICS	89
<i>A.A. Grishin, S.P. Stroev</i> DEVELOPMENT OF BEHAVIORAL SCORING MODEL USING METHODS OF GRADIENT BOOSTING	93
<i>M.L. Dolgenkova, G.A. Chistyakov</i> CONTROL SYSTEM OF AN AUTONOMOUS UNMANNED VEHICLE BASED ON THE PRODUCTION MODEL OF KNOWLEDGE REPRESENTATION	99
<i>A.A. Krotkih, P.V. Maximova</i> DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF EFFECTIVE ALGORITHM OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION WITHOUT USING OF FILTER PROCEDURE	103
<i>P.V. Maximova, A.A. Krotkih, B.I. Ronjih</i> DEVELOPMENT OF ALGORITHM BASED ON LEVEL-SET METHOD IN TERMS OF SOLVING TOPOLOGY OPTIMIZATION AIRCRAFT DETAILS	107
<i>N.A. Moskat</i> BUILDING FEATURES MODELS FOR TRAFFIC ANALYSIS OF AUTOMATED MANAGEMENT INFORMATION SYSTEMS FOR THE MANAGEMENT OF HIGH-SPEED RAILWAYS TRAFFIC	111

ABSTRACTS	116
------------------	-----

02.00.15

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

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

ВЫБОР МОДЕЛИ КИНЕТИКИ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассматривается задача повышения энергоэффективности процессов теплового удаления влаги из материала с сохранением высокого качества готовой продукции с использованием современных вычислительных средств. Выполнена систематизация существующих теоретических подходов к моделированию испарения капель и сушки материалов в дисперсном виде с учетом особенностей кинетики процесса. Выявлены характерные особенности и недостатки основных моделей. Построен универсальный алгоритм CFD расчета и анализа для использования в составе инженерного программного комплекса при численном моделировании сушильных установок.

Ключевые слова: *моделирование, CFD, периоды сушки.*

Процессы концентрирования дисперсных жидкостей, содержащих внутри капель твердые частицы, и сушки дисперсных материалов весьма энергоемкие [1]. Энергопотребление при протекании этих процессов определяется свойствами продукта, выбранным режимом работы оборудования и, в большей мере, кинетикой процесса, а именно скоростью и механизмом удаления влаги [2]. Определившиеся в настоящее время тенденции при совершенствовании аппаратов для концентрирования жидкостей и сушильных установок заключаются в сокращении расхода энергетических и материальных ресурсов при одновременном сохранении высокого качества готовой продукции, что делает моделирование и высокоточный расчет процесса с учетом его кинетики весьма актуальными задачами.

Точное теоретическое описание и моделирование процессов тепловой обработки материалов в дисперсном виде (распылы или твердые дисперсные вещества во взвешенном состоянии) являются весьма затруднительными из-за множества сложных взаимосвязей между явлениями тепло- и массопереноса [3–5]. Последние достижения в области вычислительной гидродинамики (или CFD от англ. «Computational Fluid Dynamics»), благодаря присущей ей гибкости и эффективности, открыли новые возможности для точного решения уравнений переноса в многофазных системах, позволили исключить сложные и дорогостоящие измерения параметров сплошной и дисперсной фаз (температуры, влажности, размера частицы т.д.) внутри работающей тепловой камеры.

В основе методов расчета кинетики процессов сушки лежит система дифференциальных уравнений, описывающая тепловлагоперенос во влажном материале (классическая система Лыкова) [6]:

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \varepsilon r \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_m \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha_m \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где c – удельная теплоемкость тела; ρ_0 – плотность сухого тела; T – температура; τ – время; λ – коэффициент теплопроводности; ε – коэффициент фазового превращения жидкости в пар; r – удельная теплота фазового превращения; u – влагосодержание тела; α_m – коэффициент диффузии влаги; δ – относительный коэффициент термодиффузии.

Одним из упрощенных методов решения задачи расчета кинетики сушки является использование балансово-кинетического уравнения:

$$Q_{\text{подвод}} = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{исп}} \quad (3)$$

где $Q_{\text{подвод}}$, $Q_{\text{нагр}}$, $Q_{\text{исп}}$ – количество подводимого тепла, тепло затрачиваемое на нагрев и испарение, соответственно.

На основе множества экспериментальных данных весь процесс сушки может быть разделен на два последовательных этапа: первый период, соответствующий влагонасыщенному состоянию материала, где скорость сушки постоянна и определяется лишь скоростью внешней диффузии, и второй период, в котором скорость удаления влаги из материала и его прогрев определяется внутренним тепломассопереносом.

Теоретические модели, используемые в настоящее время для описания кинетики сушки дисперсных материалов можно классифицировать на две группы:

1) Модели, предоставляющие информацию об осредненных значениях температуры и влагосодержания частицы, без рассмотрения морфологической ее эволюции на протяжении всего процесса сушки. Эта группа моделей содержит следующие подходы:

1.1) Подходы, основанные на полуэмпирических кривых сушки;

Предполагается, что в период падающей скорости сушки, каждому объемно-взвешенному содержанию влаги соответствует конкретная скорость сушки, которая не зависит от внешних условий, по сравнению с постоянной скоростью сушки в первый период. То есть, скорость процесса, в общем случае, представляется как функция характеристического параметра (кинетическая кривая). Например, в работе [7] Кеу относительную скорость сушки во втором периоде описывает в виде функции от влагосодержания, которая зависит от разности давления пара на границе раздела фаз жидкость-газ.

Лангриш и Кокель [8] используют CFD анализ для прогнозирования поведения частиц в распылительных сушилках для молока, предполагая, что кинетическая кривая уникальна для данного материала и независима от внешних условий сушки, размера и геометрии частиц. Это означает, что нормализованные кривые сушки, полученные в результате изучения сушки одиночных капель в лабораторных условиях могут быть использованы для описания сушки более мелких капель, соответствующих работе промышленного оборудования.

1.2) Реакционный прикладной подход;

Подход, впервые представленный Чен и Кси [9] оценивает скорость сушки за полный период и рассматривает сушку как конкурентный процесс между энергиями активации реакций испарения и конденсации. Характеристикой материала является нормализованная кривая энергии активации при испарении в зависимости от влагосодержания капли, определяется экспериментальным путем. Авторы не учитывают изменения температуры и влажности внутри капли, но описывают скорость потери влаги как функцию разности концентрации паров. Впоследствии Чен и др. [10] улучшили эту модель, добавив сопротивление переносу массы из-за формирования корочки. Хотя их результаты показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными по скорости сушки, модели не адекватно описывают распределение температуры внутри капель молочных продуктов.

Позднее Шмитц-Шуг и др. [11] сравнили результаты моделирования в рамках реакционного прикладного подхода с экспериментальными данными сушки в тонкопленочном режиме, чтобы найти кинетику сушки молочных составов. Исследование было направлено на установление критического распределения времени пребывания как функции среднего размера капли и геометрических параметров сушильного канала для предотвращения ухудшения качества продукта из-за нецелевых химических реакций.

Необходимость проведения экспериментальных исследований для нахождения корреляции энергии активации с типом материала и режимом сушки ограничивает применимость этого подхода. Сравнивая данные, полученные применением подхода кинетических кривых и реакционного прикладного подхода, Ву и др. [12] обнаружили, что они предсказывают почти идентичные значения влажности частиц и траектории их

движения. Таким образом, оба подхода дают только осредненные свойства капли, и пространственно не разрешены. Тем не менее, основанные на этих подходах модели очень распространены в CFD расчетах, так как они просты для внедрения и отличаются относительной дешевизной аппаратных средств, затрачиваемых на вычисления.

2) Модели, обеспечивающие некоторую информацию о процессе формирования твердой частицы, включая рост и агрегацию взвешенных частичек, ведущих к кристаллизации капли во время процесса сушки. Существенным аспектом в этих моделях является то, что коэффициент диффузии твердых частиц в жидкости изменяется вместе с их концентрацией.

2.1) Подход эффективного коэффициента диффузии;

Подход широко используется в тех случаях, когда основной целью моделирования является получение информации о распределении твердых частиц и влаги внутри капли. Диффузия влаги внутри капли рассчитывается по закону Фика. Формирование корочки в рамках этого подхода не учитывается.

Эффективный коэффициент диффузии является функцией температуры и влажности, и определяет скорость массопередачи. Например, Сано и Кеу [13] вывели уравнения для описания испарения влаги из одиночной изолированной капли, содержащей коллоидный материал. Авторы предположили, что, когда давление паров равновесной влажности внутри капли превышает давление окружающего воздуха, одиночная капля надувается и разрывается, создавая полую сферу. Диффузия влаги в каплях без пустот и раздутых каплях рассчитывается по закону Фика с экспериментальным коэффициентом диффузии, который зависит от температуры и концентрации. Валидация модели ограничена, так как вероятность вздутия возникает в случае, когда температура сушильного воздуха выше точки кипения воды.

Сано и Ямамото [14] модифицировали предыдущую модель, добавив допущение о сферической усадке частиц вследствие потери части растворителя, и оценили интенсивность сушки полиакрилонитрила в диметилформамид. Они также предположили, что нет никаких изменений концентрации в радиальном направлении, за исключением конкретного региона, определяемого как глубина проникновения. Описание изменения концентрации жидкого растворителя во всем этом регионе выражалось уравнением диффузии с эмпирически найденным коэффициентом диффузии.

2.2) Модель сужающегося ядра (модель усадки ядра);

В первый период предполагается, что капля прогревается, инициируется испарение свободной воды с поверхности капли, размер капли начинает уменьшаться (усадка) и образуется твердая корочка. Во втором периоде концентрация твердых частиц на поверхности капли увеличивается и превышает критическое значение, усадка капли завершается, появившаяся граница раздела фаз корочка/ядро делит объем капли на две зоны, испарение происходит на этой отступающей границе и ключевым сопротивлением массообмену является толщина корочки.

Несич и Водник [15] проанализировали экспериментальные данные процесса сушки различных капель, содержащих растворенные или дисперсные твердые частицы (коллоидный кремнезем, сульфат натрия, обезжиренное молоко) и разработали модель усадки ядра, охватывающую периоды постоянной и падающей скоростей сушки. Согласно этому исследованию, одиночная капля проходит через пять различных стадий: начальный прогрев, квазиравновесное испарение, образование корочки, кипение и сушка пористой частицы. Модель описывает все пять стадий испарения капля с помощью одной системы дифференциальных уравнений, также был выведен критерий перехода. Несмотря на удовлетворительное согласование между экспериментальными и теоретическими результатами, расчет коэффициентов диффузии для различных материалов на основе экспериментов, ограничивает применимость этой модели.

Фарид [16] представил новый реалистичный подход к моделированию процесса распылительной сушки капель, содержащих твердые частицы с применением переходных уравнений теплопроводности для областей мокрого ядра и сухой корочки. Модель

достаточно хорошо предсказывала измеренную температуру и массу различных одиночных капель, которые претерпевают некоторое сжатие без изменения температуры, и быструю потерю массы капель в период постоянной сушки, а также значительные изменение массы и температуры в период падающей скорости сушки. Модель построена на предположении что скорость сушки напрямую зависит от внутренней проводимости и внешней конвекции. Кроме того, теплопроводность корочки существенно влияет на процедуру сушки, которая предполагает, что сушка в период падающей скорости контролируется главным образом сопротивлением теплопередаче в области сухой корочки, в то время как другие физические свойства оказывают малое воздействие на процесс сушки. Автор установил, что необходимо учитывать распределение температуры внутри капель даже небольшого размера. Недостатком подхода является отсутствие математического выражения для концентрации влаги/твердых частиц внутри капли.

2.3) Модели, связанные с наличием пузырей.

Предполагается, что в центре капли изначально находится пузырь. Также подход пригоден для моделирования высушивания полых твердых частиц. К примеру, в модели «полой сферы» Виилхуизена и др. [17], газовый пузырь внутри капли с постоянной концентрацией пара может расширяться и сужаться в результате изменений температуры капли. Однако, данная модель не пригодна для расчета сушки в режиме кипения и не принимает во внимание распределение температуры внутри капли и формирование корочки, что приводит к завышению прогнозируемых результатов по сравнению с экспериментальными данными, особенно в период падающей скорости сушки.

На основе выбранной модели кинетики в целях проведения расчета трехмерной геометрической конструкции установки для теплового концентрирования и распылительной сушки дисперсной жидкости, содержащей твердые частицы, необходимо выполнить вычислительный эксперимент и анализ согласно алгоритму, включающему следующие шаги:

1. Создание физико-математической модели, включающей тепло- и массоперенос с учетом гидроаэродинамической обстановки в рабочей зоне, а также особенностей кинетики механизма удаления влаги.

2. Моделирование геометрии вычислительной области (физических границ) с использованием современных систем автоматизированного проектирования, таких как AutoCAD, SolidWorks, Компас-3D, NX и др.

3. Постановка начальных и граничных условий, которые значительно определяют результаты CFD расчета, и создание сетки.

4. Выполнение численного эксперимента по исследованию процесса тепловой обработки материала в дисперсном виде с помощью программных средств автоматизации инженерных расчетов, анализа и симуляции процессов гидроаэродинамики, тепло- и массообмена, механического деформирования твердых тел (ANSYS Fluent, Star-CCM+, CFD-ACE+, OpenFOAM и др.).

5. Обработка результатов расчетов и их визуализация, проверка адекватности модели.

6. При необходимости, внесения изменений в модель и/или геометрию физической установки для снижения количества затрачиваемой энергии процесса, а также с учетом сохранения качества готовой продукции. На основе новых данных проводится перерасчет до полного решения поставленной задачи.

Выбор надлежащего подхода расчета кинетики и механизма удаления влаги, лежащие в основе выше представленной методики CFD расчета процесса концентрирования и сушки дисперсной жидкости, является действенным инструментом для повышения энергоэффективности оборудования и улучшения качества конечного продукта.

Список литературы

1. Коновалов, В.И. Основные пути энергосбережения и оптимизации в тепло- и массообменных процессах и оборудовании / В.И. Коновалов, Н.Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 796–811.
2. Харьков, В.В. Особенности кинетики реакций термического разложения материала при концентрировании во взвешенном слое / В.В. Харьков, А.Н. Николаев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 33–37.
3. *Kharkov, V.V.* Mathematical modelling of thermolabile solutions concentration in vortex chamber // *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2018. Vol. 980. P. 012006. doi: 10.1088/1742-6596/980/1/012006.
4. Харьков, В.В. Инженерная методика расчета вихревой камеры со взвешенным капельным слоем / В.В. Харьков, А.Н. Николаев // Химическая промышленность сегодня. – 2017. – № 1. – С. 16–21.
5. Дубкова, Н.З. Непрерывная технология производства пищевых порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, Э.Х. Тухбиева // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2010. № 4. – С. 47–50.
6. Лыков, М.В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1970. – 432 с.
7. *Keey, R.* Drying of loose and particulate materials. New York: Hemisphere Corporation, 1991. – 506 p.
8. *Langrish, T. and Kockel, T.* The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modelling // *Chem. Eng. J.* 2001. Vol. 84(1). P. 69–74.
9. *Chen, X. and Xie, G.* Fingerprints of the drying behaviour of particulate or thin layer food materials established using a reaction engineering model // *Food Bioprod. Process.* 1997. Vol. 75(4). P. 213–222.
10. A new model for the drying of milk droplets for fast computation purposes / *Chen, X.D. et al.* // *Chemeca 99: Chemical Engineering: Solutions in a Changing Environment.* 1999. P. 865–870.
11. *Schmitz-Schug, I.; Kulozik, U. and Foerst, P.* Modeling spray drying of dairy products. Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss // *Chem. Eng. Sci.* 2016. Vol. 141. P. 315–329.
12. CFD evaluation of droplet drying models in a spray dryer fitted with a rotary atomizer / *Woo, M.W. et al.* // *Drying Technol.* 2008. Vol. 26(10). P. 1180–1198.
13. *Sano, Y. and Keey, R. B.* The drying of a spherical particle containing colloidal material into a hollow sphere // *Chem. Eng. Science.* 1982. Vol. 37(6). P. 881–889.
14. Drying of a drop of polymer solution of PAN-DMF system / *Sano, Y et al.* // *J. Chem. Eng. Jap.* 1984. Vol. 7. P. 114–119.
15. *Nesic, S. and Vodnik, J.* Kinetics of droplet evaporation // *Chemical Engineering Science.* 1991. Vol. 46(2). P. 527–537.
16. *Farid, M.*: A new approach to modelling of single droplet drying. *Chemical Engineering Science*, 58, 2003, 2985-2993.
17. *Wijlhuizen, A.E.; Kerkhof, P.A.J.M. and Bruin, S.* Theoretical study of the inactivation of phosphatase during spray drying of skim-milk // *Chem. Eng. Science.* 1979. Vol. 34. P. 651–660.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА (01.01.00)

01.01.02

В.Ш. Ройтенберг канд. физ.-мат. наук

Ярославский государственный технический университет,
кафедра высшей математики,
Ярославль, vroitenberg@mail.ru

**ОБ ОДНОМ СЛУЧАЕ БИФУРКАЦИЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТРАЕКТОРИИ
КУСОЧНО-ГЛАДКОГО ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ**

Рассматриваются кусочно-гладкие векторные поля, имеющие периодическую траекторию, касающуюся линии разрыва поля. Описаны бифуркации в окрестности этой траектории.

Ключевые слова: *кусочно-гладкое векторное поле, периодическая траектория, бифуркационная диаграмма.*

Пусть M – двумерное ориентируемое компактное C^{r+1} -многообразие ($r \geq 3$), $D = (M_1, M_2, \dots, M_m)$ – разбиение M на компактные C^{r+1} -многообразия, пересекающимися между собой только по компонентам края. *Кусочно-гладким векторным полем* класса C^r на многообразии M с разбиением D называется элемент $X = (X^1, X^2, \dots, X^m)$ пространства $X^r(M, D) := \bigoplus_{i=1}^m X^r(M_i)$, где $X^r(M_i)$ – банахово пространство векторных полей класса C^r на M_i с C^r -нормой. *Траектории* поля X – траектории дифференциального включения $\dot{z} \in X^*(z)$, $z \in M$, где $X^*(z) = \{X^i(z)\}$ при $z \in \text{int } M_i$ и $X^*(z) = \text{co}\{X^i(z), X^j(z)\}$ при $z \in M_i \cap M_j$ ($i \neq j$) [1, с. 95].

Бифуркации кусочно-гладких векторных полей изучались в ряде работ (см. [1 – 4]). Пока их исследование далеко от завершения. Здесь мы опишем еще одну такую бифуркацию.

Пусть точка $z^0 \in M_0 := M_{i_+} \cap M_{i_-} = \partial M_{i_+} \cap \partial M_{i_-}$ при $i_+, i_- \in \{1, \dots, n\}$, $i_+ \neq i_-$. Для краткости будем писать M_{\pm} и X^{\pm} вместо $M_{i_{\pm}}$ и $X^{i_{\pm}}$. Выберем в окрестности U_0 точки z^0 в M C^{r+1} -координаты $(x_1, x_2) \in \mathbf{R}^2$ так, чтобы точки с координатой $x_2 \leq 0$ ($x_2 \geq 0$) принадлежали M_- (M_+), а z^0 имела координаты $x_1 = x_2 = 0$. В этих координатах

$X^{\pm}(z) = P_1^{\pm}(x_1, x_2, X) \frac{\partial}{\partial x_1} + P_2^{\pm}(x_1, x_2, X) \frac{\partial}{\partial x_2}$, где P_1^{\pm} и P_2^{\pm} – C^r -функции на $\mathbf{R}^2 \times X^r(M, D)$.

Будем предполагать, что векторное поле $X_0 = (X_0^1, \dots, X_0^m) \in X^r(M, D)$ удовлетворяет сформулированным ниже условиям У1–У3.

У1. $P_2^+(0, 0, X_0) = 0$, $P_1^+(0, 0, X_0) \partial P_2^+(0, 0, X_0) / \partial x_1 > 0$, $P_2^-(0, 0, X_0) > 0$.

У2. *Через точку z^0 проходит периодическая траектория Γ_0 поля X_0 , не содержащая особых точек кроме точки z^0 и совпадающая в некоторой окрестности точки z^0 с траекторией поля X_0^+ .*

Без ограничения общности можно считать, что координаты (x_1, x_2) выбраны так, что в У1 $P_1^+(0, 0, X_0) > 0$, $\partial P_2^+(0, 0, X_0) / \partial x_1 > 0$. Координаты (x_1, x_2) задают на M ориентацию.

Из условия У1 по теореме о неявной функции следует, что существуют число $\sigma > 0$ и окрестность $V_1(X_0)$ поля X_0 такие, что $\forall X \in V_1(X_0)$ уравнение $P_2^+(x_1, 0, X) = 0$ имеет не

интервале $(-\sigma, \sigma)$ единственное решение $x_1 = \tilde{x}_1(X)$, при этом $\tilde{x}_1(\cdot) \in C^r$, $\tilde{x}_1(X_0) = 0$. Особую точку поля X с координатами $x_1 = \tilde{x}_1(X)$, $x_2 = 0$ обозначим $\tilde{z}(X)$. Введем в U_0 координаты $y_1 = y_1^X = x_1 - \tilde{x}_1(X)$, $y_2 = y_2^X = x_2$. Уменьшив при необходимости окрестность $V_1(X_0)$, будем иметь $X^\pm(z) = Q_1^\pm(y_1, y_2, X) \frac{\partial}{\partial y_1} + Q_2^\pm(y_1, y_2, X) \frac{\partial}{\partial y_2}$, где

$$Q_2^+(0, 0, X_0) = 0, \quad Q_1^+(0, 0, X) > 0, \quad \partial Q_2^+(0, 0, X) / \partial y_1 > 0, \quad Q_2^-(0, 0, X) > 0. \quad (1)$$

При достаточно малом $u_0 > 0$ отображение $\eta_1^X : [0, 1) \rightarrow M_+$, ставящее числу $u \in [0, 1)$ точку $U_0 \cap M_+$ с координатами $y_1^X = 0$, $y_2^X = u$ является вложением, трансверсальным Γ_0 , при этом $\eta_1^X(0) = \tilde{z}(X)$. Выберем также C^∞ -вложение $\eta_2 : (-1, 1) \rightarrow \text{int } M_+$, $\eta_2(0) \in \Gamma_0$, трансверсальное Γ_0 , и такое, что реперы $(X_0^+(z^0), \eta_1'(0))$ и $(X_0^+(\eta_2(0)), \eta_2'(0))$ одинаково ориентированы. Тогда существуют такие число $u_1 \in (0, u_0]$ и окрестность $V_2(X_0) \subset V_1(X_0)$ поля X_0 , что $\forall X \in V_2(X_0)$ определены отображения соответствия

$\eta_1^X(u) \mapsto \eta_2(f^+(u, X))$, $u \in [0, u_0)$, и $\eta_1^X(u) \mapsto \eta_2(f^-(u, X))$, $u \in [0, u_0)$, по траекториям соответственно векторных полей X и $-X$, для которых $f^\pm(\cdot, \cdot) \in C^r$, $f^\pm(0, X_0) = 0$, $\partial f^\pm(u, X) / \partial u > 0$. (рис. 1).

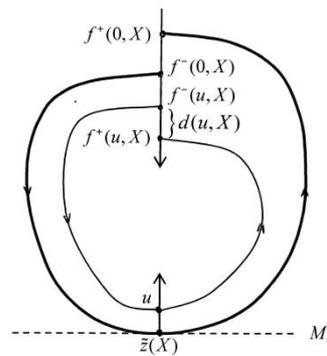


Рис. 1 – Отображения соответствия

Определим функцию расхождения $d(u, X) := f^+(u, X) - f^-(u, X)$ и функцию последования $f(\cdot, X) := (f_0^-(\cdot, X))^{-1} \circ f^+(\cdot, X)$.

Теперь мы можем сформулировать условие **У3**. $d'_u(0, X_0) = 0$, $l := d''_{uu}(0, X_0) \neq 0$.

Для функции последования из условий У2 и У3 следует, что $f(0, X_0) = 0$, $f'_u(0, X_0) = 1$, $\text{sgn } f''_{uu}(0, X_0) = \text{sgn } l$. Поэтому Γ_0 – замкнутая траектория поля X_0 (=петля сепаратрисы особой точки z^0) ω -предельная (α -предельная) к Γ_0 с положительной стороны при $l < 0$ ($l > 0$).

Условия У1–У3 не зависят от произвола в выборе координат и η_2 .

Определим отображения $g_k : V_2(X_0) \rightarrow \mathbf{R}$ ($k = 1, 2$), $g : V_2(X_0) \rightarrow \mathbf{R}^2$ положив $g_1(X) := d(0, X)$, $g_2(X) := d'_u(0, X)$, $g := (g_1, g_2)$.

Теорема 1. Пусть векторное поле $X_0 \in X^r(M, D)$ удовлетворяет условиям У1–У3. Тогда $g'(X_0) : X^r(M, D) \rightarrow \mathbf{R}^2$ – сюръективное отображение.

Из условий У1 – У3 и теоремы 1 следует, что существуют такие окрестность $V(X_0)$ поля X_0 , окрестность нуля Λ_0 в банаховом пространстве $\ker g'(X_0)$, число $\delta_0 > 0$ и C^{r-1} -диффеоморфизм $\chi : (-\delta_0, \delta_0)^2 \times \Lambda_0 \rightarrow V(X_0)$, что

$$g(\chi(\varepsilon, \lambda)) = \varepsilon \text{ для любых } (\varepsilon, \lambda) \in (-\delta_0, \delta_0)^2 \times \Lambda_0. \quad (2)$$

Из (1) и (2) вытекает, что множество векторных полей $X \in V(X_0)$, удовлетворяющих У1–У3, совпадает с $g^{-1}(0,0) \cap V(X_0) = \chi(\{0,0\} \times \Lambda)$ и потому является C^{r-1} -подмногообразием коразмерности два в $X^r(M, D)$,

Теорема 2. Пусть векторное поле $X_0 \in X^r(M, D)$ удовлетворяет условиям У1–У3. Тогда существуют цилиндрическая окрестность $U(\Gamma_0)$ траектории Γ_0 , число $\delta \in (0, \delta_0]$, окрестность Λ нуля в Λ_0 и разбиение окрестности $E(X_0) := \chi((-\delta, \delta)^2 \times \Lambda_0)$ поля X_0 на множества $E_i, i = 1, 2, 3, B_j, j = 0, 1, 2, 3$, где в случае $l < 0$ (рис. 2)

$$B_0 = \chi(\{0,0\} \times \Lambda), B_1 = \chi(\{0\} \times (0, \delta) \times \Lambda), B_2 = \{X = \chi(\varepsilon, \lambda) : \varepsilon_1 = \beta(\varepsilon_2, \lambda), \varepsilon_2 \in (0, \delta), \lambda \in \Lambda\},$$

$$B_3 = \chi(\{0\} \times (-\delta, 0) \times \Lambda), E_1 = \{X = \chi(\varepsilon, \lambda) : \beta(\varepsilon_2, \lambda) < \varepsilon_1 < 0, \varepsilon_2 \in (0, \delta), \lambda \in \Lambda\},$$

$$E_2 = \{X = \chi(\varepsilon, \lambda) : -\delta < \varepsilon_1 < \beta(\varepsilon_2, \lambda), \varepsilon_2 \in (0, \delta), \lambda \in \Lambda\} \cup \chi((-\delta, 0) \times (-\delta, 0] \times \Lambda),$$

$$E_3 = \chi((0, \delta) \times (-\delta, \delta) \times \Lambda), \text{ а } \beta : (0, \delta) \times \Lambda \rightarrow (-\delta, 0), \beta \in C^1, \beta(+0, \lambda) = \beta'_{\varepsilon_2}(+0, \lambda) = 0;$$

в случае $l > 0$ (рис. 3)

$$B_0 = \chi(\{0,0\} \times \Lambda), B_1 = \chi(\{0\} \times (-\delta, 0) \times \Lambda),$$

$$B_2 = \{X = \chi(\varepsilon, \lambda) : \varepsilon_1 = \beta(\varepsilon_2, \lambda), \varepsilon_2 \in (-\delta, 0), \lambda \in \Lambda\}, B_3 = \chi(\{0\} \times (0, \delta) \times \Lambda),$$

$$E_1 = \{X = \chi(\varepsilon, \lambda) : 0 < \varepsilon_1 < \beta(\varepsilon_2, \lambda), \varepsilon_2 \in (-\delta, 0), \lambda \in \Lambda\},$$

$$E_2 = \{X = \chi(\varepsilon, \lambda) : \beta(\varepsilon_2, \lambda) < \varepsilon_1 < \delta, \varepsilon_2 \in (0, \delta), \lambda \in \Lambda\} \cup \chi((-\delta, 0) \times (-\delta, 0] \times \Lambda),$$

$$E_3 = \chi((0, \delta) \times (-\delta, \delta) \times \Lambda), \text{ а } \beta : (-\delta, 0) \rightarrow (0, \delta), \beta \in C^1, \beta(-0) = \beta'(-0) = 0;$$

со следующими свойствами:

1. Граница $U(\Gamma_0)$ состоит из двух кусочно-гладких замкнутых кривых L^- и L^+ , лежащих соответственно с положительной и отрицательной стороны Γ_0 . Траектории полей $X \in E(X_0)$ в точках L^- входят внутрь $U(\Gamma_0)$, а в точках L^+ входят $U(\Gamma_0)$ при $l < 0$ и выходят из $U(\Gamma_0)$ при $l > 0$.

2. Схемы фазовых портретов в $U(\Gamma_0)$ векторных полей $X \in E_i, i = 1, 2, 3$, и $X \in B_j, j = 1, 2, 3$, изображены на рис. 2 (рис. 3) в случае $l < 0$ ($l > 0$).

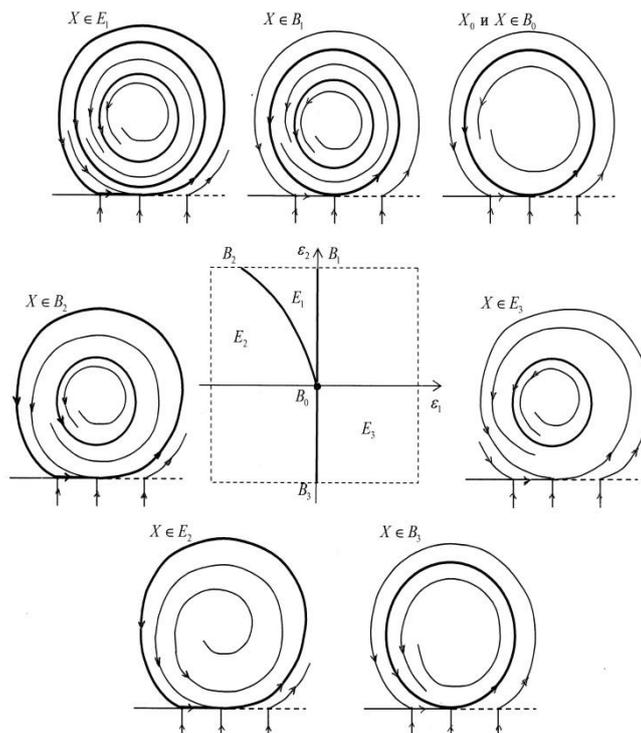


Рис. 2 – Бифуркационная диаграмма в случае $l < 0$

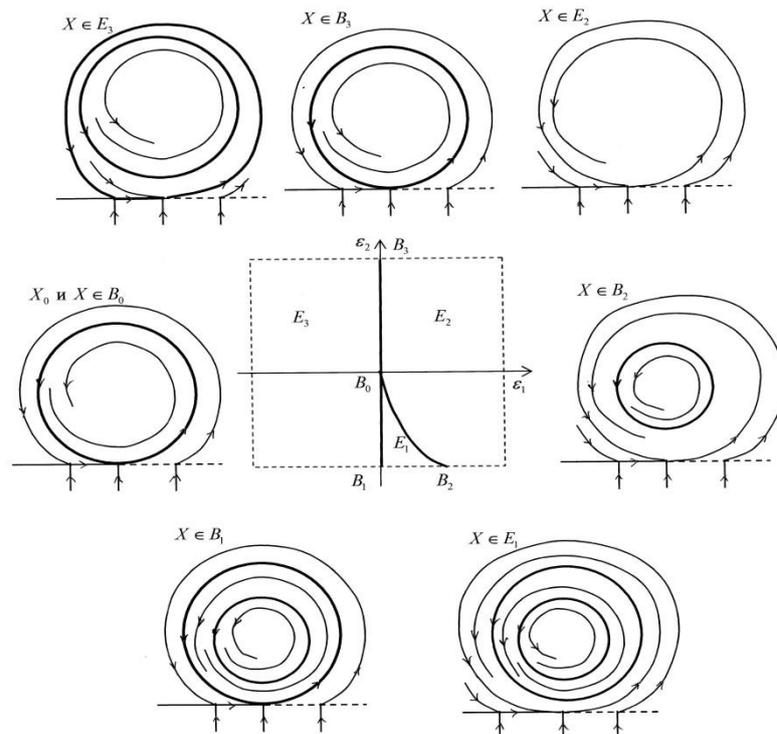


Рис. 3 – Бифуркационная диаграмма в случае $l > 0$

Список литературы

1. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука. 1985. 224 с.
2. di Bernardo M., Budd Ch. J., Carneys A.R., Kowalczyk P. Piecewise smooth dynamical systems. Appl. Math. Sci. V. 163. London: Springer-Verlag. 2008. 483 p.
3. Ройтенберг В.Ш. О бифуркациях в окрестности особой точки типа «трехкратный сшитый фокус» // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2017, № 2. С. 18–31. DOI:10.21685/2072-3040-2017-2-2
4. Ройтенберг В.Ш. О бифуркациях предельных циклов кусочно-гладкой динамической системы // Научно-технический вестник Поволжья. 2018, № 2. С. 17-20. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-17-20

01.01.00

^{1,2}Л.С. Сабитов канд. техн. наук, ²Н.Ф. Кашапов д-р техн. наук,
²И.К. Киямов д-р эконом. наук

¹Казанский государственный энергетический университет,

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Казань, l.sabitov@bk.ru

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС) ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОБОЛОЧЕК ЗАКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

На основе анализа литературы и собственного многолетнего опыта проектирования построена полная классификация высотных сооружений, разработана единая теоретическая основа для расчёта и разработки, новых более эффективных конструктивных решений, которая учитывает все особенности поведения сооружения под действием эксплуатационной нагрузки, а также ограничения, накладываемые практикой монтажа и технологией изготовления; теоретические основы включает в себя расчётную модель тонкостенного сплошного стержня замкнутого сечения (с коничной формой и меняющейся толщиной стенки по высоте стержня), а также расчётный аппарат, описывающий эту модель и полученный на основе уточнённой теории оболочек А.А. Уманского и применения вариационного принципа Кастильяно; кроме того, в теоретический аппарат включен ряд новых расчётных схем и выражений, позволяющий рассчитывать НДС узловых сопряжений рассматриваемых сооружений, включая новые решения узлов, предложенные автором; в перспективе теоретические основы методик позволяет создавать новые, ещё не рассмотренные в работе, конструктивные формы высотных сооружений и решения их узловых сопряжений.

Ключевые слова: *высотное сооружение, численно-аналитические методы, напряженно-деформированное состояние.*

Из всего спектра высотных сооружений, наиболее представительным классом являются стальные опоры ВЛ, поскольку на них оказывается максимальное количество различных видов нагрузок и воздействий: вертикальная нагрузка, горизонтальная – вызывающая как изгиб, так и кручение, температурное воздействие и т.д. Причём горизонтальная нагрузка может быть, как статическая, так и динамическая. Поэтому для дальнейших исследований более детально был рассмотрен именно этот класс сооружений. При этом в своих рассуждениях ограничились лишь статическим нагружением, помня о том, что динамическая нагрузка (пульсационная составляющая ветра, нагрузка при обрыве токоведущих проводов) может быть приведена к статической с применением нормативных коэффициентов согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Кроме того, на этапе локализации проблемы, объектная область исследований была ограничена только опорами ВЛ из тонкостенных стержней-оболочек замкнутого профиля, а решётчатые опоры были включены в область перспективных исследований. При этом расчётом были обоснованы границы рационального использования опор того и другого типа исходя из критерия минимума массы. Для этого было получено следующее условие [1]:

$$M > M_{\text{усл}} = \frac{3 \cdot h_0^3 \cdot \rho \cdot R_y \cdot \gamma_c}{\psi_{\text{СП}} \cdot h_0 - 3\psi_{\text{П}} \cdot \psi_{\text{ТР}} \cdot \rho} \cdot \left(\frac{n \cdot \psi_{\text{П}} \cdot k_{\text{П}}}{m^2} + \psi_{\text{ТР}} \cdot \psi_{\text{Р}} \cdot C \cdot \xi \right). \quad (1)$$

где M – изгибающий момент в опорном сечении, $M_{\text{усл}}$ – условный момент; $\psi_{\text{СП}} = (1,1-1,25)$ – конструктивный коэффициент массы опоры со сплошной стенкой; $\psi_{\text{ТР}} = 1,1-1,15$ – конструктивный коэффициент опоры треугольного поперечного сечения со решётчатой стенкой; $\psi_{\text{П}} = 1,05-1,1$ – конструктивный коэффициент поясов опоры; $\psi_{\text{Р}} = 1,05-1,1$ – конструктивный коэффициент решетки; $\rho = W_x/A$ – ядровое расстояние; R_y – расчетное

сопротивление стали; γ_c – коэффициент условия работы; k_{II} – коэффициент учитывающий продольный изгиб; h_0 – высота поперечного сечения опоры; $m = \text{tg}\alpha$, α – угол наклона стержня решетки; $n = 1$ для опор с раскосной решеткой, и $n = 2$ для опор с треугольной решеткой; ξ – коэффициент, зависящий от типа решетки, для треугольной решетки.

Согласно условию (1): если изгибающий момент M в опоре больше условного $M_{\text{усл}}$, то по расходу стали целесообразно применять решетчатое сечение и, наоборот, при невыполнении условия (1) рациональным сечением опоры является сечение замкнутого профиля.

Информационная схема дальнейших исследований принятых для рассмотрения опор показана на рисунке 1. В ней выделены пять главных направления для изучения НДС конструкции или её стыка и поиска для них оптимальной формы:

1 – для ствола сооружения – поз. 3,5 (предложена расчётная сдвиговая модель и математический аппарат отыскания НДС на основе усовершенствования теории А.А. Уманского, которая реализована в ПК «AutoRSS.02» собственной разработки [2,3]);

2 – для опорного узла – поз. 2 (предложено заменить опорные рёбра из пластин специальной конической вставкой оптимальной формы, эффективность которой обоснована расчётом [4], которая реализована в ПК «AutoRSS.03»[5]; кроме того, для случая фланцевого стыка предложена расчётная модель рёбра жёсткости и математический аппарат отыскания);

3 – для стыковочного узла двух труб разного диаметра – поз. 4 (предложены новые решения в виде телескопического стыка [6], расчётная модель и математический аппарат отыскания НДС такого стыка, которая реализована в ПК «AutoRSS.01» [7]);

4 – для стыковочного узла проводов с мачтой опоры ВЛ – поз. 9 (предложена расчётная модель стыка, на основе которой получена оптимальная форма переходного элемента между проводом и изолятором [8], которая реализована в ПК «AutoRSS.04» [9]);

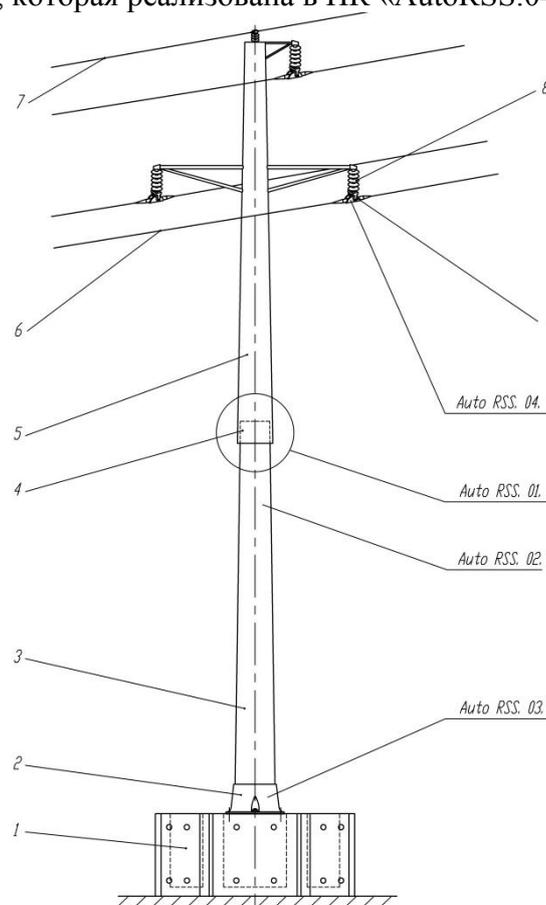


Рис. 1 – Информационная схема исследований высотного сооружения на примере опоры ВЛ: 1 – фундамент; 2 – опорный узел; 3 – нижний трубчатый стержень (большого диаметра); 4 – стык труб разного диаметра; 5 – верхний трубчатый стержень (меньшего диаметра); 6, 7 – токоведущие провода, выполняющие силовую несущую функцию; 8 – изолятор; 9 – узел крепления проводов к изолятору.

5 – для изучения совместной работы системы сооружение-фундамент-грунт – поз 1 (предложен сборно-разборный фундамент с высокими эксплуатационными характеристиками, в последующих работах на основе компьютерного моделирования изучена его совместная работа со стальной опорой).

Выводы:

В работе предлагаются теоретико-экспериментальные методы расчета НДС высотных сооружений на примере опор ЛЭП со сплошной стенкой, для которых неравенство (1) остаётся верным. При этом, даже в случае нарушения условия (1) опору можно сделать комбинированной: нижнюю часть выполнить решётчатой, а верхнюю – из трубчатого стержня сплошного сечения. При этом расчётами показано, что при высоте до 20 м более экономичными по сравнению с решётчатыми оказываются опоры из тонкостенных стержней-оболочек закрытого профиля (расход стали на 15% меньше).

Список литературы

1. *Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Пеньковцев С.А.* Выбор рационального типа поперечного сечения опор // Приволжский научный журнал. – 2014. – №4(32). – С. 90-94.
2. Свид. о гос. регистрации программы ЭВМ №2014617349 от 17.07.2014. «AutoRSS.02» Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Богданович А.У. Заявка № 2014614903 от 26.05.2014г.
3. Пат. 2556603 Российская Федерация, МПК Е 04 В 12/08 Способ изготовления стальной опоры многогранного сечения /Л.С. Сабитов, И.Л. Кузнецов, И.Н. Хамидуллин; опубл.10.07.2015. Бюл. 19.
4. Пат. 2620625 Российская Федерация, МПК Е 04 Н 12/10 Узел соединения труб разного диаметра/Л.С. Сабитов, И.З. Гатиятов, И.Л. Кузнецов, В.Ю.Юдин, А.К. Мезиков, А.И. Никифоров; опубл. 29.05.2017 Бюл. 16.
5. Свид. о гос. регистрации программы ЭВМ №2017662991 от 22.11.2017 «AutoRSS.03» Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Юдин В.Ю. Заявка № 2017617847 от 21.07.2017г.
6. Пат. 2288399 Российская Федерация, МПК F 16 L 13/00, Е 04 В 1/58 Узел соединения труб / И.Л. Кузнецов, А.В. Исаев, Л.С. Сабитов; опубл. 27.11.2006, Бюл.33.
7. Свид.о о гос. регистрации программы ЭВМ №2013611451 от 18.01.2013 г. «AutoRSS.01» Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Сабиров С.И. Заявка № 2012661265 от 18.12.2012 г.
8. Пат. 2615178 Российская Федерация, МПК Е 04 Н 12/10 Способ защиты сталеалюминиевых проводов воздушных линий электропередачи от усталостных колебательных повреждений на выходе из поддерживающего зажима /Л.С. Сабитов, И.Л. Кузнецов, Ю.М. Стрелков, А.К. Мезиков, А.И. Никифоров; опубл. 04.04.2017 Бюл. 10.
9. Свид. о гос. регистрации программы ЭВМ №2017662990 от 22.11.2017 «AutoRSS.04» Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Стрелков Ю.М. Заявка 2017617846 от 21.07.2017г.

01.01.00

^{1,2}Л.С. Сабитов канд. техн. наук, ²Н.Ф. Кашапов д-р техн. наук,
²И.К. Киямов д-р эконом. наук, ³О.И. Ефимов канд. техн. наук

¹Казанский государственный энергетический университет,

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,

³Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

Казань, l.sabitov@bk.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОГО УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ СТЕРЖНЕЙ

Решение опорного узла высотного сооружения из трубчатого стержня может быть классическим в виде фланца, но, кроме того, автором предлагается новое решение – при помощи конической вставки [1]. При этом данный тип соединения может быть использован и в других узлах, где требуется соединить две трубы разного диаметра.

Ключевые слова: математическое моделирование, численно-аналитические методы, напряженно-деформированное состояние.

Несмотря на то, что этот вид соединения является наиболее распространённым, до сих пор малоизученным остаётся вопрос об устойчивости опорных рёбер из стальных пластин, являющимися элементами жёсткости во фланцевом соединении.

Для оценки устойчивости рёбер в общем виде предлагается использовать энергетический подход Дж. Брайона [2]:

$$T=V \tag{1}$$

где V – изменение энергии внутренних сил упругости системы и через T работу внешних сил при отклонении от рассматриваемой формы равновесия.

Критическим будет то значение нагрузки, при котором изменение энергии системы для каждого возможного отклонения обращается в ноль. Очевидно, из всех возможных отклонений нужно выбрать то, при котором уравнение (1) даёт для внешних сил наименьшее значение.

Для реализации этого подхода рассмотрен случай прямоугольной пластинки $a \times b \times \delta$ с жёсткостью при изгибе $C = \frac{E\delta}{12(1-\sigma^2)}$ (Рис. 1).

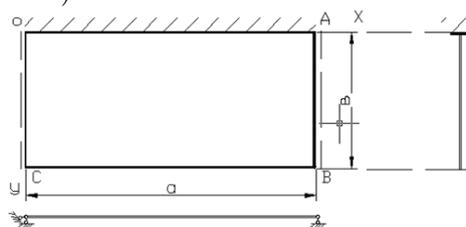


Рис. 1. Геометрическая схема пластины – ребра жёсткости.

Если через w обозначить прогиб пластинки в какой-либо точке при выпучивании, то дифференциальное уравнение для искривленной срединной поверхности запишется так: где P_1, P_2 силы, приложенные по площадкам, перпендикулярным соответственно к оси X и Y ; S – касательное напряжение.

$$C \left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] + P_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + P_2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2S \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0 \tag{2}$$

Вопрос о нахождении критического значения внешних сил сводится к интегрированию полученного уравнения. При пользовании вышеуказанной методой для решения устойчивости пластинки необходимо составить выражения изменения потенциальной энергии системы при выпучивании и работы T внешних сил, соответствующей этому выпучиванию. Потенциальная энергия при выпучивании, очевидно, возрастет, к энергии сжатия присоединится энергия изгиба V , для которой можно воспользоваться известным выражением

$$V = \frac{C}{2} \iint \left[\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\sigma) \left\{ \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} \right] dx dy \quad (3)$$

Очевидно, пока $V > T$ при всяком возможном отклонении пластинки от плоской формы, форма эта будет устойчива. Критическое значение внешних сил найдется из уравнения $T=V$.

Более общим является решение уравнения (3) является решение М. Леви. Оно пригодно для прямоугольной пластинки, два противоположных края которой шарнирно оперты, а два других имеют любое закрепление (защемление, шарнирное опирание) или свободны. Тогда функцию прогибов можно взять в виде:

$$\omega = \sum_{n=1}^{\infty} Y \sin \alpha x \quad (4)$$

Тем не менее, отыскание прогибов по такой методике аналитически остаётся проблематичным, поэтому более эффективным будет применение численных методов, например, МКЭ. Для этого в работе проведено обоснование расчётной схемы пластинки – ребра жёсткости фланцевого сведения. Всего рассмотрено 3 варианта расчётной схемы в ПК «Лира» (Рис. 2): 1 – плоская задача, связи наложены по вертикальному катету по осям $X-X$, $Z-Z$; 2 – плоская задача, связи наложены по вертикальному катету по осям $X-X$, $Z-Z$, а так же по горизонтальному катету накладывается ограничение на перемещение относительно оси $X-X$; 3 – пространственная задача, по грани AC ограничиваются перемещения относительно осей $X-X$, $Y-Y$, $Z-Z$, углы поворота X,Y ; по CD относительно оси $Z-Z$; в узле E по оси $Y-Y$; по AF относительно оси $Z-Z$; по катету BG ограничиваются перемещения относительно осей $X-X$, $Z-Z$.

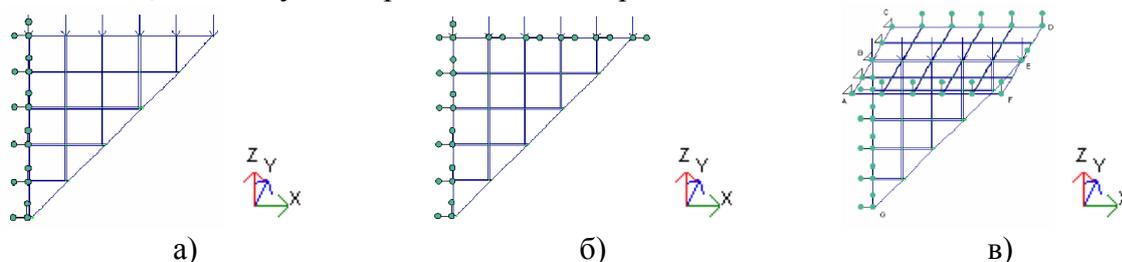


Рис. 2. Варианты расчётной схемы ребра жёсткости: а) расчётная схема №1, б) расчётная схема №2, в) расчётная схема №3

Анализируя полученные в результате моделирования эпюры нормальных и касательных напряжений, замечено, что усилия в элементах консольного ребра получились одного порядка. Однако, в первом и третьем случаях при рассмотрении полей распределения напряжений σ_x имеет место четко выраженная растянутая зона, которой нет во втором случае, когда пластина испытывает сплошное сжатие. Первоначально предполагалось выделить одну определённую схему и по ней выполнять расчёт, но полученные данные заставляют отказаться от подобного решения. Первые две модели ребра в плоском варианте точно не отражают напряженного состояния консольного ребра (вариант №3 пространственная схема), они, исходя из полученных числовых значений напряжений, являются двумя крайними состояниями, когда элементы ребра испытывают наибольшее растяжение и наибольшее сжатие. От пространственной схемы нам придётся отказаться, поскольку для напряженного состояния ребра большое значение имеет толщина верхней пластины, которая в реальных случаях ничем не регламентируется и может быть различной.

Итак, во внимание была принята первая схема и на ней отработаны расчёты по прочности и устойчивости, наряду с ней рассмотрена устойчивость на второй схеме, поскольку она испытывает исключительно сжатие.

Далее была рассмотрена зависимость разбиения ребра на конечные элементы и выявлено влияние размеров элементов на результаты расчета. Первоначально было принято весьма грубое разбиение, уменьшив размер пластин 5, а затем и в 10 раз, соответственно распределив исходную нагрузку на вновь образовавшиеся узлы.

Полученные результаты говорят о том, что размеры единичного элемента оказывают влияние на характер эпюр лишь при значительных их размерах. Разница в величинах

напряжений между вариантами а) и б) составила 33% , между вариантами б) и в) – 4%. С уменьшением размеров элементов мы получаем более детальное распределение полей напряжений и более точные числовые значения усилий. При величине элементов 1-2 см разница в напряжениях сравнительно мала, что не имеет существенного значения для последующих вычислений.

Новое соединение с помощью конической вставки (опорный узел). Предлагаемый тип соединения позволяет стыковать две трубы разного диаметра, что может быть использовано не только в опорном узле опоры, например ВЛ, но и в других узлах высотного сооружения (Рис. 3).

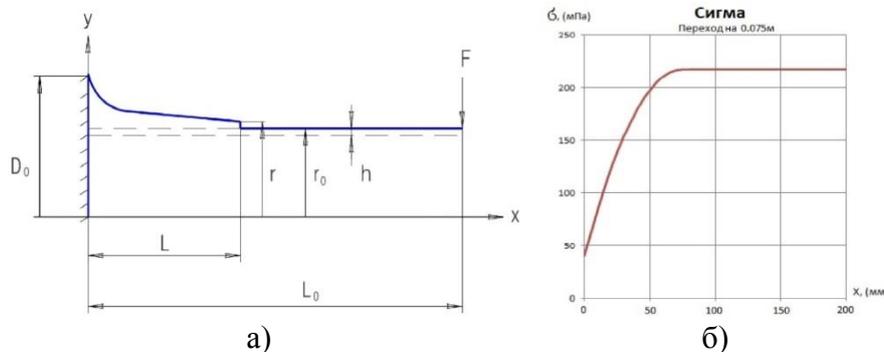


Рис. 3. Численные исследования узла соединения трубчатых стержней с конической вставкой: а) форма наружной поверхности; б) зависимость изгибающего напряжения в узле, от координаты x

Оптимальная форма конической вставки (уравнение образующей) определяется из следующего условия для рис 3:

$$\frac{4M_{изг}(x)}{\pi\sigma(x)} = R^3(x) \left(1 - \frac{(r_0 - h)^4}{R(x)^4} \right), \quad (5)$$

где $M_{изг}(x)$ – изгибающий момент в сечении с координатой x , $M_{изг}(x) = F \cdot (L_0 - x)$; σ_x – напряжения, действующие вдоль оси x на участке $0 \leq x \leq kL$, где k – произвольный коэффициент.

Для указанных напряжений получена формула:

$$\sigma(x) = \sigma_0 - 2 \frac{\sigma_0 - \sigma_L}{kL} \cdot x + \frac{\sigma_0 - \sigma_L}{k^2 L^2} \cdot x^2, \quad (6)$$

где $\sigma_0 = \frac{M_0}{W_0}$ – изгибающее напряжение в сечении $x = 0$; $M_0 = FL_0$; $W_0 = \frac{\pi R_0^3}{4} \left(1 - \frac{(r_0 - h)^4}{R_0^4} \right)$.

Выводы:

Пользуясь вышеуказанной методой, возможно, несколько расширить область уже исследованных вопросов, относящихся к устойчивости пластинок, и таким образом получить некоторые практические указания относительно выбора толщины листов. Также предложен расчет нового узла на который получен патент.

Список литературы

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662991 от 22.11.2017 «AutoRSS.03» Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Юдин В.Ю. Заявка № 2017617847 от 21.07.2017г.
2. G.H. Bryan. On the stability of elastic systems. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, mathematical and physical science 1889, vol. 6, pp. 199—210.
3. Сабитов Л.С. Напряженно-деформированное состояние слабokonичного стержня переменного сечения / Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Богданович А.У. // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2014. – №7(90). – С. 71–79.
4. Пат. 2620625 Российская Федерация, МПК Е 04 Н 12/10 Узел соединения труб разного диаметра/Л.С. Сабитов, И.З. Гатиятов, И.Л. Кузнецов, В.Ю.Юдин, А.К. Мезиков, А.И. Никифоров; опубл. 29.05.2017 Бюл. 16.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ (02.00.00)

02.00.15

В.Ю. Долуда канд. хим. наук, Н.В. Лакина канд. хим. наук, Р.В. Бровко, С.П. Михайлов

Тверской государственной технической университет,
кафедра биотехнологии и химии,
Тверь, doludav@yandex.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ МЕТАНОЛА
С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В РЕАКТОРЕ
С НЕСТАЦИОНАРНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ**

В статье приводятся результаты изучения реакции трансформации метанола в углеводороды в трубчатом реакторе с переменным температурным полем с целью получения напряженных углеводородов. Переменное температурное поле реактора сформировано установкой отдельных тепло нагревающих и теплоотводящих элементов, реакция трансформации метанола в углеводороды протекала на поверхности цеолита H-ZSM-5 упакованного в реакторе. Исследование процесса трансформации метанола в углеводороды с целью получения напряженных углеводородов проводилась при скорости подачи метанола 1 г(CH₃OH)/(г(Кат)ч), температурном градиенте от 250 до 370⁰С, при этом наблюдалось увеличение скорость образования производных триангуланов увеличилась с 37 г(Угл.)/(кг(Кат)ч) в режиме без температурного градиента до 89 г(Угл.)/(кг(Кат)ч) при использовании температурного градиента.

Ключевые слова: метанол, цеолит, H-ZSM-5, углеводороды, триангуланы, нестационарное температурное поле.

Введение

Структурно напряженные алициклические углеводороды представляет значительный интерес в связи с их высокой энергетической ценностью [1, 2] по сравнению с углеводородами нормального строения. В настоящее время известно несколько способов синтеза напряженных соединений [1, 2]: а) синтез с использованием реакций конденсации; б) синтез из ароматических и гетероциклических соединений; в) синтез малых циклов и д) синтез напряженных углеводородов на гетерогенных катализаторах, способных синтезировать высокореакционный карбен. Одним из возможных путей увеличения эффективности получения напряженных углеводородов является применение структурированных каталитических систем, в особенности цеолитов, способствующих формированию карбена [3]. Увеличение содержания напряженных углеводородов в реакционной среде возможно в результате создания градиента температур на катализаторе, что в свою очередь будет способствовать накоплению промежуточных продуктов реакции.

Экспериментальная часть

Исследования процесса трансформации метанола в углеводороды с целью получения напряженных углеводородов проводились на установке, представленной на рисунке 1. В трубчатый реактор 6 подавался азот из баллона 12, редуктор 1 и контроллер массового расхода 2. В трубчатый реактор 6, снабжённый пятью термopарами для измерения градиента температур в слое катализатора, также подавался метанол насосом 7 с расходом 1 г(CH₃OH)/(г(Кат)ч) насосом 7. Газовая смесь метанола и азота поступала на катализатор, где происходит реакция трансформации метанола в углеводороды. В дальнейшем реакционная смесь направлялась в конденсатор 10 через холодильник 9 и редуктор 8. Анализ газовой и жидкой фаз реакционной смеси проводился с использованием газового хроматографа в соответствии с ГОСТ Р 52714-2007. Печь реактора состояла из отдельных обогреваемых зон, что позволяло получить синусоидальную зависимость температуры в диапазоне 250-350⁰С (Рисунок 1) на отдельных участках реактора средней длиной 2 см.

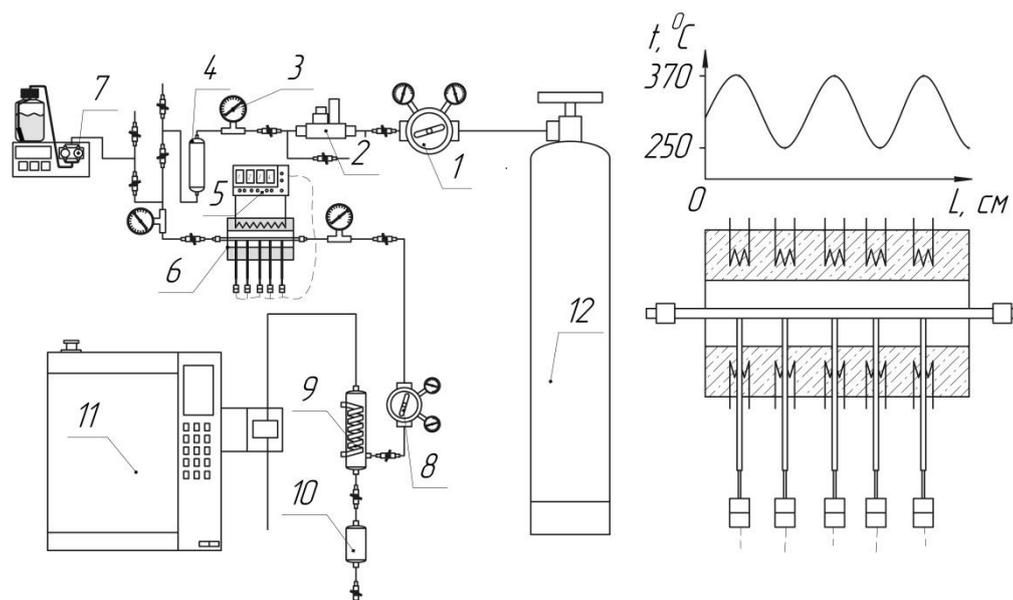


Рис. 1 - Установка каталитического трансформации метанола:

1- редуктор азота, 2 – дозатор массового расхода азота, 3- манометр, 4 – буферная ёмкость, 5 – контроллер температуры, 6 – трубчатый реактор, 7-насос для подачи метанола, 8 –редуктор реакционной смеси, 9 – холодильник, 10 – сборник углеводородов, 11 - хроматограф, 12 – баллон с азотом.

Результаты и обсуждения

Было установлено наличие в реакционной среде более 50 углеводородов различного строения включая алканы, алкены, ароматические углеводороды и напряжённые углеводороды. В составе напряженных соединений были обнаружены производные циклопропана и циклопентана, производных циклобутана обнаружено не было. Отсутствие производных циклобутана может быть связано как с геометрическими особенностями пор цеолита H-ZSM-5, так и с преимущественным формированием пропена на стадии первичного синтеза исходных соединений. В состав идентифицированных производных триангулана входят: 1,1-диметилциклопропана, 1,2-диметилциклопропана, 1,1,2-триметилциклопропана, 1,2,3-триметилциклопропана, 1,1,2,2-тетраметилциклопропана, 1,1,2,3-тетраметилциклопропана, при этом наличие самого циклопропана не наблюдалось, что указывает на возможность протекания синтеза через пропен, бутен-2 и их производные с присоединением карбена, синтезированного *in situ* на цеолите. Так же в пользу этого механизма реакции свидетельствует отсутствие этилена в реакционной среде. Метилциклопропан и 1,2 – диметилциклопропан являются первичными продуктами реакции, в то время как 1,2,3 триметилциклопропан, 1,1-диметилциклопропан, 1,1,2,3-тетраметилциклопропан и 1,1,2,2-тетраметилциклопропан образуются в результате метилирования метилциклопропана и 1,2 диметилциклопропана и являются вторичными продуктами трансформации метанола в углеводороды. Вышеперечисленные доводы позволяет выдвинуть схему образования триангуланов в каталитической трансформации метанола в углеводороды (Рис. 2).



Рис. 2 - Схема образования триангуланов в процессе трансформации метанола

Проведение химико-технологических процессов в нестационарных условиях может способствовать большему накоплению промежуточных продуктов [1-3], образующихся в процессе трансформации метанола в углеводороды, в том числе триангуланов. При проведении процесса трансформации метанола в стационарных условиях при температуре реакционной среды равной 370⁰С наблюдаемая скорость образования напряженных углеводородов составила 37 г(Угл.)/(кг(Кат)ч), а при наличии температурной модуляции температуры реакции в диапазоне 250-370⁰С наблюдалось увеличение скорости образования напряженных углеводородов до 89 г(Угл.)/(кг(Кат)ч) (Таблица 1).

Таблица 1 - Результаты тестирования каталитического процесса трансформации метанола в углеводороды в нестационарных условиях

	Без температурной модуляции	Температурная модуляция, 250-370 ⁰ С
W(Напр. угл.), г(Угл.)/(кг(Кат)ч)	37	89

Выводы

Повышение скорости образования напряженных углеводородов в случае наличия температурной модуляции может быть объяснено стабилизацией промежуточных продуктов реакции в холодных зонах трубчатого реактора. При этом в горячих частях реактора происходит преимущественная адсорбция и реакция метанола с образованием промежуточных продуктов реакции. Наличие большого количества микропор цеолита препятствует обратной диффузии крупных молекул триангуланов, что способствует увеличению концентрации триангуланов в реакционном объеме.

Благодарности

Работы проведены в соответствии с грантом РФФИ 17-08-00568.

Список литературы

1. *Meijere A., Kozhushkov S., Schill H.* Three membered ring based molecular architectures Chem. Rev. 2006, N106, P 4926-4996.
2. *Lukin K., Kozhushkov S., Andrievsky A., Ugrak B., Zefirov N.J.* Synthesis of branched triangulanes Org. Chem. 1991, N56, P 6176-6179.
3. *Haw J., Nicholas J., Song W., Deng F., Wang Z., Xu T., Heneghan C. J.* Roles for cyclopentenyl cations in the synthesis of hydrocarbons from methanol on zeolite catalyst HZSM-5 Am. Chem. Soc. 2000, N122 P, 4763-4775.

02.00.01

¹Е.А. Зеленская канд. техн. наук, ¹Н.П. Шабельская д-р техн. наук,
¹В.М. Чернышев д-р хим. наук, ²А.А. Нестеров д-р техн. наук

¹Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, технологический факультет, кафедра общей химии и технологии силикатов, Новочеркасск, shabelskaya.nina@yandex.ru

²Южный федеральный университет, химический факультет, кафедра неорганической химии, Ростов-на-Дону

СИНТЕЗ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ШПИНЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ NiO – CuO – Fe₂O₃ – Cr₂O₃

В работе на основе изучения фазового состава и морфологических особенностей образцов в системе $0.3\text{NiO} - 0.7\text{CuO} - 0.3\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0.7\text{Cr}_2\text{O}_3$, полученных с применением различных технологических приемов, показано, что с изменением методики синтеза можно формировать материал с различной характеристикой поверхности. Установлено, что при синтезе из смеси нитратов металлов в среде полиакриламида формируется кубическая шпинель состава $\text{Ni}_{0,3}\text{Cu}_{0,7}\text{Fe}_{0,6}\text{Cr}_{1,4}\text{O}_4$, обладающая повышенным значением площади удельной поверхности. Полученные результаты могут быть использованы для выбора технологических условий формирования ферритов-хромитов переходных элементов со структурой шпинели с развитой поверхностью.

Ключевые слова: шпинель, оксиды меди, никеля, железа и хрома.

Введение

Сложные оксидные системы со структурой шпинели на основе ферритов и хромитов переходных элементов обладают комплексом ценных свойств. В научной литературе активно обсуждается связь морфологических особенностей шпинелей с технологической предысторией. Так, сообщается о синтезе CuCr_2O_4 [1] в форме полых сфер. Получены шпинели в виде октаэдров NiFe_2O_4 [2], микросфер NiFe_2O_4 [3], нанотрубок NiFe_2O_4 [4], волокон CuCr_2O_4 [5], NiFe_2O_4 [6]. Синтез шпинелей с заданной морфологией является перспективным направлением неорганической химии для получения материалов с заданными свойствами [7-9]. Так, в [7] отмечено, что полученные иерархические структуры, напоминающие биологические, перспективны как суперконденсаторы; образцы кубической формы [8] демонстрируют значительное увеличение намагниченности насыщения и коэрцитивной силы по сравнению с материалами неконтролируемой формы; текстурированные электроды на основе шпинелей показывают более высокий фототок [9] по сравнению с компактными аналогами. Как правило, синтез материалов с заданной морфологией сложен и требует применения специальной аппаратуры. В этой связи поиск простых в реализации методик получения материалов со структурой шпинели, с различной морфологией, является актуальной задачей химии. Целью настоящего исследования являлось изучение особенностей морфологии образцов шпинелей в многокомпонентной оксидной системе $0.3\text{NiO}-0.7\text{CuO}-0.3\text{Fe}_2\text{O}_3-0.7\text{Cr}_2\text{O}_3$, полученных с применением различных технологических операций.

Экспериментальная часть

Для изучения влияния условий формирования твердых растворов со структурой шпинели на их морфологию были приготовлены образцы несколькими способами.

1. По классической керамической технологии из оксидов переходных металлов квалификации хч, в количестве, отвечающем стехиометрическому соотношению компонентов $\text{Ni}_{0,3}\text{Cu}_{0,7}\text{Fe}_{0,6}\text{Cr}_{1,4}\text{O}_4$ в твердом растворе согласно методике, описанной в [10] (образец 1).

2. По технологии разложения солей из растворов сульфатов железа (III), хрома (III), никеля (II), меди (II) с концентрацией 0.5 – 1.5 моль/л. При этом выпаривали полученный раствор, высушивали и подвергали ступенчатой термообработке при температурах 600 – 700 – 800 – 900°C (более подробно методика синтеза приведена в [11]) (*образец 2*).

3. Смешивали растворы указанных в п. 3 солей с раствором лимонной кислоты концентрации 6.0 – 7.0 моль/л, выпаривали, высушивали и подвергали ступенчатой термообработке при температурах 500 – 600 – 700 – 800 °C (*образец 3*).

4. Смешивали растворы нитратов железа (III), хрома (III), никеля (II), меди (II) с концентрацией 0.5 – 1.5 моль/л, помещали в водный раствор аммиака с концентрацией 25% (масс.), смешивали с водным раствором полиакриламида с концентрацией 5% (масс.), выпаривали и подвергали термообработке до полного разложения органической составляющей (*образец 4*).

Фазовый состав изучали на рентгеновском дифрактометре STOE IPDS II, использовали Cu-K α излучение. Фотографии образцов были получены на сканирующем электронном микроскопе на базе Дрезденского технического университета и на растровом электронном микроскопе Quanta 220 в центре коллективного пользования «Нанотехнологии» ЮРГПУ(НПИ). Изотермы физической адсорбции азота были получены при 77 К на аппарате Quantachrome Autosorb 1с. Определение площади поверхности ($S_{\text{ВЕТ}}$) проводили, используя уравнение ВЕТ ($p/p_0 = 0.05-0.2$).

Результаты и их обсуждение

При анализе полученных результатов установлено, что в системе оксидов NiO-CuO-Fe₂O₃-Cr₂O₃ в ходе топохимической реакции (*образец 1*) формируются две фазы (рис. 1), основная из которых – кубическая шпинель и небольшое количество (до 3% мол.) делафоссита CuCrO₂. Фаза шпинели хорошо окристаллизована (рис. 2, а), $S_{\text{ВЕТ}} = 0.7 \text{ м}^2/\text{г}$.

По данным РФА *образец 2*, полученный в ходе реакции разложения сульфатов, имеет следующий фазовый состав: кубическая шпинель, делафоссит и некоторое количество оксида меди (II) (рис. 1). Материал имеет зерна округлой формы (рис. 2, б), $S_{\text{ВЕТ}} = 1.1 \text{ м}^2/\text{г}$.

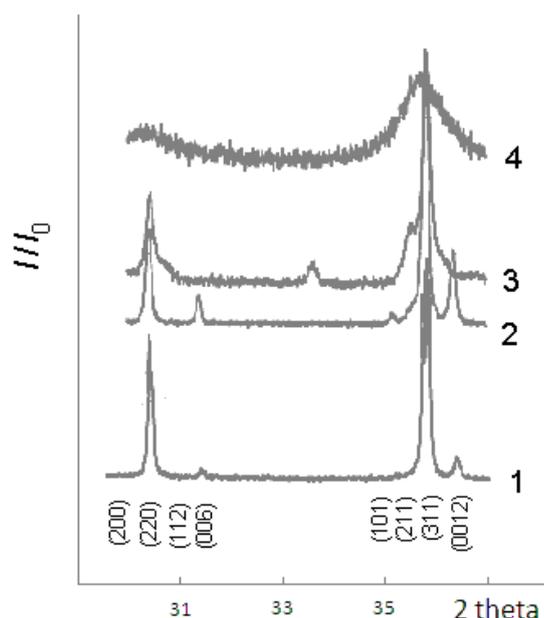


Рис. 1 – Фрагмент рентгенограммы образцов шпинелей Ni_{0.3}Cu_{0.7}Fe_{0.6}Cr_{1.4}O₄, полученных: в ходе топохимической реакции (1); разложением сульфатов (2); в присутствии лимонной кислоты (3); в присутствии полиакриламида (4).

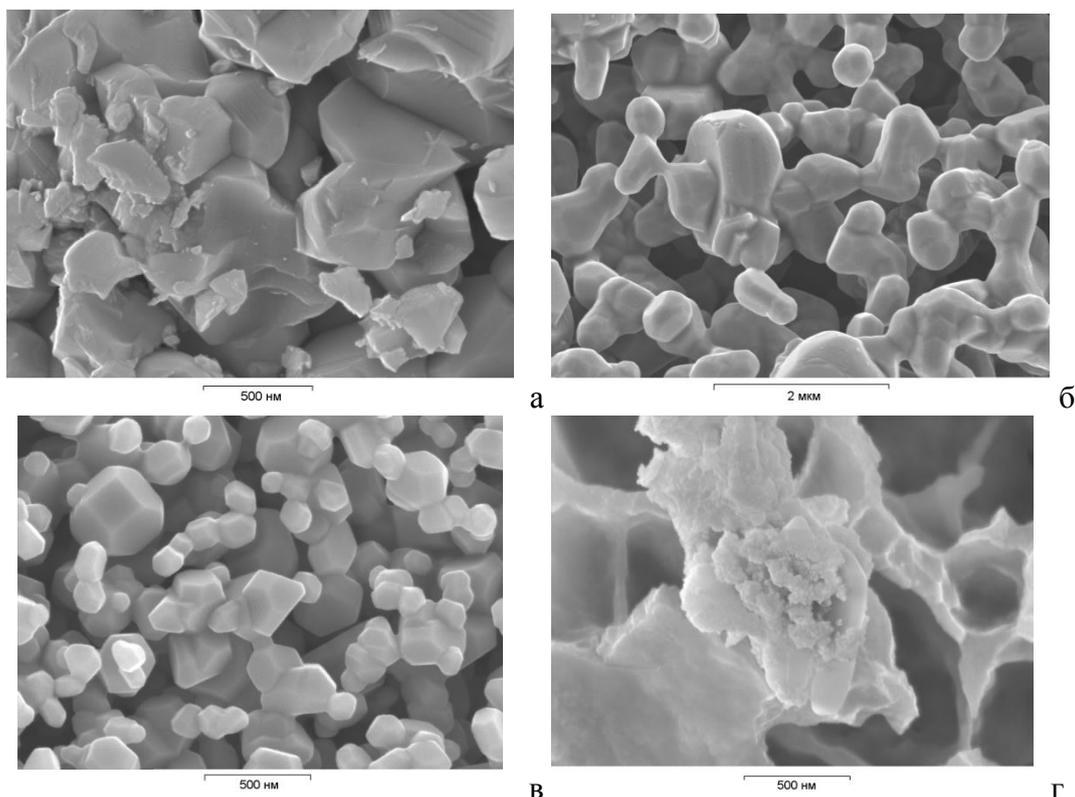


Рис. 2 – Микрофотографии шпинелей $\text{Ni}_{0,3}\text{Cu}_{0,7}\text{Fe}_{0,6}\text{Cr}_{1,4}\text{O}_4$, полученных: в ходе топомхимической реакции (а); разложением сульфатов (б); в присутствии лимонной кислоты (в); в присутствии полиакриламида (г).

Образец 3 состоит из кластеров, соответствующих твердому раствору, кристаллизующемуся в структуре кубической шпинели примерного состава $\text{Ni}_{0,42}\text{Cu}_{0,58}\text{Fe}_{0,85}\text{Cr}_{1,15}\text{O}_4$; тетрагональной шпинели на основе CuCr_2O_4 ; оксиду хрома (III). На рис. 1 приведена часть рентгенограммы *образца 3*. Полученный материал имеет мелкие зерна, по форме близкие к октаэдру (рис. 2, в), $S_{\text{ВЕТ}} = 1.8 \text{ м}^2/\text{г}$.

На рентгенограмме *образца 4* (рис. 1) выявлены линии, соответствующие твердому раствору, кристаллизующемуся в структуре кубической шпинели, ее состав может быть описан формулой $\text{Ni}_{0,3}\text{Cu}_{0,7}\text{Fe}_{0,6}\text{Cr}_{1,4}\text{O}_4$. Шпинель имеет развитую поверхность с порами большого диаметра (рис. 2, г), $S_{\text{ВЕТ}} = 15.9 \text{ м}^2/\text{г}$.

Согласно полученным данным, значение $S_{\text{ВЕТ}}$ для образца, полученного разложением солей в присутствии аммиака и полиакриламида, оказалось максимальным и превышает аналогичные величины для других образцов на 89-96 %.

Выводы

На основе изучения фазового состава и морфологических особенностей образцов в системе $0.3\text{NiO} - 0.7\text{CuO} - 0.3\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0.7\text{Cr}_2\text{O}_3$, синтезированных с применением различных технологических приемов показано, что с изменением методики синтеза можно получать материал с различным видом зерен. Установлено, что при синтезе из смеси нитратов в среде аммиака и полиакриламида формируется материал, содержащий одну фазу кубической шпинели состава $\text{Ni}_{0,3}\text{Cu}_{0,7}\text{Fe}_{0,6}\text{Cr}_{1,4}\text{O}_4$ и обладающий повышенным значением площади удельной поверхности. Полученные результаты могут быть использованы для выбора технологических условий формирования ферритов-хромитов переходных элементов со структурой шпинели с развитой поверхностью.

Список литературы

1. Paul B., Bhuayan B., Purkayastha D.D., Dhar S. S., Behera S. Facile synthesis of spinel CuCr_2O_4 nanoparticles and studies of their photocatalytic activity in degradation of some selected organic dyes // *J. of Alloys and Compounds*. 2015. V. 648. P. 629-635.
2. Zheng H., Ni Y., Xiang N., Ma X., Wan F. Solvothermal synthesis of octahedral NiFe_2O_4 nanocrystals and catalytic properties for the reduction of some aromatic nitrocompounds // *Materials Chemistry and Physics*. 2015. V. 158. P. 82-88.
3. Chen L., Dai H., Shen Y., Bai J. Size-controlled synthesis and magnetic properties of NiFe_2O_4 hollow nanospheres via a gel-assistant hydrothermal route // *J. of Alloys and Compounds*. 2010. V. 491. P. L33-L38.
4. Zhang L., Jiao W. The effect of microstructure on the gas properties of NiFe_2O_4 sensors: Nanotube and nanoparticle // *Sensors and Actuators B*. 2015. V. 216. P. 293-297.
5. Chiu T.-W., Tu C.-H., Chen Yi-T. Fabrication of electro spun CuCr_2O_4 fibers // *Ceramics International*. 2015. V. 41. P. S399-S406.
6. Saensuk O., Phokha S., Bootchanont A., Maensiri S., Swatsitang E. Fabrication and magnetic properties of NiFe_2O_4 nanofibers obtained by electrospinning // *Ceramics International*. 2015. V. 41. P. 8133-8141.
7. Liu H., Guo Yi., Zhang Ya., Wu F., Liu Yu., Zhang D. Synthesis and properties of ZnFe_2O_4 replica with biological hierarchical structure // *Materials Science and Engineering B*. 2013. V. 178. P. 1057- 1061.
8. Peng Z., Wen C., Fang Q., Zhang B., Yang H.G. High-yield synthesis and magnetic properties of ZnFe_2O_4 single crystal nanocubes in aqueous solution // *J. of Alloys and Compounds*. 2013. V. 550. P. 348-352.
9. Tahir A.A., Burch H.A., Wijayantha K.G.U., Pollet B.G. A new route to control texture of materials: Nanostructured ZnFe_2O_4 photoelectrodes // *International J. of Hydrogen Energy*. 2013. V. 38. P. 4315-4323.
10. Шабельская Н.П., Иванов В.В., Таланов В.М., Резниченко Л.А., Таланов М.В., Ульянов А.К. Синтез и фазообразование в системе $\text{NiO-CuO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ // *Стекло и керамика*. 2014. № 1. С. 20-24.
11. Шабельская Н.П. Процессы фазообразования в системе $\text{NiO - CuO - Fe}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ при разложении солей // *Неорганические материалы*. 2014. Т. 55. № 11. С. 1205-1209.

02.00.00

О.А. Платонова канд. хим. наук

Акционерное общество «Институт МосводоканалНИИпроект»,
отдел «Учебный центр»,
Москва, ucmvk@mvkniipr.ru

ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ АВТОЛИЗАТОРА

В работе представлены результаты исследований по разработке конструкции автолизатора, позволяющего осуществлять глубокую степень денитрификации в аэротенках при любых концентрациях углеродосодержащих соединений в исходной сточной воде. Определено заданное время автолиза иловой смеси для максимальной степени выделения ортофосфатов в раствор. Разработанная модель биотехнологического процесса в автолизаторе позволяет определить технологические параметры процесса автолиза в зависимости от свойств избыточного ила и добиться глубокой очистки сточных вод не зависимо от поступающей их концентрации.

Ключевые слова: денитрификация, дефосфотация, автолизатор, сточные воды.

В последние годы в системе водоснабжения и водоотведения крупных и средних по числу жителей городов наблюдается общая тенденция снижения объема водопотребления и водоотведения. Сточные воды большинства населенных пунктов, несмотря на снижение водопотребления, характеризуются как низкоконцентрированные, в диапазоне отношения взвешенные вещества к БПК₅ менее 150/130 мг/л, и среднеконцентрированные - 150-250/150-230 мг/л [1]. Для большинства населенных пунктов характерным является состав сточных вод, с высоким содержанием аммонийного азота и фосфатов, и, сравнительно низким содержанием углеродосодержащих соединений по показателям БПК₅ и ХПК. В большинстве случаев, при устройстве на стадии биологической очистки анаэробных и аэробных зон для проведения процессов нитри-денитрификации (НДФ) удается осуществить первую стадию – окисление азота аммонийного до азота нитратов. На процесс денитрификации, восстановления азота нитратов, в исходной сточной воде органических соединений недостаточно.

Целью исследований являлась разработка конструкции аппарата, позволяющего осуществлять в аэротенках глубокую степень денитрификации при любых концентрациях углеродосодержащих соединений в исходной сточной воде с одновременным удалением ортофосфатов.

Основными условиями проведения на канализационных очистных сооружениях (КОС) биотехнологических процессов глубокой очистки сточных вод от углеродосодержащих, азотных и фосфорных соединений являются подача в аэротенки необходимого количества воздуха, постоянное выведение избыточной биомассы осадков сточных вод, достаточное содержание органических соединений в исходной сточной воде для восстановления азота нитратов. Если два первых положения определяются условиями технического обеспечения биотехнологических процессов в аэротенках, то наличие органических соединений является фактором качественного состава сточных вод населенного пункта. Согласно общепринятым положениям в случае низкого содержания органических загрязнений в исходной сточной воде для осуществления процесса денитрификации необходимо введение искусственного, легко окисляемого субстрата (неконсервативной органики) - этанола, метанола, уксусной кислоты, ацетона [2].

Институтом ОА «МосводоканалНИИпроект» разработана технология, которая позволяет осуществлять глубокую очистку сточных вод с процессами нитрификации и денитрификации при низких концентрациях загрязняющих веществ в исходной сточной воде по показателям БПК₅ и ХПК, и одновременно удалять фосфорные соединения из сточных вод до требуемых нормативных показателей. В предлагаемой технологии используется процесс автолиза активного ила в специальном сооружении или выделенной секции аэротенка или отстойника, куда поступает часть избыточного ила (вторая часть избыточного ила подается на сооружения обработки осадка) без подачи сточных вод, т.е. в условиях отсутствия внешнего органического субстрата. В автолизаторе иловая смесь постоянно перемешивается мешалками для смешения с реагентом, который подается для связывания солей ортофосфорной кислоты в нерастворимые соединения.

Из автолизатора иловая смесь перекачивается либо в первичные отстойники, либо на обработку в аэротенк (рис.1). Из первичного отстойника образовавшиеся нерастворимые соединения ортофосфорной кислоты выводятся с сырым осадком, из аэротенка - с избыточным активным илом.

В автолизаторе, в зависимости от времени пребывания иловой смеси, происходят сложные биологические процессы. Основным является автолиз микроорганизмов - разрушение или саморастворение клеток и структурных молекул за счет собственных гидролитических и эндогенных ферментов. На стадии автолиза ферменты перешедшие в раствор и отмершая биомасса становятся питательным субстратом для роста новых микроорганизмов и одновременно, наряду с продуктами метаболизма, могут являться ингибиторами тормозящими биологические процессы роста биоценоза в автолизаторе.

Процессы, происходящие в автолизаторе проточного типа, который можно рассматривать как частный случай биореактора – ферментера, подразделяются на следующие фазы:

1. Адаптация; 2. Автолиз в условиях отсутствия питания; 3. Фаза роста и накопления продуктов автолиза; 4. Фаза начала интенсивного размножения; 5. Фаза равновесия вновь появляющихся клеток и погибших микроорганизмов; 6. Завершение цикла развития.

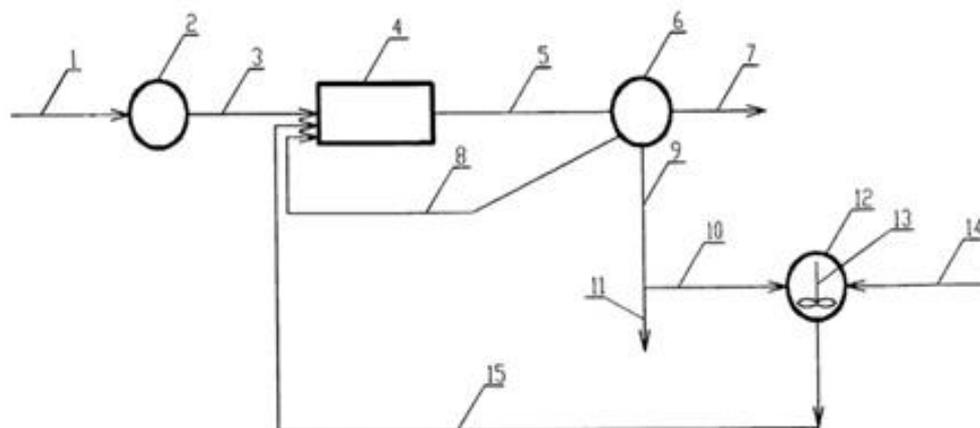


Рис.1. Технологическая схема биологической очистки с автолизатором.

- 1 - подача исходной сточной воды на очистку, 2 - узел механической очистки, 3 - сточная вода после механической очистки, 4 - аэротенк, 5 - иловая смесь, 6 - вторичный отстойник, 7 - очищенная сточная вода, 8 - возвратный ил, 9 - избыточный активный ил, 10 - избыточный активный ил, подаваемый на автолиз, 11 - избыточный активный ил, направляемый на обработку осадков сточных вод, 12 - анаэробный реактор для автолиза, 13 - перемешивающее устройство, 14 - введение реагента, 15 - фосфоросодержащий автолизат.

Поскольку в автолизатор поступают разные возрастные группы микроорганизмов – «молодые» и «старые», с разной продолжительностью жизни, следует учитывать условность перечисленных фаз биотехнологического процесса и соответственно отдельные фазы процесса могут протекать одновременно. В проточном автолизаторе время нахождения

иловой смеси определяется степенью автолиза иловой смеси и степенью диссимиляции органических веществ при постоянном выведении из сооружения продуктов метаболизма. Максимальное время нахождения иловой смеси в автолизаторе определяется максимальной степенью лизиса биоценоза и диссоциацией органических веществ, когда в раствор переходит наибольшее количество продуктов распада биомассы, которые могут использоваться в качестве органического субстрата в процессе денитрификации. Одновременно, при лизисе микроорганизмов выделяются ортофосфаты, которые связываются в нерастворимые соединения вводимым в автолизатор реагентом (ионами железа, кальция, алюминия).

Основным технологическим параметром автолизатора является время пребывания в нем иловой смеси, определяющееся условиями использования его в технологической схеме КОС:

1) получения необходимого количества легко окисляемого углеродосодержащего субстрата для процесса восстановления азота нитратов;

2) максимальное выделением в раствор ортофосфатов для перевода их в нерастворимые соединения.

Исследованиями установлено, что для разных технологических режимов - с поддержанием возраста активного ила и поддержанием заданной дозы ила в аэротенках, без стабилизации возрастной структуры, илы очистных сооружений имеют разную удельную скорость не только роста биомассы, но и отмирания микроорганизмов. Возраст ила является величиной обратной удельной скорости роста микроорганизмов в сооружениях биологической очистки и отражает не изменения видового состава иловой смеси, а внутриобменные процессы в биоценозе в результате совместных процессов размножения и смертности, которые приводят к структурному изменению биоценоза, его реологических и флокулирующих свойств. Возраст ила понятие условное - «молодой» ил, это быстрорастущая биомасса, требующая значительных энергоресурсов для своей жизнедеятельности, поэтому оказываясь в стрессовой ситуации, в условиях отсутствия питательного субстрата (в автолизаторе), в ней значительно быстрее начинаются процессы отмирания, чем у активного ила с большим возрастом, «старого» ила. В «старом» иле процессы жизнедеятельности протекают с меньшей удельной скоростью роста организмов и процессы катаболизма и анаболизма более сбалансированы между собой. Оказываясь в условиях отсутствия питательного субстрата или изменяющихся условий среды (пиковых сбросов сточных вод), ил меньше подвержен влиянию стрессовых условий. В этот период в биомассе активного ила большого возраста преобладающими являются процессы анаболизма, позволяющие ему некоторое время существовать за счет внутренних резервов и снижать удельную скорость отмирания микроорганизмов.

Моделирование кинетики процессов, протекающих в автолизаторе можно представить рядом неоднородных многофакторных уравнений [3], в которых участвуют такие пары, как субстрат и продукт, субстрат и биомасса. Общее уравнение биотехнологического процесса в автолизаторе имеет вид:

$$\frac{dC}{dt} = \mu C - \hat{\mu} C \quad (1),$$

где μ - удельная скорость роста биомассы;

$\hat{\mu}$ - удельная скорость отмирания биомассы в биотехнологическом процессе, C - биомасса активного ила, $\hat{Q} = \hat{\mu} C$ общая скорость отмирания микроорганизмов - процесс катаболизма, $Q = \mu C$ общая скорость роста микроорганизмов в процессе анаболизма, когда в результате отмирания микроорганизмов выделяются ферменты, полисахариды и клетчатка, являющиеся субстратом для роста новых организмов (μC).

В начальный период пребывания иловой смеси в автолизаторе доминирующими являются процессы автолиза, саморастворение живых клеток и тканей под действием их собственных гидролитических ферментов, разрушающих структурные молекулы и процесса метаболического распада сложных веществ на более простые вещества (дифференциация). Продукты метаболизма могут ингибировать процессы роста новой биомассы, для которой продукты распада являются питательным субстратом.

Процессы, происходящие в автолизаторе в условиях отмирания биомассы, в начальный период времени поступления ее в автолизатор, наиболее полно отображают уравнения Ферхюльста [4] и Рамкришны [5], где рассматривается вся целостная структура биомассы активного ила, как системное сообщество различных организмов. В уравнении Ферхюльста удельная скорость отмирания биомассы принята пропорциональной концентрации биомассы

$$\hat{\mu} = KC \quad (2),$$

а общая скорость отмирания пропорциональной квадрату концентрации биомассы:

$$\hat{Q}_C = KC^2 \quad (3),$$

где K – константы скорости отмирания биомассы.

Данное уравнение процесса отмирания биомассы наиболее применимо к активному илу КОС, где эксплуатация осуществляется с поддержанием дозы ила, без стабилизации возрастной структуры ила и для КОС с поддержанием возраста в пределах 20 суток.

При эксплуатации сооружений биологической очистки с возрастными активными илами от 60 до 100 суток биоценоз более устойчив к стрессовым ситуациям. Адаптационный период при поступлении в автолизатор биоценоза с высокими возрастными илами увеличивается, удельная скорость отмирания лимитируется концентрацией ингибирующих продуктов метаболизма P . В данном случае удельная скорость отмирания в автолизаторе описывается уравнением Рамкришны [5]:

$$\hat{\mu} = KP \quad (4),$$

$$\text{или } \hat{Q}_C = KCP \quad (5),$$

где P – концентрации ингибирующих продуктов метаболизма.

В фазе адаптации иловой смеси к условиям пребывания в автолизаторе и началу роста биомассы удельная скорость роста лимитируется продуктами метаболизма и может быть описана уравнением конкурентного торможения продуктами метаболизма Моно-Иерусалимского [6]:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_S + S + P/K_P} \quad (6)$$

На этой фазе роста биомассы с одновременным отмиранием микроорганизмов применимо уравнение Колпикова [7], которое связывает удельную скорость диссимиляции с концентрацией субстрата S

$$\hat{\mu} = \hat{\mu}_m \frac{1}{1 + S/K_d} \quad (7)$$

$$\text{или } \hat{Q}_C = C \frac{\hat{\mu}}{1 + S/K_d} \quad (8),$$

где $\hat{\mu}_m$ – максимальная удельная скорость диссимиляции при нулевой концентрации субстрата;

K_d – константа субстратного ингибирования процесса диссимиляции.

Это уравнение дает переменную скорость отмирания в автолизаторе в ходе биотехнологического процесса. Период распада ила и выделением в раствор продуктов автолиза сменяется периодом роста биомассы с постепенным ее уменьшением в автолизаторе.

Таким образом, в зависимости от характеристики избыточного активного ила, поступающего в автолизатор, общие уравнения биотехнологических процессов примут следующий вид:

1. При времени пребывания иловой смеси в автолизаторе до 8-10 часов, где эксплуатация КОС осуществляется по дозе ила в аэротенках и для КОС с поддержанием возраста в пределах 20 суток

$$\frac{dc}{dt} = \mu_m \frac{S}{K_S + S + P/K_P} C_{\text{посм}} - KC^2 \quad (9)$$

2. При времени пребывания иловой смеси в автолизаторе до 24 - 30 часов, где на КОС эксплуатация осуществляется с поддержанием возраста ила от 60 до 100 суток

$$\frac{dc}{dt} = \mu_m \frac{S}{K_S + S + P/K_P} C_{\text{посм}} - KCP \quad (10)$$

3. При времени пребывания иловой смеси в автолизаторе до 50 - 96 часов

$$\frac{dc}{dt} = \mu_m \frac{S}{K_s + S + P/K_p} C_{\text{рост}} - \hat{\mu}_m \frac{1}{1 + S/K_d} C_{\text{отм}} \quad (11)$$

Процессы, на которых основывается работа автолизатора, были изучены на практике. Экспериментальные работы с полупромышленной конструкцией проводились на крупных городских сооружениях по очистке сточных вод, таких как город Уфа и город Москва. В результате испытаний получен положительный результат [4].

Выводы.

1. Использование в схеме КОС автолизатора для части избыточного ила позволяет осуществлять глубокую степень денитрификации – восстановление азота нитратов в аэротенках, при любых концентрациях углеродосодержащих соединений в исходной сточной воде.

2. Устанавливая заданное время автолиза иловой смеси в автолизаторе для максимальной степени выделения ортофосфатов в раствор и последующему связыванию их реагентами в нерастворимые соединения позволяет обеспечить максимальное удаление фосфатов из сточных вод на КОС.

3. Предлагаемая модель биотехнологического процесса в автолизаторе позволяет определить технологические параметры процесса автолиза в зависимости от свойств избыточного ила.

Список литературы

1. Данилович Д.А., Эпов А.Н., Канунникова М.А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов – основа для технологического нормирования // НДТ Наилучшие Доступные Технологии Водоснабжения и Водоотведения. 2015. №3-4. С 18-28.
2. Захватаева Н.В., Шеломков А.С. Активный ил как управляемая экологическая система. М.: Экспо Медиа-Пресс, 2013. 285 с.
3. Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Муратова Е.И., Ермаков А.А. Компьютерное моделирование биотехнологических процессов и систем. Тамбов.: ТГТУ, 2005. 52с.
4. Платонова О.А, Шеломков А.С., Степанов М.А. М.: Вода: химия и экология № 9 2017г., 64-71с.
5. Ramkrishna D., Frederickson A.G., Tsuchiya H.M. Dynamics of microbial propagation: Models considering inhibitors and variable cell composition // Biotechnol. and Bioeng. 1967. № 2. P. 129-170.
6. Иерусалимский Н.Д. Основы физиологии микробов. М.: АН СССР, 1963. 244 с.
7. Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическое моделирование в биофизике. М.: Наука, 1975. 343 с.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ (05.02.00)

05.02.05

А.С. Андреев д-р физ.-мат. наук, Е.В. Дороговцева, Е.А. Сутыркина канд. физ.-мат.наук

Ульяновский государственный университет,
факультет математики, информационных и авиационных технологий,
кафедра информационной безопасности и теории управления,
Ульяновск, andreevas@ulsu.ru

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ АНТРОПОМОРФНОЙ РУКИ РОБОТА

В работе предлагается новый подход к управлению движением антропоморфной руки робота с тремя степенями свободы. Решаются задачи о робастной стабилизации произвольного положения и глобального отслеживания траектории руки робота.

Ключевые слова: *антропоморфная рука робота, стабилизация движения, синтез управления.*

Дальнейшее интенсивное развитие техники и производства предъявляет повышенные требования к работе робототехнических систем. Поэтому, несмотря на многочисленные исследования по разработке математических методов конструирования структур управления такими системами, проводимые с 60-х годов прошлого века, такие исследования остаются актуальными. К числу актуальных задач относятся работы по управлению манипуляторами без измерения скоростей [1-8], по построению управления в нелокальной нестационарной постановке.

Целью настоящей работы является решение задачи управления антропоморфной рукой робота в нелинейной нестационарной постановке, в том числе, при измерении только координат ее положения.

Рассмотрим математическую модель антропоморфной руки робота, изображенной на рис.1.

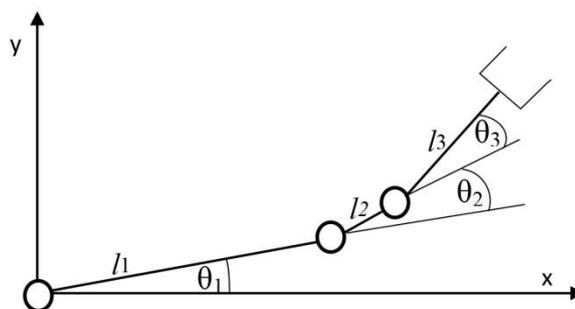


Рис. 1

Рука моделируется в виде трех массовых стержней, соединенных шарнирами, шарнир O_1 закреплен. Положим, что движение происходит в вертикальной плоскости, положение системы определяется углами поворотов: θ_1 первого стержня по отношению к некоторой оси O_1x , двух других – углами θ_2, θ_3 относительно предыдущего стержня. Длины стержней – l_1, l_2, l_3 , положение центров масс определяется длинами l_{c1}, l_{c2}, l_{c3} , моменты инерции каждого стержня относительно его центра масс есть I_1, I_2, I_3 . Кинетическая энергия системы может быть представлена в виде суммы кинетических энергий всех трёх стержней $T = T_1 + T_2 + T_3$, где

$$T_1 = (I_1 + m_1 l_1^2 / 4) \dot{\theta}_1^2 / 2$$

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 \left(l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \right) + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 \left(l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + l_3^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + 2l_1 l_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 + \right. \\ \left. + 2l_1 l_3 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_3 + \theta_2) + 2l_2 l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos \theta_3 \right) + \\ + \frac{1}{2} I_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2$$

Составим уравнения движения системы в векторно-матричном виде в форме Лагранжа:

$$A(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = M + U,$$

где $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)'$ – вектор обобщенных координат, $A(\theta)$ – матрица инерции системы, $C(\theta, \dot{\theta})$ – матрица центробежных и кориолисовых сил инерции, M – момент гравитационных сил, U – вектор управления, при этом

$$a_{11} = I_1 + I_2 + I_3 + m_1 \frac{l_1^2}{4} + m_2 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2) + \\ + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2l_1 l_3 \cos(\theta_3 + \theta_2) + 2l_2 l_3 \cos \theta_3) \\ a_{12} = a_{21} = I_2 + I_3 + m_2 (l_2^2 + l_1 l_2 \cos \theta_2) + \\ + m_3 (l_2^2 + l_3^2 + l_1 l_2 \cos \theta_2 + l_1 l_3 \cos(\theta_3 + \theta_2) + 2l_2 l_3 \cos \theta_3) \\ a_{13} = a_{31} = I_3 + m_3 (l_3^2 + l_1 l_3 \cos(\theta_3 + \theta_2) + l_2 l_3 \cos \theta_3) \\ a_{22} = I_2 + I_3 + m_2 l_2^2 + m_3 (l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_3 \cos \theta_3) \\ a_{23} = a_{32} = I_3 + m_3 (l_3^2 + l_2 l_3 \cos \theta_3), \quad a_{33} = I_3 + m_3 l_3^2 \\ c_{11} = 0, \quad c_{12} = -(m_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 + 2m_3 l_1 (l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_3 + \theta_2))) (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - \\ - m_3 l_1 l_3 \sin(\theta_3 + \theta_2) \dot{\theta}_3 \\ c_{13} = -m_3 l_3 (l_1 \sin(\theta_3 + \theta_2) + l_2 \sin \theta_3) (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) - \\ - m_3 l_3 (l_1 \sin(\theta_3 + \theta_2) + 2l_2 \sin \theta_3) \dot{\theta}_2 \\ c_{21} = (m_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 + m_3 l_1 (l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_3 + \theta_2))) \left(\dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_2 \right) + \\ + \frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 \sin(\theta_3 + \theta_2) \dot{\theta}_3 \\ c_{22} = -\frac{1}{2} (m_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 + m_3 l_1 (l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_3 + \theta_2))) \dot{\theta}_1 \\ c_{23} = -\frac{1}{2} m_3 l_3 l_1 \sin(\theta_3 + \theta_2) \dot{\theta}_1 - m_3 l_3 l_2 \sin \theta_3 (2\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \\ c_{31} = (m_3 l_3 (l_1 \sin(\theta_3 + \theta_2) + l_2 \sin \theta_3)) \left(\dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_3 \right) + \\ + \frac{1}{2} m_3 l_3 (l_1 \sin(\theta_3 + \theta_2) + 2l_2 \sin \theta_3) \dot{\theta}_2 \\ c_{32} = -\frac{1}{2} m_3 l_3 l_1 \sin(\theta_3 + \theta_2) \dot{\theta}_1 + m_3 l_2 \sin \theta_3 \left(-2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_3 \right) \\ c_{33} = -\frac{1}{2} m_3 l_3 l_1 \sin(\theta_3 + \theta_2) \dot{\theta}_1 - \frac{1}{2} m_3 l_3 l_3 \sin \theta_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ M_1 = -g (m_1 l c_1 + m_2 l_1 + m_3 l_1) \cos \theta_1 - g (m_2 l c_2 + m_3 l_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) - \\ - m_3 g l c_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ M_2 = -g (m_2 l c_2 + m_3 l_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) - m_3 g l c_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ M_3 = -m_3 g l c_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

Пусть $(\theta_1^0, \theta_2^0, \theta_3^0)$ – любое заданное положение руки робота. Положим

$$U_i = -M_i - k_i \sin \frac{\theta_i(t) - \theta_i^0}{2} - p_i \int_0^t e^{s_i(\tau-t)} \sin \frac{\theta_i(\tau) - \theta_i^0}{2} d\tau, \quad i=1,2,3$$

$$k_1 > g(m_1 l c_1 + m_2(l_1 + l c_2) + m_3(l_1 + l_2 + l c_3)) + \frac{p_1}{s_1}$$

$$k_2 > g(m_2 l c_2 + m_3(l_2 + l c_3)) + \frac{p_2}{s_2}, \quad k_3 > g m_3 l c_3 + \frac{p_3}{s_3}, \quad p_j, s_j > 0 \quad (j = \overline{1,3})$$

На основании работ [7, 8] можно утверждать, что это управление обеспечивает стабилизацию любого заданного положения $(\theta_1^0, \theta_2^0, \theta_3^0)$ системы. Численное моделирование движения роботизированной антропоморфной руки при действии указанного управления проводилось при следующих параметрах:

$$I_1 = 0.12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad I_2 = 0.12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad I_3 = 0.12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$m_1 = 2.5 \text{ кг}, \quad m_2 = 15 \text{ кг}, \quad m_3 = 2 \text{ кг}$$

$$l_1 = 0.5 \text{ м}, \quad l_2 = 0.1 \text{ м}, \quad l_3 = 0.5 \text{ м}, \quad l c_1 = 0.2 \text{ м}, \quad l c_2 = 0.05 \text{ м}, \quad l c_3 = 0.5 \text{ м}$$

$$s_1 = s_2 = s_3 = 2, \quad p_1 = p_2 = p_3 = 220$$

На рисунках 2, 3 показаны результаты численного моделирования. Видно, что происходит стабилизация заданного положения руки практически в течение 10 секунд.

Пусть $(\theta_1^0(t), \theta_2^0(t), \theta_3^0(t))$ – какое-либо программное движение робота, реализуемое управлением

$$U^0(t) = A(\theta_0(t))\ddot{\theta}_0(t) + C(\theta_0(t), \dot{\theta}_0(t))\dot{\theta}_0(t) - M(\theta_0(t))$$

Введем возмущения $x = \theta - \theta^0(t)$, $\dot{x} = \dot{\theta} - \dot{\theta}^0(t)$. На основании работ [6, 7] можно найти, что управляющее воздействие

$$U = U^0(t) + B(\dot{x} + p(x)), \quad p(x) = (\sin(x_1/2), \sin(x_2/2), \sin(x_3/2))'$$

является стабилизирующим, где $B \in R^{3 \times 3}$ – матрица коэффициентов усиления. На рис. 4, 5 показаны результаты численного моделирования движения роботизированной антропоморфной руки для отслеживаемой траектории

$$\theta_1^0(t) = 0.2t \text{ рад}, \quad \theta_2^0(t) = 1.5 + \sin(0.5t) \text{ рад}, \quad \theta_3^0(t) = 0.5 \sin(0.5t) \text{ рад}$$

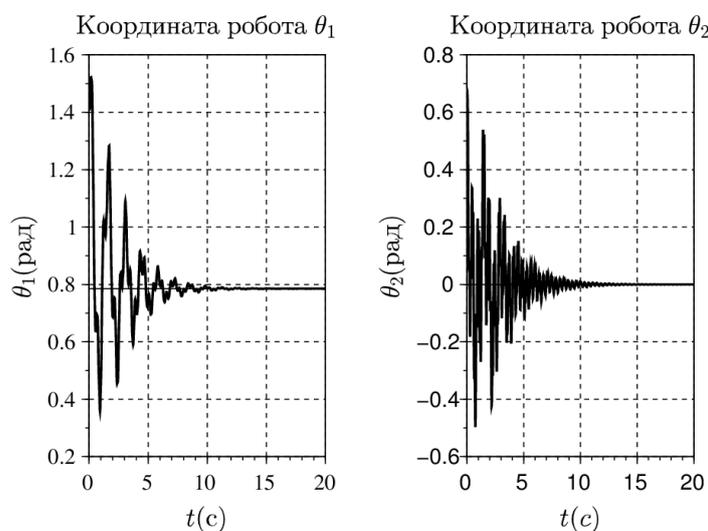


Рис. 2

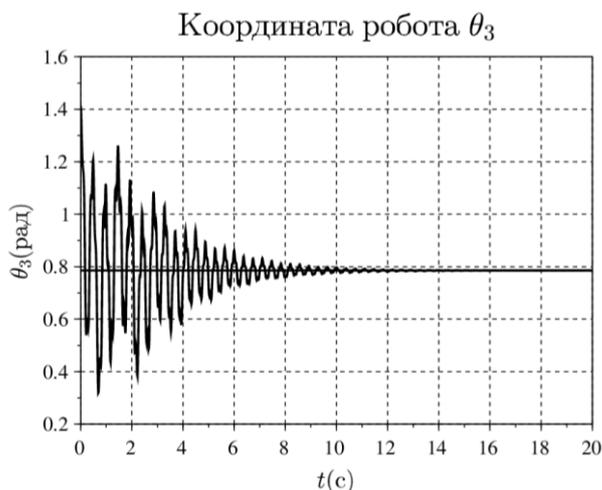


Рис. 3

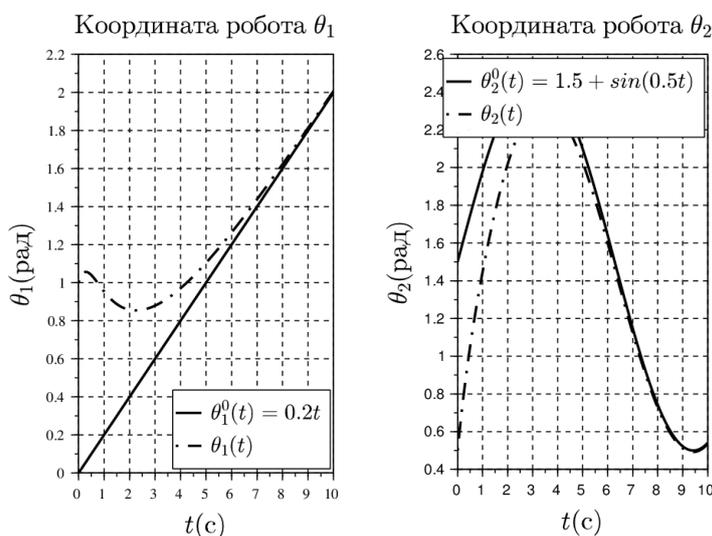


Рис. 4

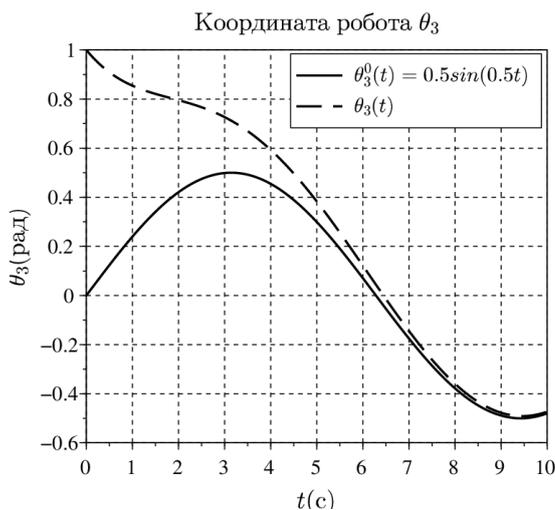


Рис. 5

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания по НИР (проект 9.5994.2017/БЧ) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-41-730022).

Список литературы

1. *Bartolini G., Pisano A.* Global output-feedback tracking control and load disturbance rejection for electrically-driven robotic manipulators with uncertain dynamics // *International Journal of Control.* 2003. Vol. 76, № 12. P. 1201–1213.
2. *Burkov I. V.* Stabilization of mechanical systems via bounded control and without velocity measurements // *3-nd Russian-Swedish Control Conference, St. Petersburg, Russia.* 1995. P. 37–41.
3. *Dixon W. E., Zergelolu E., Dawson D. M.* Global robust output feedback tracking control of robot manipulators // *Robotica.* 2004. Vol. 22. P. 351–357.
4. *Moreno-Valenzuela J., Santibanez V., Campa R.* On output feedback tracking control of robot manipulators with bounded torque input // *International Journal of Control, Automation, and Systems.* 2008. Vol. 6, № 1. P. 76–85.
5. *Nicosia S., Tomei P.* Robot control by using only joint position measurements // *IEEE Transactions on Automatic Control.* 1990. Vol. 35, № 9. P. 1058–1061.
6. *Andreev A. S., Peregudova O. A.* Trajectory tracking control for robot manipulators using only position measurements // *International Journal of Control,* 2017. DOI: 10.1080/00207179.2017.1397755
7. *Андреев А.С., Перегудова О.А.* О стабилизации программных движений голономной механической системы без измерения скоростей // *Прикладная математика и механика.* 2017. Т. 81, Вып. 2. С. 137–153.
8. *Андреев А.С., Перегудова О.А.* Нелинейные регуляторы в задаче о стабилизации положения голономной механической системы // *Прикладная математика и механика.* 2018. Т. 82, Вып. 2. С. 156–176.

05.02.18

А.П. Буйносов д-р техн. наук, Е.В. Федоров

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, buynosov@mail.ru, fedorov335@yandex.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПРЕССОРОВ ЛОКОМОТИВА

В статье приведен разработанный метод, позволяющий без проведения сложных расчетов выбрать характеристики компрессорной установки и главных резервуаров тормозной магистрали локомотива. Показана работа компрессорной установки локомотива с применением способа контроля тормозной магистрали на одной и двух ветвях циклограммы.

Ключевые слова: локомотив, компрессор, производительность, метод, определение.

Основу безопасности движения подвижного состава железных дорог составляют автоматические тормоза. После прицепки локомотива к составу, заряженному от пневматической сети парка отправления, машинист должен выполнить подзарядку тормозной сети железнодорожного состава (поезда). После этого происходит выполнение основной операции приемки поезда – полное опробование автотормозов. Одним из самых важных параметров тормозной системы поезда является производительность компрессорной установки, обеспечивающей пневматическую часть тормоза сжатым воздухом при различных режимах его работы. Выбор параметров компрессорной установки нельзя производить без анализа характеристик главного резервуара, так как эти два элемента работают в единой системе, обеспечивающей запасом сжатого воздуха все пневматические элементы подвижного состава.

От результата работы звеньев системы «компрессор – главные резервуары» напрямую зависит работоспособность и эффективность тормозов подвижного состава, поэтому необходим научный подход к расчетам параметров данной системы.

В настоящее время при выборе производительности компрессорной установки, на основании экспериментальных данных, руководствуются рядом исходных положений: компрессорная установка должна обеспечивать объем сжатого воздуха, необходимый для торможения, пополнение утечек из тормозной системы, а так же на все служебные нужды локомотива (работа песочниц, реверсов, контакторов, свистков, пневматических приводов дверей на МВПС); восстановление зарядного давления в запасных резервуарах тормозной системы пассажирского поезда должно происходить: а) после полного служебного торможения за 35–45 секунд без понижения давления в главных резервуарах; б) после экстренного торможения за 50 секунд, при снижении давления в главных резервуарах не превышающем 2 кгс/см^2 ; восстановление 85 % зарядного давления в запасных резервуарах длинносоставных грузовых поездов должно происходить: а) после полного служебного торможения за время, не превышающее 3-х минут, с перепадом давления в главных резервуарах 2 кгс/см^2 ; б) после экстренного торможения – не более 5 минут с использованием перепада давления в главных резервуарах от $9,0$ до $5,5 \text{ кгс/см}^2$; в случаях начало отпуска тормозов после полного служебного торможения должно соблюдаться условие, при котором тормозная магистраль могла зарядиться до рабочего давления за счет перепада давления в главных резервуарах локомотива при неработающем компрессоре; объем главного резервуара локомотива должен превышать объем цилиндра высокого давления не менее чем в 120 раз, чтобы избежать пульсации при подаче компрессором сжатого воздуха [1].

В конечном итоге, с учетом вышеперечисленных положений, производительность компрессорной установки рекомендуют выбирать исходя из расчета общего часового расхода воздуха при частых торможениях

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{ут}} + Q_{\text{тор}} + Q_{\text{др}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ут}}$ – расход воздуха на утечки из пневматических элементов тормозной системы, л/ч; $Q_{\text{тор}}$ – расход воздуха на торможение, л/ч; $Q_{\text{др}}$ – другие расходы (на собственные нужды), л/ч.

Перечисленные положения дают весьма приблизительное представление о работе системы «компрессор – главные резервуары» и о взаимодействии звеньев внутри самой системы, что послужило в свою очередь причиной столь большого разнообразия сортамента применяемых главных резервуаров.

Решение данной задачи базируется на основных принципах работы рассматриваемой системы и может быть найдено исходя из следующих основополагающих положений: система «компрессор – главные резервуары» должна обеспечивать необходимое количество сжатого воздуха для функционирования всех пневматических элементов поезда; объем главных резервуаров должен выбираться с учетом силы тяги локомотива; производительность компрессорной установки в зависимости от объема главных резервуаров; нормативы принимаются исходя из стационарного режима работы тормозной системы поезда [2].

В тормозной системе различают неустановившийся и стационарный режимы движения сжатого воздуха. Неустановившийся режим характерен изменением величин давления и расхода в поперечном сечении магистрального воздухопровода с течением времени. При стационарном режиме величина давления и расхода с течением времени не изменяются [3].

Для нахождения параметров системы «компрессор – главные резервуары» в качестве основного показателя можно использовать нормативную величину расхода сжатого воздуха на утечки из тормозной сети одного вагона $q_0 = 20$ л/мин, найденную исходя из допускаемого темпа снижения давления $0,2$ кгс/см² в минуту и усредненного объема тормозной сети вагона 100 л.

На рис. 1 представлена циклограмма работы компрессорной установки при стационарном режиме движения воздуха, где отрезок «1–2» – повышение давления сжатого воздуха в главных резервуарах при работе компрессорной установки, а отрезок «2–3» – снижение давления в главных резервуарах вследствие утечек воздуха из пневматической сети при неработающем компрессоре [4].

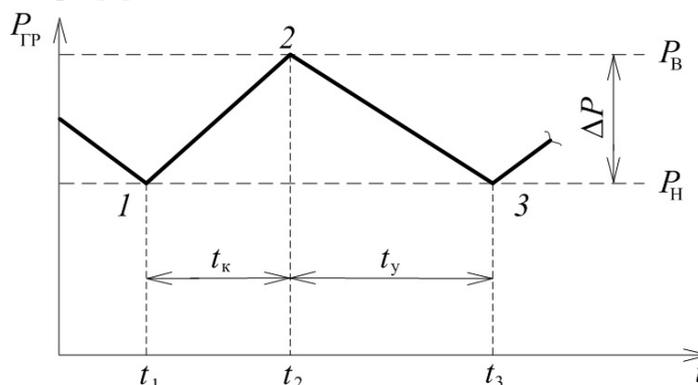


Рисунок 1. Циклограмма работы компрессорной установки локомотива

Анализируя рис. 1 можно составить уравнение баланса сжатого воздуха при работающем компрессоре

$$q_k t_k = \Delta P V + \Delta P V \frac{t_k}{t_y}, \quad (2)$$

где q_k – производительность компрессорной установки, л/мин; ΔP – перепад давления в главных резервуарах, кгс/см²; V – объем главных резервуаров, л; t_k , t_y – соответственно время повышения давления при работе компрессора и время понижения давления в следствии утечек при выключенном компрессоре, с.

Из уравнения (2) можно выразить производительность компрессорной установки

$$q_k = \Delta P V \left(\frac{1}{t_k} + \frac{1}{t_y} \right). \quad (3)$$

Расход воздуха на утечки зависит от числа вагонов включенных в состав, тогда с учетом расхода из пневматической сети одного локомотива (100 л/мин) получим равенство

$$V = (20N_c + 100) \frac{t_y}{\Delta P}. \tag{4}$$

Тогда необходимую производительность компрессорной установки для одного локомотива найдем по формуле

$$q_k = (20N_c + 100) \cdot \left(1 + \frac{t_y}{t_k}\right). \tag{5}$$

Если процесс восстановления зарядного давления в обоих случаях соответствует продолжительности циклов компрессора [5, 6], то $N_y = N_k$ и получаем пропорцию

$$\frac{t_k}{t_y} = \frac{\Delta t_k}{\Delta t_y}. \tag{6}$$

На рис. 2 представлена работа компрессорной установки локомотива с применением способа контроля тормозной магистрали на двух ветвях циклограммы.

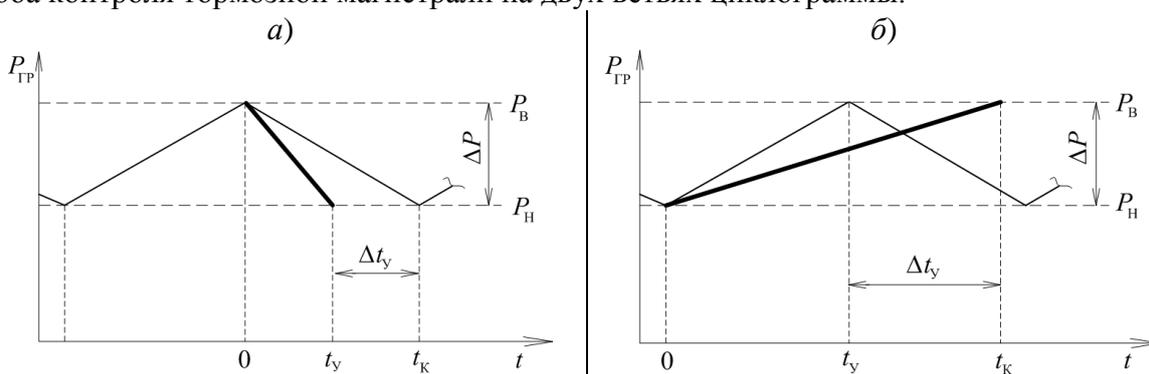


Рисунок 2. Циклограмма работы компрессора локомотива: а) контроль целостности тормозной магистрали при неработающем компрессоре; б) контроль целостности тормозной магистрали при работе компрессора

Рассчитанные по формулам параметры системы «компрессор – главные резервуары» при необходимости могут быть уточнены, но представленный метод расчета дает основы выбора характеристик компрессорной установки и главных резервуаров без проведения сложных расчетов.

Таким образом, выбор характеристик системы «компрессор – главные резервуары» производится с учетом тяговой способности локомотива (от числа вагонов, которые может вести локомотив). Данный способ так же позволяет оценить плотность тормозной сети поезда с определением числа вагонов с нормированной утечкой ($q_0 = 20$ л/мин) включенных в тормозную сеть.

Список литературы

1. Буйносов А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2009. 224 с.
2. Буйносов А.П., Федоров Е.В. Определение тормозной эффективности железнодорожного подвижного состава в пути следования // Транспорт: наука, техника, управление. 2018. № 8. С. 28-34.
3. Буйносов А.П., Федоров Е.В. Совершенствование метода расчета длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава // Известия Транссиба. 2018. № 1(33). С. 13-22.
4. Глушко М.И., Федоров Е.В. Определение фактического объема пневматической сети локомотива // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 103-105.
5. Федоров Е.В., Яковлев К.Н. Анализ эффективности работы аэродинамического тормоза // Инновационный транспорт. 2017. № 3(25). С. 57-59.
6. Буйносов А.П., Козаков Д.Ю. Анализ причин преждевременного выхода из строя аккумуляторных батарей на электропоездах // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 1. С. 128-130.

05.02.00

Г.Е. Кокиева д-р техн. наук, Г.А. Герасимова, И.В. Гоголева канд. педагог. наук

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Якутская государственная сельскохозяйственная академия» в г.Якутск

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФАКТОРЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА МИКРОБНОГО СИНТЕЗА В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФЕРМЕНТАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ

Процесс культивирования микроорганизмов состоит из различных технологических стадий, основная масса из которых проходят при подводе кислорода. Кислород играет большую роль при производстве кормового белка, так как при его наличии происходит рост микробного белка и его интенсификация. На данный момент невозможно определить концентрацию растворенного кислорода без экспериментального определения концентрации и коэффициента массообмена по кислороду.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, микробный синтез, кормовой белок, скорость циркуляции жидкости, концентрация растворенного кислорода, кормовая добавка.

Кормовой белок (дрожжи) – это большая объединенная группа нескольких видов одноклеточных грибов из различных классов (сумчатых, базидиальных, несовершенных). Слово «дрожжи» имеет общий корень со словами «дрожь», «дрожать», которые раньше применялись при описании вспенивания жидкости, зачастую сопровождающего, брожение осуществляемое дрожжами. Кормовые дрожжи применяют и используют в качестве кормового средства не только в случае изменения их свойств, но и в связи с нарушением технологии производства или превышением сроков их хранения. При этом визуальные и биохимические характеристики таких дрожжей должны оставаться на уровне стандартов, характерных для кормовых дрожжей.

При обширном исследовании микробного синтеза, которое является на данный момент самой крупнотоннажной отраслью биотехнологии и микробиологии и открывает большие перспективы возможности получения в промышленной индустрии различных кормовых добавок для кормления животноводства сельского хозяйства и птицеводства с помощью микроорганизмов. Каждый год по всем направлениям идут глубокие разработки по исследованию микробного синтеза. Попытки ведутся с целью активизации и интенсификации процесса культивирования микроорганизмов на различном виде сырья и разнообразным выбором инокулята [1,4,5]. От выбора сырьевой базы и выбора инокулята зависит содержание полученного продукта. Так как богатый комплекс витаминов, минеральных и органических соединений плавно переходит в культивируемый продукт микробного синтеза. В настоящее время большое внимание современных ученых уделяется развитию фармакологической, пищевой и микробной промышленности, а в частности микробному синтезу. Проведен ряд исследований по изучению влияния технологических, микробиологических и производственных факторов на интенсификацию процесса культивирования микроорганизмов [1,5] в аппаратах для культивирования микроорганизмов отличающихся между собой конструктивными особенностями, имеющими свои преимущества и недостатки. Следует учесть, что кормовой белок обладает высокой кормовой ценностью, так как при производстве кормового белка он получает все необходимые источники макро-и- микроэлементов, что благотворно сказывается в обогащении питательными веществами корма при скармливании их сельскохозяйственным животным [1,2,5].

В технологических операциях по получению биопродукции принимает участие большое количество технологического оборудования. В качестве основного используются различного рода теплообменники, испарители, сепараторы, центрифуги, фильтр - прессы, вакуум-выпарные аппараты, флотаторы и мн.др. Кроме основного задействовано вспомогательное оборудование – ёмкостное и промежуточные сосуды, насосы, компрессоры, вентиляторы и т.д. Все это сложное оборудование должно работать в едином технологическом режиме и под контролем записывающей, регистрирующей, уравнивающей, регулирующей аппаратуры. Центральным оборудованием считается аппарат для культивируются микроорганизмов.

При скорости газа менее $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ режим течения принято называть пузырьковым (гомогенным). С увеличением скорости газа и скорости жидкости газожидкостная смесь состоит из пузырьков различных размеров, заполняющих весь объем барботажной трубы. Этот режим принято называть пенным (гетерогенным). При увеличении скорости газа более $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ пенный режим переходит а стержневой , при котором этот тип аппаратов не работает. На рис.1 приведена схема лабораторной автоматизированной ферментационной установки [4,5].

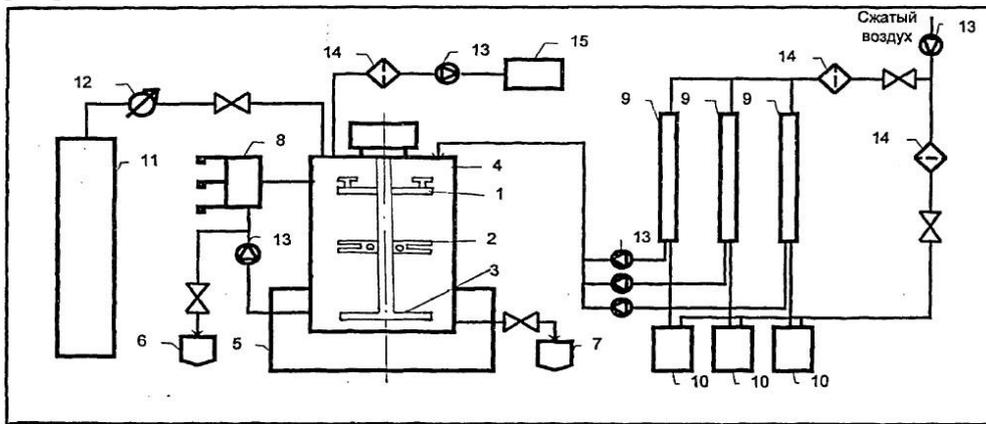


Рисунок 1. Принципиальная схема лабораторной автоматизированной ферментационной установки

- 1-верхняя мешалка; 2-центральная мешалка; 3-нижняя мешалка; 4-корпус ферментатора; 5-термостат; 6,7-пробоотборник; 8-измерительная ячейка; 9-дозаторы на аммиак, питательную среду, субстрат; 10-подпиточные емкости; 11-баллон с кислородом; 12-манометр; 13-насосы; 14-фильтры; 15-газоанализаторы на CO_2 и O_2 .

Особенностью аппаратов группы ФГК является возможность работы при высоких нагрузках по газу, обеспечивающих скорость циркуляции среды до $1-2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Различают несколько режимов движения газожидкостных потоков. Процесс культивирования микроорганизмов состоит из различных технологических стадий, основная масса из которых проходят при подводе кислорода. Кислород играет большую роль при производстве кормового белка, так как при его наличии происходит рост микробного белка и его интенсификация. Газосодержание и скорость жидкой фазы является важнейшими характеристиками газожидкостного потока, т.к. оказывают существенное влияние на циркуляцию жидкости и скорости циркуляции среды [1,2,5].

$$W_{\text{п}} = 1,5 (6 * g * \Delta\rho / \rho_{\text{ж}})^{0,25} \quad (1)$$

Средняя скорость всплытия пузырька в условиях газлифта определяется эмпирическим уравнением:

$$W_{\text{п}} = W_{\text{г}} * 1,92 \left(\frac{h}{H}\right)^{1,35} + 0,15 \quad (2)$$

Скорость циркуляции жидкости зависит от скорости газа и газосодержания. В диапазоне малых скоростей газа при ее увеличении быстро растёт газосодержание и, соответственно, скорость жидкой фазы. Увеличение скорости газа $W_{\text{г}} > 0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ приводит к изменению структуры и режима течения газожидкостного потока, что ведет к более медленному росту газосодержания, увеличению силы трения между стенкой диффузора и жидкостью,

вследствие чего её скорость изменяется незначительно. Скорость жидкости не зависит от поверхностного натяжения и только вязкость влияет на скорость циркуляции, причем при постоянном расходе газа скорость циркуляции снижается с увеличением вязкости жидкости [1,4].

Следует отметить, что получение кормового белка, полученного микробным синтезом менее технологически трудоемко по сравнению с получением сельскохозяйственной продукции и органическим синтезом белка[3,4,5].

Список литературы

1. *Батищев А.Н.* Методологические основы обоснования рационального способа восстановления деталей // Механизация и электрификация сельского хозяйства.-1992.-№ 9.- с.30-31.
2. *Безрядина Г.Н.* Синтез алгоритмов управления в условиях конкурентного взаимодействия популяций микроорганизмов: (На прим. дрожжевого производства). Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.16, 05.13.07. – Воронеж: ВГТА, 1997. – 16 с.
3. *Кокиева Г.Е.* Исследование аппарата для культивирования микроорганизмов / Г. Е. Кокиева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 123-125.
4. *Кокиева Г.Е.* Кормовые дрожжи как биологически активная добавка в кормлении сельскохозяйственных животных // Матер. регион. науч.- практ. конф. «Пищевые технологии, качество и безопасность продуктов». – Иркутск: Изд-во ИТУ, 2006 .
5. *Кокиева Г.Е.* Кормовые дрожжи как источник белка и витаминов // Матер. науч. конф. «Научный и инновационный потенциал Байкальского региона глазами молодежи».- Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2006.

05.02.00

Г.Е. Кокиева д-р техн. наук, Л.А. Дарбасова канд. педагог. наук, Н.Н. Неустроев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Якутская государственная сельскохозяйственная академия» в г.Якутск

КОНСТРУКТИВНАЯ ОСОБЕННОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГОСЯ УСТРОЙСТВА ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ И АКТИВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА КОРМОВОГО БЕЛКА

Интенсификация и активизация производства кормового белка микробным синтезом зависит от коэффициента массоотдачи в жидкой фазе и зависит от скорости перемешивания питательной среды и условий протекания аэрирования культуральной жидкости. Конструирование крайне необходимо при расчете ферментаторов с механическим перемешивающим устройством.

Ключевые слова: *ферментационная жидкость, процесс перемешивания, механическое перемешивание, конструктивная особенность оборудования.*

На процесс культивирования микроорганизмов большое влияние оказывает процесс перемешивания ферментационной жидкости. Проведён многочисленный ряд исследований по гидродинамическому и массообменному процессу, но в основном присутствует отсутствие работ по исследованию влияния числа ярусов мешалок перемешивающих устройств и количества ярусов установленных на валу [1,4,5]. Количество кислорода, переходящего в культуральную жидкость, можно определить по зависимости, предложенной Кутателидзе С.С.:

$$dO=K_1(O_{\text{раб}} - O_{\text{рав}})dFD\tau, \quad (1)$$

где O - количество кислорода, переходящего из воздушного потока в культуральную среду, кг;

K_1 - коэффициент масопередачи при абсорбции кислорода, кг O_2 / $M^2\text{ч}$ (кг O_2 m^{-3});

$O_{\text{раб}}$ и $O_{\text{рав}}$ - рабочая и равновесная концентрация кислорода в культуральной среде, кг $O_2 m^{-3}$;

F - поверхность контакта фаз, m^2 ;

τ - время абсорбции, ч.

Однако, в этой формуле не учтено физическое состояние жидкости, в частности, плотность и давление.

Согласно утверждению Лойцянского Л.Г. /91/ скорость распространения возмущения в газе только от давления смеси и ее плотности, т.е.:

$$a=\sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (2)$$

Гораздо сложнее описание явления проникновения кислорода в клетку в неоднородной гетерогенной среды, как питательные смеси. К тому же в питательной смеси на всем протяжении культивирования ведется постоянный барботаж.

Для описания процесса проникновения кислорода в клетку введем обозначения α и $(1 - \alpha)$, чтобы выделить объемные концентрации газа и жидкости.

Плотности газожидкостной смеси, газа и жидкости по отдельности обозначим через ρ , ρ_r и $\rho_{ж}$, а соответствующие им скорости через $a, a_r, a_{ж}$.

Плотность смеси определится как сумма плотностей газа и жидкости в соответствующих единицах объема, т.е.:

$$\rho_r=\text{const}\frac{(1-\alpha)}{\alpha}\rho_{ж} \quad (3)$$

Примем, что пузырьки газа полностью увлекаются жидкостью и что при этом давление в пузырьке P_r совпадает с давлением жидкости, а следовательно и смеси в соответствующей точке. Кроме того, будем считать, что температура в газовом пузырьке постоянна, а следовательно, давление P пропорционально плотности P_r , тогда :

$$P = \text{const} p_r = \text{const} \frac{(1-\alpha)}{\alpha} p_{ж} \quad (4)$$

Предполагая, что распространение малых возмущений в газожидкостной смеси происходит баротропно, возьмем от обеих частей (4) производную по P :

$$\frac{dp}{dp} = \alpha \frac{dp}{dp} + (1-\alpha) \frac{dp}{dp} + \frac{dp_{ж}}{dp} + (p_r - p_{ж}) \frac{dp}{dp} \quad (5)$$

Согласно (3) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dp} &= \frac{1}{a^2} \\ \frac{dp_r}{dp} &= \frac{1}{a^2 r} \\ \frac{dp_{ж}}{dp} &= \frac{1}{a^2 ж} \end{aligned} \quad (6)$$

Из уравнения (4) следует:

$$\frac{d\alpha}{dp} = - \frac{\alpha(1-\alpha)}{p} + \frac{\alpha(1-\alpha)}{p_{ж d_{ж}^2}} \quad (7)$$

Тогда будем иметь:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\alpha}{a^2 r} + \frac{(1-\alpha)}{a^2 ж} - \frac{\alpha(1-\alpha)p_r}{P} + \frac{\alpha(1-\alpha)p_r}{P_{ж d_{ж}^2}} + \frac{\alpha(1-\alpha)p_{ж}}{p} - \frac{\alpha(1-\alpha)}{a^2 ж} \quad (8)$$

В третьем слагаемом справа используем изотермичность сжатия газового пузырька и заменим P на $p_i d_{ж}^2$.

Тогда неравенство (8) запишемся в форме:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\alpha}{a^2} + \frac{(1-\alpha)}{a^2} \left(1 - \frac{p_2 a^2_{ж}}{p_{ж} a^2_{ж}} \right) + \frac{(1-\alpha)}{d^2_{ж}} - \frac{\alpha(1-\alpha)}{d^2_{ж}} + \frac{\alpha(1-\alpha) \cdot p_{ж}}{P} \quad (9)$$

Принимая во внимание, что:

$$p_r \ll p_{ж}, a_r \ll a_{ж} \text{ и } p_r d_{ж}^2 \ll P_{ж} d_{ж}^2, \quad (10)$$

Запишем следующую зависимость:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\alpha^2}{a^2} + \frac{(1-\alpha)^2}{d^2_{ж}} + \frac{\alpha(1-\alpha) \cdot p_{ж}}{P} \quad (11)$$

Влияние конструктивных особенностей перемешивающегося устройства на прирост биомассы продукции кормового белка. На рис 1. изображено распределение газовой фазы для аппаратов с одним и тремя перемешивающими устройствами.



Рисунок 1. Распределение газовой фазы для аппаратов с механическим перемешиванием
 - первый ряд- модель с одним перемешивающим устройством;
 - второй ряд- модель с тремя перемешивающими устройствами во всех зонах перемешивания.

На рис 2. изображено распределение фазы по рабочему объёму ферментаторов механическим перемешивающим устройством[1,2]. Основными характеристиками является газосодержание, скорости жидкой и газовой фаз, кратность и скорость циркуляции, мощность энергии, которая затрачивается на перемешивание на культивируемой среды тремя перемешивающими устройствами. Основными конструктивными элементами данных аппаратов для культивирования являются системы перемешивания культуральной среды и газораспределения по всему объёму аппарата. Искусственно созданный гидродинамический режим в аппарате для культивирования микроорганизмов оказывает влияние на скорость протекание всех реакции, которые происходят в процессе культивирования микроорганизмов [1,3,5].

Характер распределения газовой фазы по рабочему объёму аппарата для культивирования микроорганизмов позволяет существенно проводить сравнительную оценку систем газораспределения в аппарате позволяет проводить сравнительную оценку систем газораспределения в аппарате для культивирования микроорганизмов.

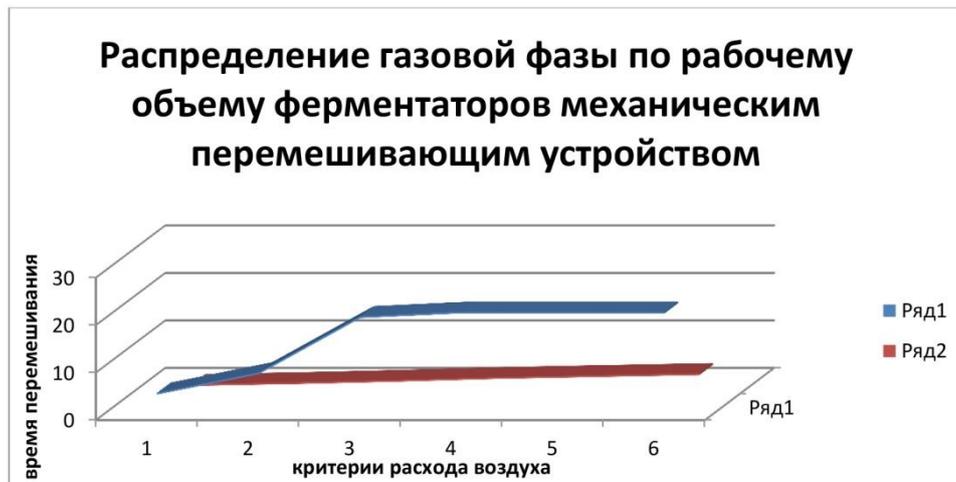


Рисунок 2. Распределение газовой фазы по рабочему объёму ферментатора при $v_p = 7 \text{ м}^3$,

$$v_v = 25 / \text{м}^3 \text{с}, n_p = 3.7 \text{ кВтм}^3$$

- первый ряд- модель с одним перемешивающим устройством;

- второй ряд- модель с тремя перемешивающимися устройствами во всех зонах перемешивания;

Концентрация кислорода в культуральную жидкость в отходящем из ферментатора воздухе составляет 18... 20%. На данный момент немаловажное место занимают газлифтные ферментаторы.

Список литературы

1. Батищев А.Н. Методологические основы обоснования рационального способа восстановления деталей // Механизация и электрификация сельского хозяйства.-1992.-№ 9.- с.30-31.
2. Кокиева Г.Е. Дрожжерастильный аппарат для выращивания микроорганизмов // Матер. науч. конф. «Научный и инновационный потенциал Байкальского региона глазами молодежи». - Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2006 г.
3. Кокиева Г.Е. Использование кормовых дрожжей как биологически активной добавки в комбикормах // Матер. Всерос. Науч. – практ. конф. с международным участием. - Улан-Удэ: Изд-во БО САН, 2004 г.
4. Кокиева Г.Е. Кормовые дрожжи как биологически активная добавка в кормлении сельскохозяйственных животных // Матер. регион. науч.- практ. конф. «Пищевые технологии, качество и безопасность продуктов». – Иркутск: Изд-во ИТУ, 2006 .
5. Кокиева Г.Е. Кормовые дрожжи как источник белка и витаминов // Матер. науч. конф. «Научный и инновационный потенциал Байкальского региона глазами молодежи».- Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2006.

05.02.00

Г.Е. Кокиева д-р техн. наук, И.А. Савватеева, Т.Г. Дмитриева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Якутская государственная сельскохозяйственная академия» в г.Якутск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АППАРАТА ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ С ПОДВОДОМ КИСЛОРОДА, СОДЕРЖАЩИМ МЕХАНИЧЕСКОЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

Кормовые дрожжи применяют и используют в качестве кормового средства не только в случае изменения их свойств, но и в связи с нарушением технологии производства или превышением сроков их хранения. При этом визуальные и биохимические характеристики таких дрожжей должны оставаться на уровне стандартов, характерных для кормовых дрожжей.

Ключевые слова: *культивирование микроорганизмов, ферментатор, продуцент кормового белка, дрожжевая клетка, конструктивная особенность оборудования.*

Процесс культивирования микроорганизмов пищевой, химической и фармакологической промышленности проходит в ферментаторах.

На данный момент ведутся большие работы по получению кормового белка на различных сырьевых базах, идет большое использование известных на данный момент штаммов - продуцентов кормовых дрожжей, чаще всего используют микроскопические грибы рода: *Candida*, *Saccharomyces*, *Hansenula*, *Torulopsis*. Можно выделить, что для практического использования применяется несколько другая классификация кормовых дрожжей в зависимости от среды на которой выращивали дрожжевую клетку.

В связи с этим различают гидролизные, классические кормовые и дрожжи БВК (белково-витаминный концентрат). На данное время идет производство кормового белка по разным направлениям, которые основаны не только на выборе не только сырья, но и выборе конструктивной особенности оборудования. Производство не только кормового белка, но и производство фармакологической продукции в связи с максимальной скоростью прогресса микробиологического синтеза и высоким качеством его продуктов объясняется то, что за последние годы производство кормовых дрожжей, кормовых и ветеринарных антибиотиков увеличилось во много раз, ферментных препаратов в несколько раз, освоено производство ряда других продуктов. В свою очередь увеличилось разнообразие конструктивной особенности ферментаторов. На рис.1 представлена структурная схема аппарата для культивирования микроорганизма.

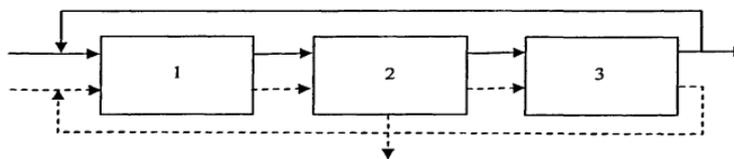


Рисунок 1. Структурная схема аппарата для культивирования микроорганизма

Зона 1 - зона мешалки. Эта зона характеризуется интенсивной массо передачей.

Зона 2 - зона охлаждения, включающая объем биореактора, в котором находится пластинчатый теплообменник. В этой зоне наряду с массо передачей и биосинтезом происходит охлаждение среды.

Зона 3 - циркуляционная зона. В этой зоне уменьшается газо содержание среды и интенсивность массо передачи.

Производство кормового белка преследует основную цель, которая состоит в получении белка наполненного богатым содержанием витаминов, набором макро – и макроэлементами. В свою очередь помимо перечисленных элементов в кормовом белке, полученным микробным синтезом содержится большое количество углеводов, витаминов, нуклеиновых кислот. Не все перечисленные полезные на первый взгляд вещества оказывают благоприятное воздействие на рост биомассу кормового белка при употреблении в пищу человека или животных. Перечисленные выше элементы перед употреблением в пищу должны проходить специальную обработку. Основу для выбора гидродинамической модели (идеального смещения, идеального вытеснения, диффузионной, ячеечной, комбинированной и т.д.) составляют числовые характеристики распределения элементов потока по времени пребывания или функции распределения. Идеализированные модели гидродинамической структуры потоков имеют ограниченное применение (модельные опыты в лабораторных аппаратах, камеральные установки малого объема).

Наличие эффектов турбулентной и молекулярной диффузии приводит к необходимости учитывать неравномерность распределения элементов жидкости по времени пребывания. Это учет осуществляется использованием диффузионной модели, одним из параметров которой является коэффициент турбулентной диффузии. Диффузионная модель (однопараметрическая) может быть успешно применена для расчета микробиологических аппаратов колонного типа (полых, барботажных). Уравнение модели имеет вид:

$$\frac{dc}{dt} = -u \frac{dc}{dz} + D_L \frac{d^2c}{dz^2} \quad (1)$$

где C – концентрация компонента, кмоль/м³; D_L – коэффициент турбулентной (эффективной) диффузии; u – скорость потока, м/с. При этом общая схема движения жидкости может рассматриваться как настоящая из прямого и обратного потоков.

По существу диффузионная модель и учитывает этот обратный поток и его влияние на характер распределения элементов по времени пребывания. Тем не менее для барботажных секционированных аппаратов оценку распределения по времени пребывания удобно осуществлять с использованием ячеечной модели с обратными потоками. Обычно число ячеек для такого аппарата принимается равным числу физических секций N .

Скорость потребления i -го компонента питательной среды клетками зависит от стехиометрического коэффициента α^i , удельной скорости роста микроорганизмов μ и концентрации клеток в единице X_i :

$$R(C_i) = \alpha^i \mu X_i \quad (2)$$

Так, скорость потребления кислорода в процессе непрерывного культивирования биомассы микроорганизмов может составлять: для дрожжей растущих на углеродных субстратах, $\sim 3 - 6$ кг/(м³/ч).

Теплообменные процессы при культивировании микроорганизмов непосредственно связаны с кинетикой утилизации субстрата микробными клетками и скоростью образования биомассы. Общий тепловой баланс процесса ферментации в биореакторе может быть записан в виде:

$$Q_b + Q_m + \sum Q_{ex} = Q_T + Q_{ак} + Q_{исп} + Q_{вых} + Q_n \quad (3)$$

где Q_b – тепло биохимического превращения; Q_m – тепло, выделяемое при механическом перемешивании среды; $\sum Q_{ex}$ – суммарное тепло, приносимое аэрируемым газом и технологическом потоками; Q_T – тепло, отводимое (подводимое) через теплообменные устройства; $Q_{ак}$ – аккумулированное тепло в системе; $Q_{исп}$ – тепло, теряемое при испарении; $Q_{вых}$ – тепло, отводимое с технологическими потоками; Q_n – тепловые потери.

Технологические и микробиологические условия не зависят от конструкции ферментатора и, следовательно, при его проектировании конструкторы в первую очередь несут ответственность за достижение в аппарате заданных условия по интенсивности перемешивания, массообмена и теплообмена, которые определяются правильностью расчета основных конструктивных элементов и режимов работы ферментатора.

Список литературы

1. *Батищев А.Н.* Методологические основы обоснования рационального способа восстановления деталей // *Механизация и электрификация сельского хозяйства.*-1992.-№ 9.-с.30-31.
2. *Безрядина Г.Н.* Синтез алгоритмов управления в условиях конкурентного взаимодействия популяций микроорганизмов: (На прим. дрожжевого производства). Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.16, 05.13.07. – Воронеж: ВГТА, 1997. – 16 с.
3. *Кокиева, Г.Е.* Исследование аппарата для культивирования микроорганизмов / Г. Е. Кокиева // *Научно-технический вестник Поволжья.* – 2014. – № 4. – С. 123-125.
4. *Кокиева Г.Е.* Кормовые дрожжи как биологически активная добавка в кормлении сельскохозяйственных животных // Матер. регион. науч.- практ. конф. «Пищевые технологии, качество и безопасность продуктов». – Иркутск: Изд-во ИТУ, 2006 .
5. *Кокиева Г.Е.* Кормовые дрожжи как источник белка и витаминов // Матер. науч. конф. «Научный и инновационный потенциал Байкальского региона глазами молодежи».- Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2006.

05.02.02

С.Л. Марулин, А.П. Буйносов д-р техн. наук

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, Ogurci-15@mail.ru, byinosov@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Приведены результаты моделирования упрочнения деталей локомотивов при термической обработке с применением сканирующего теплового неподвижного источника. Результаты расчета использованы при разработке технологий упрочнения деталей при нагреве плазменной дугой в азоте, в том числе гребней бандажей колесных пар локомотивов.

Ключевые слова: локомотив, деталь, обработка, упрочнение, термический, моделирование, результаты.

В настоящее время в Российской Федерации твердость рельсов на железнодорожных магистралях общего пользования составляет 400–450 НВ, а твердость бандажей колесных пар локомотивов – 275–315 НВ. Для приведения в соответствие твердости железнодорожного колеса и рельса, в депо и на заводах широкое распространение получили новые технологии поверхностного упрочнения деталей и узлов механической части локомотивов, в том числе магнито- и газоплазменными мощными источниками энергии (МПУ). Плазменная дуга на железнодорожном транспорте широко используется для упрочнения гребневой части бандажей колесных пар локомотивов [1]. Кроме того, детали механической части локомотивов имеют низкий жизненный цикл.

Нами накоплен большой опыт МПУ [1, 2], но до сих пор отсутствует математической модель упрочнения стали при термической обработке с применением быстродвижущегося или импульсного сканирующего теплового неподвижного источника. Ее создание позволит снизить затраты на проведение сложных и затратных дополнительных экспериментов и разработку соответствующей технологии, которая либо не существует, либо она не унифицирована.

Для расчета температурных полей можно использовать уравнение [3] при нагреве полубесконечного тела для мгновенного источника:

$$T = \frac{Q}{c\gamma \cdot \sqrt{\pi a t}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4at}}, \quad (1)$$

где T – температура; Q – плотность энергии; c – удельная теплоемкость; γ – плотность стали; a – коэффициент температуропроводности тела; t – время процесса распространения тепла; z – глубина от поверхности тела.

При упрочнении различных деталей механической части локомотивов плазменной дугой ($K = 1,4$ см/с; $\delta = 2,8$ см; $a = 0,08$ см²/с [4, 5]) выполняется условие $K \cdot \delta / 4 a = 12,25$, поэтому можно использовать решение уравнения (1). Это же решение можно применять и для более глубоких слоев, так как, например, для колесных пар, толщина упрочненного слоя (2 мм) мала по сравнению с толщиной гребня (max – 33 и min – 25–28 мм).

Как показывают результаты эксперимента, выполненного авторами в АО «Шадринский автоагрегатный завод», при частоте электромагнитных колебаний 50 Гц температурное поле является стационарным и не зависит от частоты, а тепловой поток можно принять постоянным и равномерно распределенным по всей ширине обрабатываемого участка. Так как при нагреве массивного тела потери тепла в окружающую среду составляют около 1 % [1], то ими можно пренебречь.

Обозначим тепловой поток как $q = \eta \cdot N/S$, а время действия теплового источника как t_0 , где η – коэффициент полезного действия источника; N – мощность источника; S – нагреваемая площадь.

Для плазменной дуги с электромагнитными колебаниями, движущейся со скоростью V , $N = U \cdot I$, (U – напряжение, I – ток дуги), $S = b \cdot d$ (b – ширина колебаний дуги, d – эффективный диаметр дуги), $t_0 = d/V$.

Во время действия источника нагрева, обеспечивающего тепловой поток q , в момент времени t за период dt' выделится энергия $dQ = q \cdot dt'$ (рис. 1).

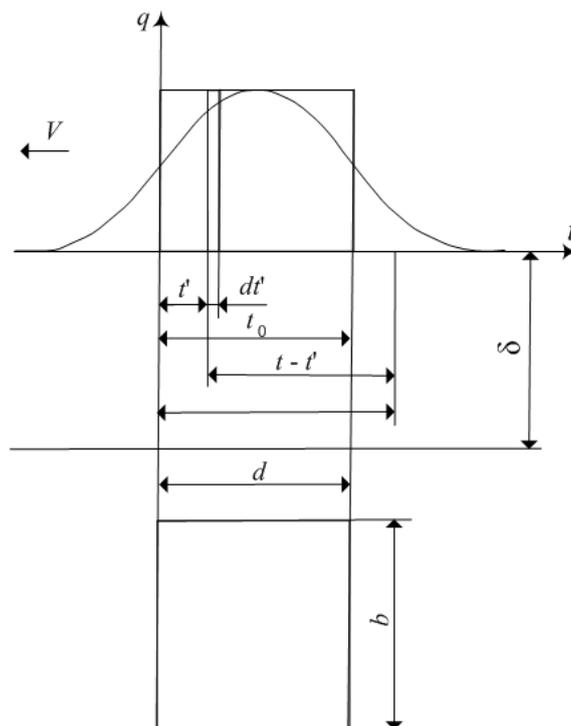


Рис. 1. Схема нагрева нормально распределенным источником, приведенным к равномерно распределенному

Подставив dQ в (1), получим уравнение для приращения температуры

$$dT = \frac{q \cdot dt'}{c\gamma\sqrt{\pi a} \cdot (t-t')} e^{-\frac{z^2}{4a(t-t')}},$$

или

$$T - T_0 = \frac{q}{c\gamma\sqrt{\pi a}} \int_0^B \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4a(t-t')}} \quad (2)$$

где $B = t$ при $t < t_0$ и $B = t_0$ при $t \geq t_0$; T_0 – исходная температура или температура предварительного подогрева; t' – время от начала нагрева.

Очевидно, что максимальная температура достигается на самой поверхности (при $z = 0$) в момент окончания действия источника $t = t_0$. Ее легко получить, интегрируя (2):

$$T_m - T_0 = \frac{2q}{c\gamma} \cdot \sqrt{\frac{t_0}{\pi a}} \quad (3)$$

Для упрощения введем безразмерные относительные параметры: время $\tau = t/t_0$; время действия источника $\tau' = t'/t_0$; глубина $Z = z/(4 < a \cdot t_0)^{1/2}$; температура $\theta = (T - T_0)/(T_m - T_0)$. Выражение (2) примет вид:

$$\theta = \frac{1}{2} \int_0^B \frac{d\tau'}{\sqrt{\tau - \tau'}} e^{-\frac{Z^2}{\tau - \tau'}} \quad (4)$$

где $B = \tau$ при $\tau < 1$ и $B = 1$ при $\tau \geq 1$.

Для поверхности $Z = 0$ интеграл (4) выражается в конечном виде:

$$\theta = \sqrt{\tau} - \sqrt{\tau - 1} \tag{5}$$

и

$$\theta = \sqrt{\tau} \text{ для } \tau < 1. \tag{6}$$

Выражения (4), (5) и (6) имеют одинаковый вид как для неподвижного импульсного, так и для непрерывного быстродвижущегося источников.

Результаты расчетов по уравнениям (4), (5) и (6) представлены на рис. 2.

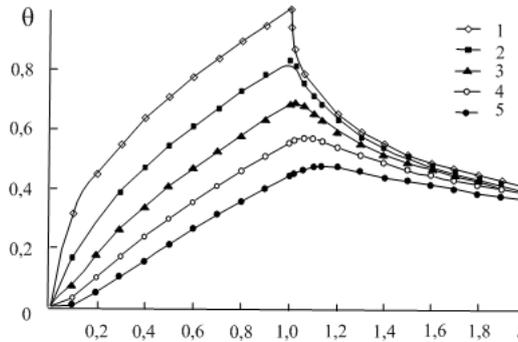


Рис. 2. Зависимость от относительного времени (τ) относительной температуры (θ)

Необходимо отметить, что для быстродвижущегося источника время удобнее отсчитывать не с начала его действия, а с его окончания, когда температура на поверхности достигнет максимума. Изменение координаты времени не повлияет на результаты вычислений, так как они выполняются на кривой охлаждения [1]. Относительную температуру, которую описывают уравнения (4) и (5), в новой системе координат можно записать как:

$$\theta = \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{dt'}{\sqrt{\tau + \tau'}} \cdot e^{-\frac{z^2}{\tau + \tau'}}, \tag{7}$$

– для точек на определенной глубине детали (тела), и

$$\theta = \sqrt{\tau + 1} - \sqrt{\tau}, \tag{8}$$

$$\tau = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\theta} - \theta \right)^2 \tag{9}$$

– для точек на самой поверхности детали (тела).

Для определения времени в прежней системе координат нужно к определяемому относительному времени прибавить единицу.

Для процессов упрочнения детали локомотива большое значение имеет время нахождения металла в аустенитном состоянии t_a [2], которое для точек на поверхности можно вычислить как

$$\tau_a = \frac{t_a}{t_0} = \frac{1}{4} \cdot \left(2 + \frac{1}{\theta_a^2} - 3 \cdot \theta_a^2 \right). \tag{10}$$

В уравнении (10) относительная температура $\theta = (T_a - T_0)/(T_m - T_0)$. Как видно из уравнений (8), (9) и (10), рассчитать процесс нагрева поверхности при равномерно распределенном источнике не представляет трудностей.

В результате экспериментальных исследований авторами процесса плазменного упрочнения бандажей колесных пар локомотивов необходимо чтобы температура аустенизации должна быть не ниже 950 °С [1]. При $T_0 = 0$ °С, относительная температура будет $\theta_a = \theta_m = 950/T_m$.

Следовательно, упрочнение детали при термической обработке с применением быстродвижущегося или импульсного сканирующего теплового неподвижного источника нагрев, в основном, определяется двумя факторами: максимальная температура и время нагрева поверхности детали.

Так как время нагрева определяется как отношение диаметра источника нагрева к скорости перемещения самого источника, то для качественного выполнения процесса упрочнения требуется поддержка неизменными: 1) ток и напряжение дуги, которые влияют на эффективный диаметр источника нагрева; 2) постоянная скорость перемещения источника. Значение эффективного диаметра источника нагрева следует определить экспериментально.

Список литературы

1. *Буйносов А.П.* Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2009. 224 с.
2. *Буйносов А.П., Шепелева И.О.* Моделирование упрочнения стали бандажей при термообработке колесных пар электровозов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2015. № 2. С. 86-89.
3. *Буйносов А.П.* Выбор оптимального остаточного проката бандажей колесных пар магистральных электровозов // *Омский научный вестник. Серия Приборы, машины и технологии*, 2012. № 3 (113). С. 113-116.
4. *Марулин С.Л., Буйносов А.П.* Система гребнесмазывателей «твердого» типа для магистральных электровозов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 4. С. 36-38.
5. *Буйносов А.П.* Оценка эффективности снижения износа бандажей колесных пар электровозов, обточенных по различным профилям // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2010. № 12. С. 40-42.

05.02.01

¹В.И. Митряйкин д-р техн. наук, ¹Т.А. Зайцева,
²Р.М. Габсаттаров, ²А.А. Хабибуллин

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ВЫВИХА ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА С РАЗЛИЧНЫМИ ПАТОЛОГИЯМИ

Разработана методика определения плотности и пористости композиционных материалов и костных структур с использованием компьютерного томографа. Получены корреляционные зависимости для определения плотности через единицы НУ, которые позволяют определять механические характеристики импланта и костных структур в месте его установки. Разработана математическая модель для расчета системы “имплант-кость”. Проведена теоретико-экспериментальная оценка вывиха эндопротеза ТБС с учетом дисплазии и изменения прочностных характеристик биоматериалов.

Ключевые слова: биомеханика, тазобедренный сустав, контактное взаимодействие, математическое моделирование, эндопротезирование.

Важнейшими достижениями современной травматологии и ортопедии является создание и внедрение имплантов для укрепления или замены пораженных органов. Эндопротезирование тазобедренного сустава (ТБС) является одним из высокотехнологических оперативных вмешательств [1, 2]. Количество осложнений, сопровождающих эту операцию, остается достаточно высоким [1, 3]. В общей структуре осложнений наиболее частыми, тревожными и проблематичными для лечения являются вывихи эндопротеза [4], на рис.1 приведены примеры характерной потери несущей способности. Помимо этого существуют и иные сложные ортопедические операции [5-7] при моделировании которых важным фактором является оценка состояния костной ткани.

Важнейшей задачей для клинической практики является определение функциональных зависимостей между риском (вероятностью) вывиха эндопротеза и качеством костной ткани, прочностью эндопротеза и физической активностью пациента. Существуют различные факторы, влияющие на факторы риска при вывихе [8, 9].

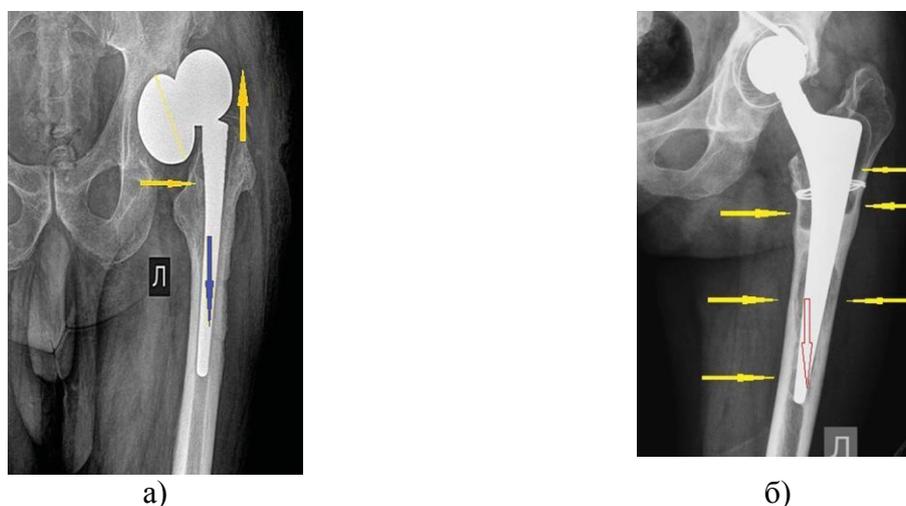


Рис.1. Рентгенограммы нестабильности эндопротезов

В настоящее время для оценки состояния костных структур применяется компьютерная томография (КТ). Она объединяет информативные достоинства рентгеновского излучения с последними достижениями науки и вычислительной техники, но ее применение для одновременного определения плотности композиционных материалов и костных структур находится на стадии разработки. Самым технологичным в настоящее время является процесс объемного (спирального) сканирования, который реализован в медицинских томографах последнего поколения [10, 11]. Толщина выделяемого среза и шаг перемещения стола с объектом подбирается таким образом, чтобы обеспечить наилучшее качество, получаемых данных. В работе для исследования структур материалов имплантатов и костных тканей использовался мультиспиральный компьютерный томограф Brilliance 64 Philips. Перед проведением измерений проводилась оценка чувствительности компьютерной томографической системы. Для этого использовались фантомы, которые обеспечивают измерение параметров качества изображения: проверка шкалы контрастности, пространственное разрешение, определение толщины среза, оценка разрешения при низкой контрастности, оценка шума и однородности. Компьютерный томограф (КТ) позволяет проводить измерение внутренних размеров с точностью до 0.5 мм., что важно при анализе износа элементов эндопротеза, например, полиэтиленового вкладыша.

Способность вещества поглощать рентгеновское и γ -излучение характеризуется коэффициентом ослабления μ (см^{-1}). В технике КТ принято измерять объемное ослабление не в абсолютных, а в относительных по отношению к ослаблению воды единицах, называемых числами Хаунсфильда (HU)

$$HU = 1000 \frac{\mu - \mu_{\text{воды}}}{\mu_{\text{воды}}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент ослабления исследуемого материала; $\mu_{\text{воды}}$ – коэффициент ослабления воды. В этой системе отсчета вода = 0 HU, воздух = -1000 HU. В отличие от биологических структур значения коэффициентов HU для композиционных материалов в литературе очень мало. Программное обеспечение КТ позволяет определять значение единиц HU в точке сечения образца, вдоль выбранного направления или найти среднее значение для выбранной площади.

Установление корреляционной зависимости между плотностью ρ и единицами HU для костных структур несколько отличается от методики для композиционных материалов, поскольку изготовить образцы и провести прямые измерения затруднительно. В работе предложено сравнивать значения HU для выбранного участка кости (Рис. 2) со значениями плотности полученными для этого участка методами денситометрии. Кроме этого использовались формулы, полученные другими авторами. Усредненные значения единиц HU для кортикальной кости составляют примерно 1500 HU. Слои губчатой ткани имеют значения 400-500 HU. С изменением значений плотности костных структур коэффициенты HU изменяются. В работе [12] показано, что данные HU и плотности связаны линейной зависимостью

$$\rho = A \cdot HU + 1000 \text{ (кг/м}^3\text{)} \quad (2)$$

где A-корректировочный коэффициент.

Предложено значение $A=0.523 \text{ кг/м}^3$, однако указано, что это значение необходимо уточнять. Еще одна формула предложена в патенте RU 2472440 С1.

Согласно закону Вольфа костная ткань формируется в местах локализации наибольших напряжений, в виду этого связывают оптическую плотность костной ткани с жесткостными, прочностными характеристиками костной ткани [12, 13].

$$\rho = a_{\rho} + b_{\rho} \cdot HU \quad (3)$$

$$E = a_E \rho^{b_E} \quad (4)$$

$$[\sigma] = a_{\sigma} \rho^{b_{\sigma}} \quad (5)$$

Далее в работе МКЭ решалась задача определения критических нагрузок вывиха эндопротеза ТБС у пациентов с наличием дисплазии и снижением прочностных характеристик костных структур. Для этого была разработана численная реализация контактного взаимодействия для конечно-элементной модели, были проведены численные исследования влияния степени недопокрытия вертлужного компонента на несущую способность имплантата и определение критической силы для различных значений модуля упругости кости.

На (рис.3) представлена базовая расчетная схема исследуемой системы: S_I – поверхность имплантата (дуга AD - чашка вертлужного компонента, дуга A_1D_1 - головка вертлужного компонента), S_p – полная поверхность бедренной кости, $S_p \cap S_I$ – поверхность контакта кости с имплантатом (дуга BD), $S_I \setminus (S_p \cap S_I)$ - область недопокрытия (дуга AB), O - центр головки вертлужного компонента, N – реакция бедренного компонента эндопротеза, EF - направление ножки бедренного компонента,



Рис.2. Томограмма ТБС и значения HU

θ - угол наклона шейки бедренного компонента, S_f – поверхность со статическими граничными условиями, S_k – поверхность кинематическими граничными условиями.

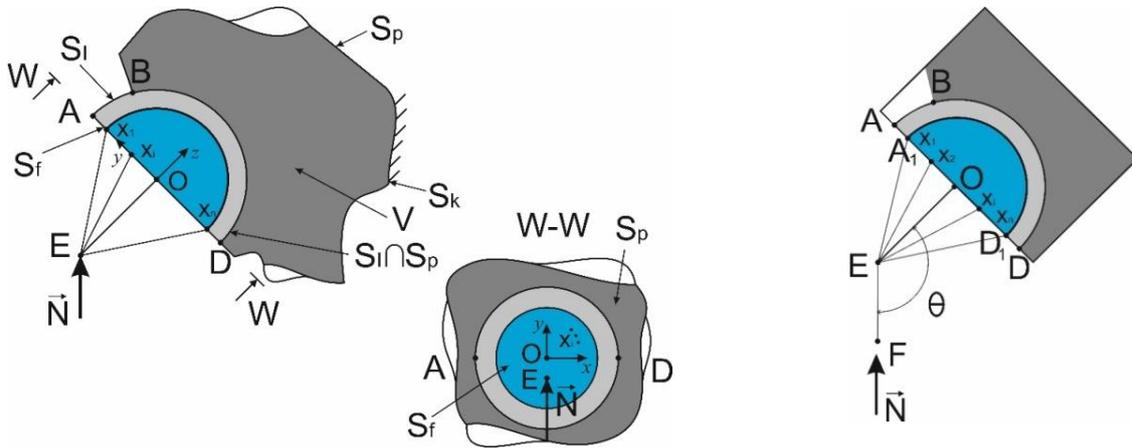


Рис.3. Расчётная схема

Механическое поведение системы, занимающей область V в R^3 с границей S , в рамках линейной теории упругости описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \tilde{\sigma} &= 0, \quad \forall x \in V, \\ \tilde{\varepsilon} &= \frac{1}{2}(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T), \quad \forall x \in \vec{V}, \\ \tilde{\sigma} &= \tilde{E} : \tilde{\varepsilon}, \quad \forall x \in \vec{V}, \\ \vec{u} &= 0, \quad \forall x \in S_k, \\ \vec{R}(\vec{X}_i), i &= \overline{1, n}, \quad \forall x \in S_f. \end{aligned} \tag{6}$$

где $\vec{V} = V \cup S$, $S = S_k \cup S_f$, \vec{u} – вектор перемещений, $\vec{\sigma}$ – тензор напряжений; $\vec{\varepsilon}$ – тензор упругих деформаций; \vec{r}_p^0, \vec{u}_p – начальное положение и перемещение точек кости, \vec{r}_1^0, \vec{u}_1 – начальное положение и перемещение точек имплантата, \vec{E} – тензор упругих свойств, S_f – поверхность со статическими граничными условиями, S_k – поверхность кинематическими граничными условиями. Для точек, вошедших в контакт, выполняется условие (7). На поверхности контакта тела взаимодействуют друг с другом, что приводит к возникновению нормального давления (8) и сил трения (9).

$$(\vec{r}_p^0 - \vec{r}_1^0) \cdot \vec{n} = (\vec{u}_p - \vec{u}_1) \cdot \vec{n}, \quad \forall x \in S_p \cap S_l \quad (7)$$

$$\vec{t}_n = -t_n \vec{n}, t_n > 0 \quad \forall x \in S_p \cap S_l \quad (8)$$

$$|t_t| - t_n f \leq 0 \quad \forall x \in S_p \cap S_l \quad (9)$$

Алгоритм реализации МКЭ основан на шаговом во времени поиске нового решения на основании начальных и граничных условий. Ввиду сложности геометрии реализация задачи определения НДС ТБС реализовывалась в МКЭ в пакете Siemens NX/Nastran. Трехмерный элемент объемного НДС с восьмью узлами используется для трехмерного (3D) моделирования объемных конструкций. Для проведения численных исследований была построена трехмерная модель тазобедренного сустава, а также ацетабулярного компонента. В расчетах использовался четырех узловой тетраэдральный конечный элемент с линейной аппроксимацией. Ацетабулярный компонент моделировался как двухкомпонентный объект, внешняя чашка титановая ($E = 112$ ГПа, $\nu = 0.3$), внутренняя чашка керамическая ($E = 102$ ГПа, $\nu = 0.26$, где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона). Первоначально были заданы характеристики кости $E = 6$ ГПа, $\nu = 0.3$, что соответствует плотности кости здорового человека возраста 30 лет. Затем эти значения уменьшались. Коэффициент трения между костной тканью и имплантатом принимался равным 0.95, между титановым и керамическим компонентами задавалось условие прилипания. Диаметр титановой чашки брался на 4 мм больше диаметра вертлужной впадины, проводились расчеты для чашек диаметром 52, 54, 56 мм. Дисплазия вертлужной впадины моделировалась сферическом вырезом. По стандарту ISO 7206-8, ГОСТ Р 52640 для расчетов первоначально было принято значение нагрузки – 3300 Н. Полученные результаты приведены на рис. 4.

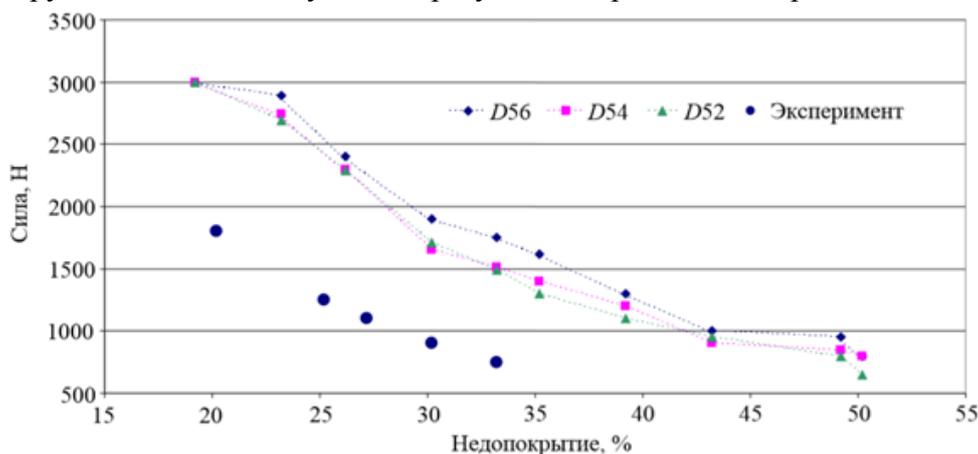


Рис. 4. Результаты расчетов критического усилия для чашки вертлужного компонента разного диаметра.

Для подтверждения полученных результатов был спланирован и проведен эксперимент. Испытания проводились на универсальной машине УТС 110М-100, с использованием разработанного автором устройства (Патент РФ №169201). В экспериментах использовались модели тазобедренных суставов на базе костей Large Left Hemi Pelvis фирмы Sawbones. В процессе проведения экспериментов был изучен механизм потери несущей способности вертлужного компонента [1, 3]. Эксперимент позволил определить допустимые величины степени недопокрытия вертлужного компонента, при которых под действием статической

нагрузки возможно функционирование протезируемого сустава. Также было оценено влияние винтовой фиксации на несущую способность импланта [1, 3, 9]. Сравнение результатов расчета и эксперимента приведено на рис. 4. Расчетные величины критической силы превышают данные эксперимента. Указанное отличие можно объяснить применяемым критерием потери несущей способности, в экспериментах было отмечено, что после первой (локальной) потери несущей способности чашка под действием внешних сил занимает новое положение и окончательная потеря несущей способности происходит уже для этого положения. На основании теоретико-экспериментальных исследований сформулированы рекомендации для проведения операции эндопротезирования при дисплазии вертлужной впадины: при степени недопокрытия до 20% имплант сохраняет несущую способность, до 35% - рекомендуется винтовая фиксация вертлужного компонента, свыше 35% - не гарантируется надежная стабилизация вертлужного компонента. Результаты расчета критической нагрузки для пациентов с меньшими значениями модуля упругости кости (коэффициента недопокрытия 30%) приведены в таблице 1.

Таблица 1.

E(МПа)	6000	4800	4500	4320
F (Н)	1900	1520	1425	1368

При снижении модуля упругости на 28%, нагрузка уменьшается на такую же величину. Результаты проведенной работы позволяют быть более свободным в выборе хирургической тактики при имплантации вертлужного компонента и судить о влиянии степени снижения прочностных характеристик кости на механическую стабильность эндопротеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-08-00416, №18-41-160025

Список литературы

1. Тихилов Р.М., Шубняков И.И., Мазуренко А.В., Митряйкин В.И., Саченков О.А., Кузин А.К., Денисов А.О., Плиев Д.Г., Бояров А.А., Коваленко А.Н. Экспериментальное обоснование установки ацетабулярного компонента с недопокрытием при эндопротезировании пациентов с тяжелой степенью дисплазии // Травматология и ортопедия России. 2013. № 4 (70). С. 42-51.
2. Закиров Р.Х., Зарипов Р.А., Коноплев Ю.Г., Митряйкин В.И., Саченков О.А. Диагностика асептического некроза головки бедренной кости с использованием спиральной компьютерной и магнитно-резонансной томографии и применение математического моделирования при планировании операции по эндопротезированию тазобедренного сустава // Практическая медицина. 2012. № 8-2 (64). С. 63-68.
3. Коноплев Ю.Г., Мазуренко А.В., Митряйкин В.И., Саченков О.А., Тихилов Р.М. Экспериментальное исследование влияния степени недопокрытия вертлужного компонента на несущую способность эндопротеза // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18. № 3. С. 333-344.
4. Зайцева Т.А., Коноплев Ю.Г., Митряйкин В.И., Саченков О.А. Математическое моделирование вывиха имплантата в тазобедренном суставе // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 1. С. 99-102.
5. Андреев П.С., Коноплев Ю.Г., Саченков О.А., Хасанов Р.Ф., Яшина И.В. Математическое моделирование ротационной флексионной остеотомии // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 18-21.
6. Хасанов Р.Ф., Андреев А.П., Скворцов А.П., Саченков О.А., Яшина И.В. Биомеханическое обоснование хирургического лечения болезни Легг - Кальве - Пертеса // Практическая медицина. 2015. № 4-1 (89). С. 200-203.
7. Саченков О.А., Хасанов Р.Ф., Андреев П.С., Коноплев Ю.Г. Численное исследование напряженно-деформированного состояния тазобедренного сустава при ротационной остеотомии проксимального участка бедренной кости // Российский журнал биомеханики. 2016. Т. 20. № 3. С. 257-271.

8. Коноплев Ю.Г., Мазуренко А.В., Саченков О.А., Тихилов Р.М. Численное исследование влияния степени недопокрытия вертлужного компонента на несущую способность эндопротеза тазобедренного сустава // Российский журнал биомеханики. 2015. Т. 19. № 4. С. 330-343.
9. Большаков П.В., Тихилов Р.М., Мазуренко А.В., Коноплев Ю.Г., Пряжевский Р.Д., Саченков О.А. Численное исследование влияния степени недопокрытия вертлужного компонента, подкрепленного винтом, на несущую способность эндопротеза тазобедренного сустава // Российский журнал биомеханики. 2018. Т. 22, № 1. 19–30
10. Коноплев Ю.Г., Митряйкин В.И., Саченков О.А. Применение математического моделирования при планировании операции по эндопротезированию тазобедренного сустава // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2011. Т. 153. № 4. С. 76-83.
11. Митряйкина Е.В., Зайцева Т.А. Внедрение спиральной компьютерной томографии для определения механических характеристик материала путем исследования его внутренней структуры // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 311-315.
12. Madi K., Fufort G., Gasser A., Forest S. Prediction of the elastic modulus of the trabecular bone based on X-ray computed tomography // 6th World Congress of Biomechanics-2010. pp.800-803.
13. Акулич Ю.В., Акулич А.Ю., Денисов А.С. Предоперационное определение индивидуальных физических характеристик губчатой костной ткани проксимального отдела бедра человека // Российский журнал биомеханики. 2011. Т.15. №1(51). С. 33-41.
14. Саченков О.А., Митряйкин В.И., Лустин А.Д., Мазуренко А.В., Коноплев Ю.Г. Исследование и решение контактной задачи при эндопротезировании. Всероссийская научная конференция “Обратные краевые задачи и их приложения”, посвященной 100-летию со дня рождения проф.М.Т.Нуждина. г.Казань,

05.02.08

П.М. Салов д-р техн. наук, Д.П. Салова канд. техн. наук,
Т.Г. Виноградова канд. техн. наук, С.В. Солин, А.Н. Егоров, И.С. Васильев,
А.Ю. Орлов, С.Р. Васильев, Д.А. Коновалов, А.М. Сидельников, В.В. Филиппов

Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета,
факультет строительных и транспортных технологий,
кафедра транспортно-технологических машин,
Чебоксары, tavin2008@mail.ru

НАГРЕВАНИЕ И ОСТЫВАНИЕ ЗАГОТОВОК ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В работе рассмотрены условия относительно продолжительного шлифования, при которых возможен прогрев заготовок до температур, приводящих к ухудшению технологической наследственности деталей и снижению эффективности процессов

Ключевые слова: нагревание заготовок, длительность процесса, нестабильность процессов, увеличенные припуски, снижение прочности стыков

При внутреннем круглом и планетарном шлифовании глубоких отверстий, тонкостенных гильз, ажурных тонкостенных валов, запрессованных вклеенных втулок ограничена температура прогрева всего объема заготовок. Нагревание происходит из-за высокой продолжительности процесса. Для ее снижения необходимо уменьшать припуск под обработку, увеличивать работоспособность инструмента, снижать долю и количества тепла, поступающего в заготовку. Решение поставленных задач возможно при комплексном подходе. Во-первых, в условиях ограниченной жесткости технологических систем (ТС), необходима работа не цилиндрическими, а конусообразными кругами [1, 2]. Во-вторых, необходим теплофизический анализ проблемы. Более подробно об оптимизации процесса по одному из важнейших факторов: производительности, геометрической точности, экономичности, качества поверхности даны в работах [1-5]. Главные условия оптимизации – круг должен работать всей поверхностью.

Для выявления условий, приводящих к недопустимому перегреву втулок, воспользуемся решениями [2-5].

Для определения температур нагревания и остывания тепловой баланс в работах [2-5] определялся решением задач по контакту двух быстро вращающихся цилиндров. Полученная система уравнений содержит постоянные A_1 и A_2 , и «переменные» составляющие B_1 и B_2 температурного поля. Индекс 1 относится к кругу, пропитанному смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ), 2 – заготовке. «Постоянные» составляющие – это накопленное тепло. Для режима квазистаблизации процесса получены асимптотические представления, которые существенно упрощают расчеты [2-6].

Вначале решается задача о распределении температуры от полосового источника (см. рис.1).

В асимптотическом представлении, процесс принимается квазистационарным, когда накопленные температуры тел $A_1 = \text{const}$, $A_2 = \text{const}$, а эпюры теплового напряжения B_1 и B_2 от полосового источника также квазистационарны. Постоянные (накопленные) составляющие температур тел A_1 и A_2 определяются через коэффициенты форм тел L_{01} и L_{02} [2-6].

Исследования [1] показывают, что деталь быстро прогревается при нагреве СОЖ до 25-30 °С. Следовательно, при шлифовании ответственных деталей сложной формы, теплопоглощение СОЖ должно быть интенсивным, ее температура должна быть на 2-5 °С меньше, чем температура, при которой должна контролироваться деталь.

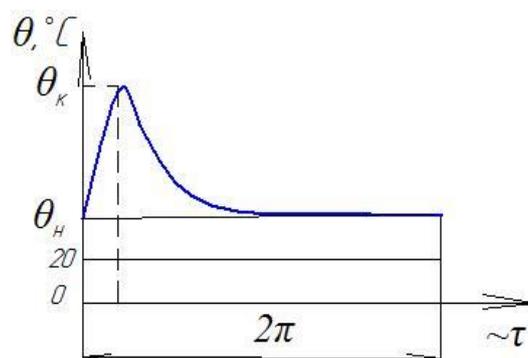
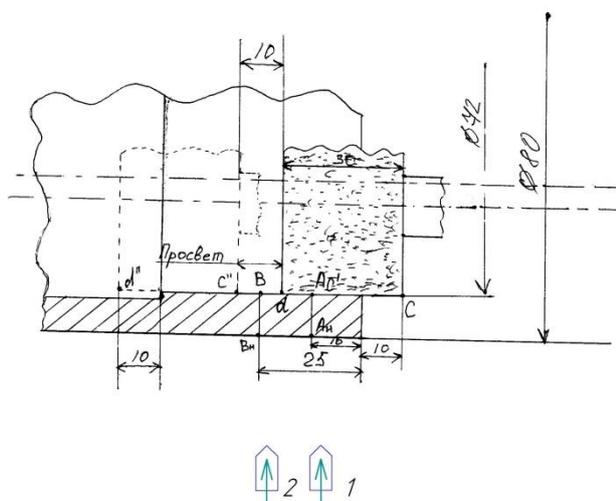


Рис. 1 - Изменение температуры поверхности заготовки за оборот в квазистационарном процессе: 20°C – температура СОЖ; Θ_n – накопленная температура в объеме заготовки, $\Theta_n = A_2$; l – ширина полосового источника тепла; Θ_k – максимальная контактная температура в зоне резания; τ - время

Постоянная составляющая температурного поля зависит от отношения длины шлифуемой поверхности к высоте круга. Из зон реверсирования, где возникает относительно большой прогрев заготовки, тепло «перетекает» в ее срединную часть вслед за кругом. При этом все неконтактные поверхности заготовки продолжают относительно длительно охлаждаться. С каждым двойным ходом интенсивное нарастание «постоянной» составляющей маловероятно. При уменьшении длины шлифуемой поверхности, уменьшается время на перетекание тепла и воздействия СОЖ. Для проверки вышесказанных предположений выполнены эксперименты по определению максимальных температур подогрева по сечениям (см. рис. 2).

На станке Wotan шлифовались тонкостенные гильзы с внутренним диаметром 72 мм, длиной $l_{1,2,3} = 50, 90$ и 200 мм, выточенные на консольной части валов диаметром 80 мм. Материалы гильз – 30ХГСН2А (НВ 260-298), ст. 15Х12Н2МВФАБ (НВ 321-388). Форма и размеры кругов 1А.60x30(1А.ДxТ), эльборовые – Л100/80-К7-100%, электрокорундовые 24А-Ф60 и Ф40-М6-V. Режимы шлифования: скорость круга $V_k = 24 \dots 21$ м/с, продольная подача $S_o = 6$ мм/об.заг.; скорость заготовки $V_{заг.} = 50$ м/мин, поперечная подача заготовки $S_n = 0,0025$ мм/ход, число ходов $n = 40$, СОЖ Укринол-1 (5%), подавалась поливом в глухое отверстие. Температура СОЖ 20°C . Определялась производительность процесса. Работа выполнялась шлифовальной оправкой, предназначенной для отверстия глубиной 200 мм.

Рис. 2 – Схема измерения накопленных температур. 1, 2 – пирометры



ELI TECH П550

В таблице приведены величины «накопленных» температур, фиксируемых на наружных поверхностях гильз при внутреннем шлифовании, после 40 ходов.

Таблица - Изменение температур на наружных поверхностях по длине гильз при остывании на воздухе, °С

ст. 30ХГСН2А; круг 24А F40								
Время выдержки после отвода круга, при длине гильз:								
$l_1 = 50$ мм			$l_2 = 90$ мм			$l_3 = 200$ мм		
5...10с	30 с	60 с	5...10с	30 с	60 с	5...10с	30 с	60 с
43/33*	39/26	35/24	37/24	35/24	34/21	36/24	34/23	33/21
ст. 15Х12Н2МВФЛБ, круг 24А F40								
48/37	44/33	42/30	44/33	42/30	41/29	39/28	37/26	36/23

* В числителе - температура в зоне реверса, в знаменателе – на уровне середины гильз (по длине)

Данные таблицы свидетельствуют о том, что при выбранном цикле и условий обработки детали подогреваются с 20 до 48-43°С, производительность процесса Q по стали 30ХГСН2А составила от 280 до 215 мм³/мин, геометрические отклонения от цилиндричности Δd 0,003÷0,007 мм, шероховатость поверхности Ra 0,32÷0,63.

При цикле обработки n=30 ходов, температуре СОЖ составляла 16-18°С, первоначальный натяг в ТС - $\Delta=0,07$ мм имеем: Q=246÷181 мм³/мин, $\Delta d=0,003\div 0,005$ мм, Ra 0,32÷0,50. Максимальная температура в зоне реверса заготовки из стали 30ХГСН2А длиной $l_1=50$ мм составила 22 °С, $l_2=90$ мм – 21 °С, $l_3=200$ мм – 19 °С.

Выполненный теплофизический анализ позволяет оценить предрасположенность той или иной группы к ограничению накопленной температуры резания. К таким относятся тонкие запрессованные или вклеенные кольца.

Из чего следует вывод, что при длительном шлифовании глубоких отверстий в ряде деталей, накопление температуры усложняют технологию их изготовления.

Список литературы

1. Внутренне шлифование с продольной подачей/ П.М. Салов, Д.П. Салова, С.С. Сайкин, Т.Г. Виноградова и др.// Чуваш. гос. ун-т.- Чебоксары, 2012. Деп. в ВИНТИ 22.06.12, № 286-В2012.- 56 с.
2. Салов, П.М. Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов/ П.М. Салов, Д.П. Салова. – Чебоксары: Чебокс. политех. ин-т (филиал) МГОУ, 2010. – 332 с.
3. Ящерицын, П.И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, М.Л. Еременко.- Минск: Наука и техника, 1973.- 184 с.
4. Дилигенский, Н.В. Расчет температур и баланса тепла при контактном теплообмене системы тел/ Н.В. Дилигенский, Ю.И. Иванов// Инженерно-физический журнал.- 1971. Т. XXI. вып. 6. - С. 1068-1073.
5. Салова, Д.П. Тепловой баланс при шлифовании/ Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов// Научный журнал «Вестник чувашского университета».- Чебоксары, 2008.- №2: разд. Электротехника, электроэнергетика и электроника.- С. 104-108.
6. Дилигенский, Н.В. Установившийся теплообмен вращающихся цилиндров/ Н.В. Дилигенский, Ю.П. Камаев// Физика и химия обработки материалов.- 1971. Вып. 1.- С. 13-18.
7. Шлифование легированных и жаропрочных сталей/ В.Ф. Совкин, Е.В. Быков, А.М. Бударин, Г.И. Бударина// под ред. В.Ф. Совкина.- Куйбышев: Куйбышевское книж. изд-во, 1967.- 160 с.

05.02.08

**П.М. Салов д-р техн. наук, Д.П. Салова канд. техн. наук,
Т.Г. Виноградова канд. техн. наук, С.В. Солин, С.О. Красилов, С.Е. Майков,
А.С. Петров, Д.А. Софронов, С.А. Тимофеев, Е.В. Петров**

Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета,
факультет строительных и транспортных технологий,
кафедра транспортно-технологических машин,
Чебоксары, tavin2008@mail.ru

РОЛЬ ТЕПЛОВОГО ФАКТОРА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В работе рассмотрена методика управления теплофизической ситуацией при шлифовании ответственных поверхностей, находящихся в глубине отверстий деталей, для которых недопустим локальный прогрев отдельных элементов объема. Разработаны рекомендации по выбору цикла обработки, методикам расчета режимов и условий шлифования, конструкции кругов.

Ключевые слова: заглубленные поверхности, температуры, податливость, тонкостенность, остывание (нагревание)

Под заглубленными поверхностями понимают те, которые находятся в глубине отверстий, пазов, выемок и т.п., обработка которых затруднена ограниченной жесткостью технологической системы (ТС). На рис.1 показан процесс шлифования цилиндрического пояска в глубине отверстия. Высокая податливость оправки предполагает разворот круга в пространстве, который, согласно исследованиям, должен иметь конусообразную форму [1].

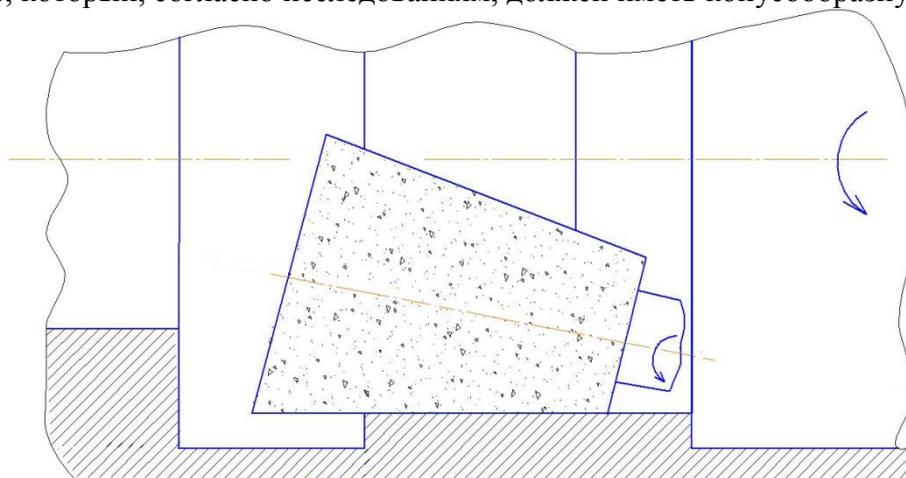


Рис. 1 - Внутреннее шлифование в условиях ограниченной жесткости технологической системы

Наиболее приемлемым для поставленной нами задачи является решение в работах [2-4], где рассматривается контакт двух быстро вращающихся цилиндров. Составлена система уравнений постоянных A_1 и A_2 и переменных составляющие B_1 и B_2 температурного поля (индекс 1 - кругу, 2 - заготовка). A_1 и A_2 - это накопленное тепло в телах за фиксируемое время. Для установившегося процесса отношение тепловых потоков в круг $Q_{кк}$, активированный СОЖ, и заготовку Q_3 ориентировочно равно [2-4]

$$\frac{Q_{кк}}{Q_3} = \sqrt{\frac{(\lambda \cdot c \cdot \rho)_{кк}}{(\lambda \cdot c \cdot \rho)_з}} \cdot \frac{\sqrt{V_к}}{\sqrt{V_з}},$$

где λ , c , ρ - теплофизические характеристики шлифовального круга, активированного СОЖ (к), и заготовки (з); $V_к$ и $V_з$ - скорости круга и заготовки.

Величину $(\lambda \cdot c \cdot \rho)$, где λ - коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность, называют коэффициентом тепловой активности [4, 5].

Для расчета теплового баланса величины λ_3, c_3, ρ_3 для заготовки рекомендуется выбирать при относительных температурах $\Theta_{отн}=0,6$; а λ_k, c_k, ρ_k для круга с СОЖ поливом – при 100°C и 373 K [5, 6].

$$\Theta_{отн} = \frac{T_{бп}}{T_{пред}}$$

где $T_{бп}$ - безопасная для конкретных условий работы температура; $T_{пред}$ - предельная температура, вызывающая тепловые дефекты [5-7].

В общем случае условная тепловая активность круга $(\lambda \cdot c \cdot \rho)_{кс}$ – это комплексный показатель, отражающий вклад СОЖ и/или газовой среды в распределении тепловых потоков. Целесообразно этот вклад отразить коэффициентом $\kappa_{сож}$, тогда

$$\frac{Q_{кс}}{Q_3} = \sqrt{\frac{(\lambda \cdot c \cdot \rho)_к \cdot \kappa_{сож}}{(\lambda \cdot c \cdot \rho)_3}} \cdot \frac{\sqrt{V_к}}{\sqrt{V_3}}$$

В работе [8], при учете размеров тел, $\sqrt{\kappa_{сож}} = 1,06$ ($\kappa_{сож} = 1,1236$).

Зная тепловой баланс по известным зависимостям, находится интенсивность полосового теплового источника и рассчитывается температура в критериальной форме.

Используются критерии Пекле – Pe , Рейнольдса – Re , Нуссельта – Nu , Пранутля – Pr и др. [2-8]. Можно принять контактную температуру Θ_2 равной переменной составляющей B_2 ($\Theta_2=B_2$).

Определим условия, при которых накопленная температура заглубленной поверхности не будет критической для возникновения тепловых деформаций. Воспользуемся известным решением по определению температуры остывания за время внеконтактного периода при работе прерывистым кругом и, в частности, графической зависимостью между $\Theta_{отн}$ и комплексом χ , найденной И.Г. Кигелем [5-7].

$$\chi = \frac{V_d^2 \cdot \tau}{4a}, \quad [5]$$

где V_d – скорость полосового источника тепла (заготовки); τ – расчетное время, в течение которого допускается нагревать заготовку полосовым источником до температур, которые снизятся при последующем охлаждении до требуемой величины за время подхода другого или этого же источника; a – коэффициент температуропроводности.

В качестве примера определим допустимое время нагревания τ внутренней поверхности гильзы диаметром 70 мм из стали 12Х2Н4А при $V_d = 0,7\text{ м/с}$; $a = 0,04\text{ см}^2/\text{с} = 4 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ [5].

Рассмотрим два варианта с одинаковой величиной $\Theta_{отн}$.

$$\Theta_{отн} = \frac{80^\circ\text{C}}{800^\circ\text{C}} = 0,1 \text{ или } \Theta_{отн} = \frac{40^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C}} = 0,1,$$

где 800°C и 400°C – предельные контактные температуры шлифования, 80°C и 40°C – «безопасные» [5, 7] температуры, до которых снижаются температуры поверхности при охлаждении за время до подхода следующего или того же источника тепла.

$$\text{При } \Theta_{отн} = 0,1 \chi \approx 0,025, \text{ т.е. } 0,025 = \frac{V_d^2 \cdot \tau}{4a}, \text{ откуда } \tau = \frac{0,025 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{0,7^2} = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Тогда продолжительность действия (ширина) теплового источника, равная длине дуги контакта составит $\delta \approx l = V_d \cdot \tau = 0,7 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,56 \text{ мкм}$.

Экспериментально установлено, что применение конусообразных кругов, работающих всей поверхностью увеличивает интенсивность подогрева заготовки, однако позволяет уменьшить припуск под обработку на 15-20%, увеличивает производительность процесса до 2 раз. Сокращение времени на обработку, как правило, превалирует над увеличением интенсивности подогрева [1].

Установлено, что формула для расчета времени остывания поверхности

$$\tau = \frac{\lambda \cdot c \cdot \gamma}{\alpha^2} \cdot T_i^2, [5]$$

где α - коэффициент теплоотдачи, для воды $\alpha=3,8 \cdot 10^{-2}$ Дж/(м²·с·град) [5]; справедлива при снижении относительной температуры до $\Theta_{\text{отн}}=0,1$. В дальнейшем температура уменьшается по экспоненте [5]. Например, гильза из стали 30ХГСН2А сечением 90×70 мм, длиной 300 мм, нагретая в кипящей воде, остывает в проточной воде с температурой 20 °С до 30 °С в течение 85-107 с, а до температуры 25 °С – еще 25-28 с.

Температура СОЖ, подаваемая соплом, не должна превышать 20 °С, а поливом - 16÷18 °С, что обеспечивает быстрое охлаждение заготовок до температуры, при которой они контролируются.

Список литературы

1. *Виноградова, Т.Г.* Импульсные температуры при аэробном шлифовании/ Т.Г. Виноградова, Д.П. Салова, П.М. Салов// Технология машиностроения.- М: издат. центр «Технология машиностроения», 2011, Вып. 3. – С. 11-14.
2. *Дилигенский, Н.В.* Установившийся теплообмен вращающихся цилиндров/ Н.В. Дилигенский, Ю.П. Камаев// Физика и химия обработки материалов.- 1971. Вып. 1.- С. 13-18.
3. *Синяев, Г.М.* Тепловой баланс при лучистовом круглом шлифовании/ Г.М. Синяев, П.М. Салов// Теория трения, смазки и обрабатываемости металлов.- Чебоксары: Чув. гос. ун-т, 1980.- С. 44-47.
4. *Силин, С.С.* Баланс механической и тепловой энергий и критерии подобия при плоском шлифовании периферией круга/ Силин С.С., Н.С. Рыкунов// Новые методы определения обрабатываемости материала резанием и шлифованием: Сб. трудов ЯПИ т РАТИ. - Ярославль, 1975.- Вып.3.- С. 122-133.
5. *Якимов, А.В.* Прерывистое шлифование/ А.В. Якимов.- Киев-Одесса: Вища школа, 1986.- 176 с.
6. *Сипайлов, В.А.* Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. - М.: Машиностроение, 1978. - 167 с.
7. *Худобин, Л.В.* Шлифование композиционными кругами/ Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов.- Ульяновск: Ул.ГТУ, 2004.- 256 с.
8. *Салов, П.М.* Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов/ П.М. Салов, Д.П. Салова. – Чебоксары: Чебокс. политех. ин-т (филиал) МГОУ, 2010. – 332 с.
9. *Ящерицын, П.И.* Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, М.Л. Еременко.- Минск: Наука и техника, 1973.- 184 с.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ (05.11.00)**

05.11.00

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

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
кафедра 404 «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств»,
Москва, GIV.52@mail.ru

**КОМПЕНСАЦИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТИ КАНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

В работе предложен способ, пригодный для компенсации влияния неидентичности каналов на характеристики многоканальных информационно-измерительных систем, на базе адаптивных многоотводных линий задержки (трансверсальных фильтров).

Ключевые слова: информация, неидентичность, компенсация.

Постоянно усложняющиеся требования к качеству извлечения информации из принимаемого поля в раскрытие многоканальных приемных систем привели к необходимости реализации на практике адаптивных алгоритмов обработки информации [1]. Однако, теоретически весьма высокие потенциальные возможности адаптивной пространственно-временной фильтрации мешающих сигналов в многоканальных системах

на практике весьма существенно ограничиваются рядом объективных факторов [1,2].

Одним из таких факторов является неидентичность амплитудно-частотных характеристик каналов многоканальных систем обработки информации.

Для решения проблемы неидентичности в [3] предложена математическая модель, позволяющая исследовать данную проблему.

В настоящей статье предлагается метод компенсации неидентичности каналов, основанный на предложенной модели.

Компенсация неидентичности каналов ФАР

Проблема неидентичности каналов актуальна для широкополосных систем. Широкополосными следует считать сигналы, содержащие в корреляционной матрице R ($R_{xx} = R + \sigma_{ш}^2 I$) минимальное собственное значение, соизмеримое с мощностью собственного шума каналов $\sigma_{ш}^2$. Аналогичным образом можно определить понятие распределенных в пространстве помех. До тех пор, пока минимальное собственное значение матрицы R существенно меньше $\sigma_{ш}^2$, источники сигналов можно считать локальными в пространстве и узкополосными (квазигармоническими). Аналогично, если помехи удастся подавить до уровня собственных шумов каналов, то к такой ситуации применима модель локальных узкополосных сигналов.

Минимальное собственное значение матрицы R определяется помимо всего общим количеством управляемых каналов (размерностью вектора управления W).

Широкополосность помех можно достаточно эффективно преодолевать как расщеплением пространственных каналов (дроблением на подрешетки), так и введением в каждом канале линий задержки (ЛЗ) с отводами.

При цифровой обработке введение линий задержек с отводами эквивалентно увеличению частоты выборок (тактовой частоты преобразователей). Нужна только соответствующая обработка выборок с запоминанием предыдущих входных (при трансверсальной фильтрации) и выходных (при рекурсивной) сигналов. Это отдельная интересная задача построения адаптивных процессоров в условиях широкополосных сигналов.

Эквивалентная (по σ_{uu}^2) широкополосность сигналов зависит от направления прихода сигнала как относительно нормали к апертуре, так и относительно направления на источник полезного сигнала. Зависит она и от мощности помех.

Разброс параметров каналов сказывается только при широкополосных сигналах. Видимо, его можно привести к эквивалентному увеличению λ_{\min} матрицы R или к расширению эквивалентной полосы сигналов (эквивалентной широкополосности).

Пространственно-временная обработка - это задача той же категории. Она появляется при широкополосных помехах вдали от нормали к апертуре.

Представляется, что задача широкополосности и неидентичности каналов может быть сведена к минимизации функционала

$$J_{\eta} = (U - BW)^T C (U - BW),$$

где W - вектор управления; U - вектор компенсируемых величин; B - матрица ограничений на управление; C - матрица значимости соответствующих компонент. Обычно размерность U больше размерности W .

Алгоритмы и схемы компенсации неидентичности каналов

Как уже указывалось, общая схема обработки, позволяющая компенсировать неидентичность, может строиться по схеме рис. 1 в [3]. При этом желательно, чтобы число отводов ЛЗ адаптивных каналов соответствовало числу отводов ЛЗ неидентичности. Поскольку это условная величина, то точнее сказать числу степеней свободы.

Если нет никаких сведений о неидентичности каналов, то целесообразно задать одинаковые управляющие сигналы на все каналы, либо сигналы, равные 1 в первые отводы и 0 в остальные (как при комплексном взвешивании).

Если неидентичность имеется, но известна для всех каналов, либо измерима (например, по тестовым сигналам), то можно ставить вопрос о ее коррекции с помощью линии задержки. Не обязательно добиваться прямоугোলности АЧХ во всех каналах, достаточно добиться их одинаковости.

Необходимо отметить, что в случае полного знания (измерения) АЧХ каналов, схему адаптации целесообразно строить по рис. 1. После АЧХ неидентичности ставится цепь коррекции в виде ЛЗ с постоянными коэффициентами, рассчитанными на основании сведений об АЧХ неидентичностей, а затем производится обычная адаптация по синфазно-квadrатурной схеме (комплексное взвешивание). Это позволит значительно уменьшить число адаптивных весовых коэффициентов при практически тех же результатах.

Если полное знание отсутствует, то после проведения приблизительной коррекции целесообразно рассчитанные коэффициенты выбрать в качестве начального приближения, а затем проводить адаптивное изменение всех весовых коэффициентов по схеме рис. 1 в [3].

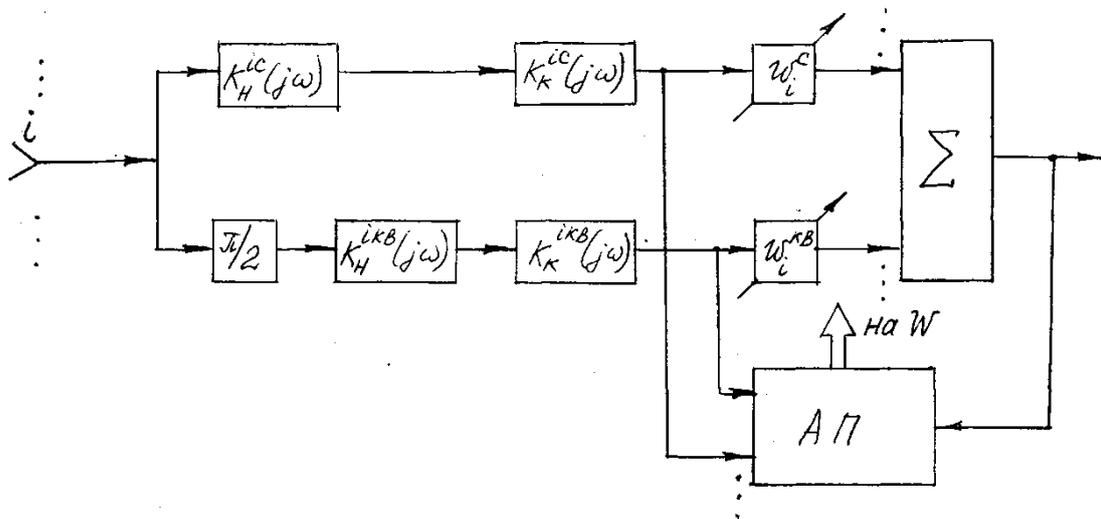


Рис. 1.

Наконец, о практической реализации компенсационных схем адаптации. Из

вышесказанного следует, что они должны содержать задержку сигналов на несколько тактов ($5 \div 6$) и их взвешивание на переменный коэффициент. В общем случае это должно быть реализовано как в синфазных, так и в квадратурных каналах (см. рис. 2). Это может быть сделано, как использованием соответствующей микросхемы, так и при ее отсутствии, запоминанием $5 \div 6$ предыдущих отсчетов сигналов и их последующем взвешивании.

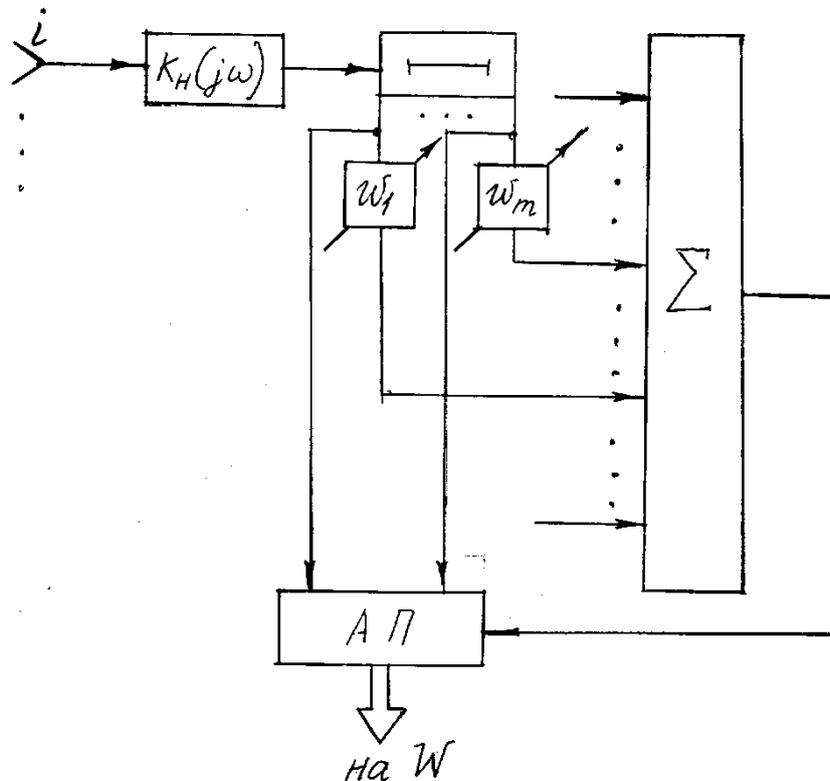


Рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье приведены следующие основные результаты:

Предложен способ компенсации неидентичности, заключающийся в использовании адаптивной МЛЗ, вместо простейшего взвешивания сигналов, путем умножения на переменный весовой коэффициент. Показано, что достаточно использовать МЛЗ с $5 \div 6$ отводами.

В случае знания (измерения) частотных параметров неидентичности возможна полная коррекция частотных характеристик. При этом для восстановления способностей подавления, достаточно использовать по одному весовому коэффициенту в синфазном и квадратурном каналах.

Для компенсации неидентичности целесообразно использовать либо соответствующую микросхему (с задержкой и взвешиванием сигналов), либо ЗУ на несколько тактов с последующим взвешиванием запоминаемых отсчетов.

Список литературы

1. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003 г.- 198 с.
2. Нахмансон Г.С. Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов. М.: Радиотехника, 2015 г.- 256 с.
3. Грубрин И.В., Лыгина И.Ю. Модель неидентичности каналов в многоканальных информационно-измерительных системах// Научно-технический вестник Поволжья.- 2018 г. -№ 8.- С. 41-43.

05.11.13

В.В. Епин, Р.В. Цветков канд. техн. наук

Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН,
Отдел комплексных проблем механики деформируемого твердого тела,
Пермь, epin.v@icmm.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОГО ВЫСЫХАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов неравномерного высыхания различных водных растворов применительно к системам гидростатического нивелирования. Эти результаты позволяют осуществить выбор жидкостей, пригодных для эксплуатации при отрицательных температурах. А также позволяют оценить характерные времена, при достижении которых требуется перемешивание растворов в гидронивелире для обеспечения их однородности.

Ключевые слова: *гидростатический нивелир, незамерзающая жидкость, неоднородная плотность.*

Контроль вертикальных смещений объектов в условиях ограниченной видимости можно осуществлять с помощью систем гидростатического нивелирования [1-4], которые представляют собой совокупность сообщающихся сосудов с жидкостью. Уровень жидкости в сосудах служит отсчетной базой для проведения измерений. Их точность будет определяться несколькими факторами, главным из которых является однородность применяемой жидкости. В идеальном случае ее уровень во всех сосудах будет находиться строго в одной плоскости. Но из-за воздействия внешних факторов он может меняться. Поэтому в нивелирах используют воду как наиболее стабильную жидкость, плотность которой меньше всего меняется с температурой при нормальных условиях. Однако в этом случае становится невозможна эксплуатация при отрицательных температурах.

В качестве незамерзающей жидкости в нивелире можно использовать растворы, содержащие воду и обладающие её преимуществами. Кроме этого, свойства раствора (плотность, вязкость, рабочий диапазон температур) подбираются с помощью концентрации. Однако со временем свойства раствора в разных частях нивелира могут изменяться. Например, под воздействием силы тяжести происходит расслоение (стратификация) жидкости, или из-за неравномерного высыхания может меняться ее плотность, что приводит к изменению показаний прибора.

Для оценки возможности применения незамерзающих жидкостей в нивелирах был проведен эксперимент с тремя водными растворами. Для этого были взяты следующие жидкости: антифриз G11 (раствор этиленгликоля), стеклоочиститель Nordwaystar (раствор изопропилового спирта) и 50% раствор глицерина. Выбор был продиктован их доступностью на рынке и невысокой ценой.

Антифриз содержит помимо воды и этиленгликоля пакет антикоррозионных, антипенных, антиокислительных присадок. Измеренная плотность антифриза составила 1076 кг/м^3 при $+24^\circ\text{C}$. Заявленная температура замерзания -40°C . Эксперимент показал, что при температуре -24°C раствор сохранялся в жидкой фазе. Таким образом, концентрация этиленгликоля в антифризе составляет примерно $55\div 60\%$. Следует отметить, что содержащийся в растворе этиленгликоль ядовит.

Стеклоочиститель состоит из смеси воды, изопропилового спирта, ПАВ, отдушки и красителя. Заявленная концентрация изопропилового спирта составляет 30%. Измеренная плотность составила 998 кг/м^3 при $+24^\circ\text{C}$. Измеренная температура замерзания составила -19°C . Таким образом, концентрация изопропила в растворе составляет примерно 30% по массе.

50% раствор глицерина был приготовлен самостоятельно. Измеренная плотность составила 1133 кг/м^3 при $+24^\circ\text{C}$. При температуре -24°C раствор сохранялся в жидкой фазе.

Для тестирования были взяты три одинаковых U-образных нивелира. Измерительные сосуды, представляющие собой стеклянные трубки с внутренним диаметром 10 мм, располагались рядом друг с другом и были надежно закреплены всё время тестирования. Они были соединены шлангом длиной 4 м и диаметром 12.5 мм, который имел два вертикальных участка по 1 м. Таким образом, внешние условия (температура и давление) для обоих сосудов были одинаковыми и не могли оказать влияние на показания, а длинный шланг не позволял за счет диффузии перемешиваться жидкости. Следует отметить, что в реальных нивелирах длиной сотни метров диффузионное перемешивание невозможно в принципе.

Для эксперимента было организовано неравномерное высыхание жидкости в гидростатическом нивелире за счет свободного доступа воздуха к одному из измерительных сосудов и перекрытием его к другому. Давление воздуха выравнивалось (т.е. второй сосуд также получал доступ к атмосферному воздуху) только на время проведения измерения. Регистрация показаний осуществлялась методом оптического распознавания уровня жидкости в измерительных сосудах видеокамерами, который обеспечивал точность $0.1 \div 0.2$ мм при определении положения мениска в трубке [5].

На рис. 1 представлено изменение абсолютного уровня жидкости в измерительных сосудах с разными жидкостями. За всё время эксперимента (около 2 месяцев) уровень жидкости в измерительных сосудах, наполненных растворами глицерина и этиленгликоля, понижался со скоростью $0.8 \div 0.9$ мм в сутки. Для раствора изопропилового спирта при таких же условиях наблюдалась более высокая скорость высыхания $1.6 \div 1.8$ мм в сутки. Это привело к необходимости долива жидкости через 45 дней после начала эксперимента.

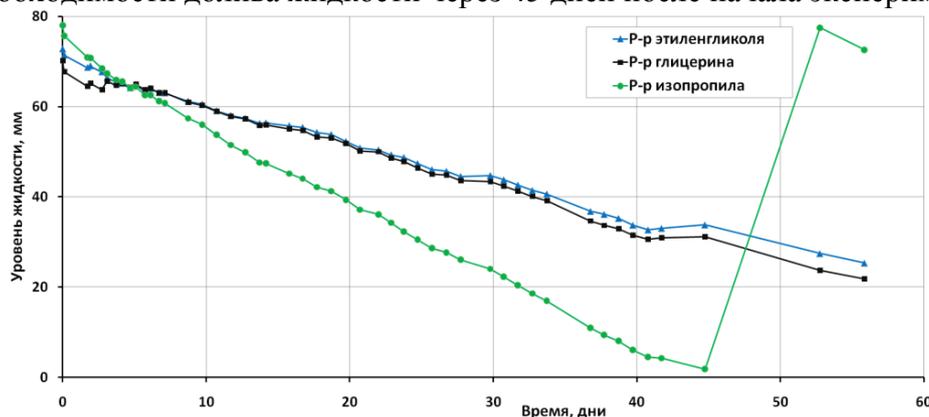


Рис. 1 – Изменения уровня жидкости в нивелирах

За погрешность нивелира, связанную с испарением части жидкости, принято изменение разности показаний в измерительных сосудах со временем. В идеальных условиях при отсутствии вертикальных перемещений измерительных сосудов относительно друг друга эта разность показаний должна быть нулевой.

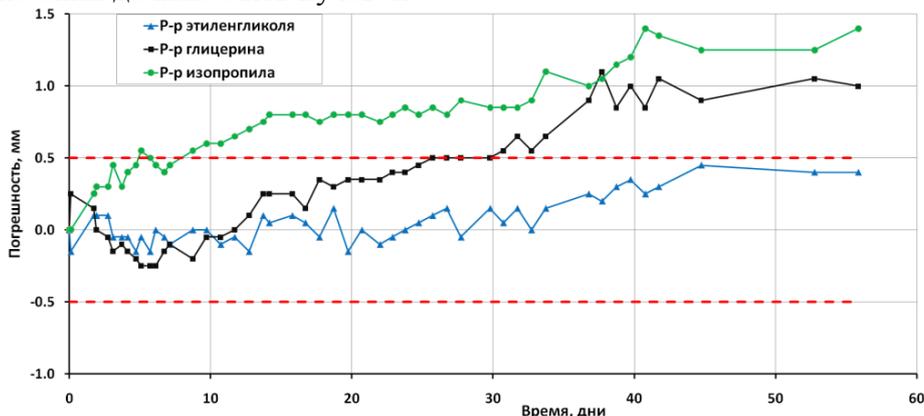


Рис. 2 – Эволюция погрешности измерения из-за неравномерного высыхания жидкости

На рис. 2. представлена эволюция рассматриваемой погрешности за время проведения эксперимента. Как видно из рисунка, раствор изопропилового спирта оказался наименее стабильным, через 5÷8 суток погрешность уже достигла 0.5 мм, а через месяц эксперимента она достигла и затем превысила 1 мм. У раствора глицерина также наблюдается небольшая тенденция к росту погрешности, через месяц она превысила 0.5 мм, через 50 дней достигла 1 мм. У этиленгликоля (антифриза) первый месяц неравномерного высыхания не наблюдалась тенденция к росту погрешности, в течение второго месяца она стала заметна, но всё еще меньше 0.5 мм. Знак в разнице высоты столбов жидкостей свидетельствует об увеличении плотности в той части трубки, что была подвержена высыханию. Для раствора глицерина, например, это означает, что высыхание более легкой фракции (воды) идет активнее, а в растворе стеклоочистителя быстрее сохнет изопропиловый спирт.

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации гидронивелиров наблюдается более слабое высыхание жидкости, а значит и меньшая погрешность. Так, например, полугодовое тестирование 50% раствора глицерина на реальном гидронивелире длиной 160 метров и 15 измерительными сосудами показало, что за время эксперимента погрешность не превысила 0.5 мм. Тем не менее, при применении растворов для долговременных измерений следует учитывать эту проблему. Возможное её решение - периодическое принудительное перемешивание жидкости.

Приведенные результаты свидетельствуют, что раствор этиленгликоля (антифриз) лучше других подходит на роль незамерзающей жидкости для гидронивелира. Даже за 2 месяца эксперимента с интенсивным высыханием не возникла необходимость перемешивания для выравнивания его концентрации. Растворы глицерина также не требуют еженедельного перемешивания, но в целом долговременная стабильность у них хуже, а также они обладают большей вязкостью (чем раствор этиленгликоля), что необходимо учитывать при проектировании системы гидростатического нивелирования. Растворы изопропилового спирта быстрее испаряются, что вызывает неприемлемую погрешность.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-48-590025 р_а).

Список литературы

1. Манукин А.Б. Длиннобазисный гидростатический нивелир // Сейсмические приборы. – 2013. – Т.49. – №4. – С.26 – 34.
2. Shardakov I.N., Shestakov A.P., Tsvetkov R.V., Yepin V.V. The hydrostatic level method for continuous monitoring of building foundations // Solid State Phenomena. – 2016. – Vol. 243. – P. 105–111.
3. Volk J. Hydrostatic level sensors as high precision ground motion instrumentation for Tevatron and other energy frontier accelerators // Journal of Instrumentation. – 2012.– Vol. 7. – P01004.
4. Parker D.H., Radcliff B., Shelton J.W. Advances in hydrostatic leveling with the NPH6, and suggestions // Precision engineering. – 2005. – Vol. 29. – P. 367–374.
5. Епин В.В., Цветков Р.В., Шестаков А.П. Применение метода распознавания показаний в системах гидростатического нивелирования // Измерительная техника.– 2016 . – №4. – С.43–46.

05.11.00

И.В. Нелин канд. техн. наук, Д.А. Охотников канд. техн. наук, М.С. Виноградов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
кафедра 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование»,
Москва, kaf-44-3@yandex.ru

БЕСКОНТАКТНАЯ ВИБРОДИАГНОСТИКА ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ

Вибродиагностика двигателей внутреннего сгорания достаточно широко представлена в литературе [1,2,3], однако в большинстве случаев датчик, регистрирующий вибрации крепится непосредственно на корпусе двигателя, что накладывает на всю систему определенные ограничения. В случае если датчик необходимо монтировать на корпус по средствам специальных креплений, то на корпусе двигателя должны быть конструктивно заложены крепления ответные тем, которые на датчиках. В этом случае сужается диапазон применяемых систем. Использование датчиков на магнитах требует демонтажа пластиковых кожухов, которыми часто закрываются металлические поверхности современных двигателей. Еще одним недостатком рассмотренных систем является возможность регистрации ускорения перемещений, а не самих перемещений поверхности двигателя. С увеличением ширины полосы анализируемых частот при вибродиагностики актуальными становятся ограничения, вызванные массой самих датчиков, особенно в случае, если они крепятся на магнитах.

Ключевые слова: Вибродиагностика, СШП радиолокатор.

Решением вышеизложенных проблем может быть бесконтактная вибродиагностика реализуемая с использованием сверхширокополосных (СШП) радиолокационных технологий. Такие системы позволяют регистрировать механическое перемещение поверхностей двигателя без непосредственного контакта с этой поверхностью и даже через оптически непрозрачные преграды, такие как пластиковые кожухи.

В статье рассмотрена СШП система диагностики двигателя внутреннего сгорания. Проведен эксперимент с короткоимпульсным радиолокатором при наблюдении заведенного двигателя легкового автомобиля.

СШП радиолокатор для бесконтактной вибродиагностики двигателя автомобиля

Схема обнаружителя СШП радиолокатора приведена на рис.1. В качестве СШП сигнала в локаторе используется сверхкороткий импульс с частотным заполнением на частоте f_0 .

При движении объекта радиолокационного наблюдения за счет эффекта Доплера частота отраженного сигнала f_c отличается от частоты излучаемого. Выделение доплеровских частот сигналов, принятых от вибрирующего двигателя, производится в обнаружителе. Так как начальная фаза эхосигнала случайна, возможно отсутствие сигнала на выходе коррелятора, при наличии его на входе, поэтому в приемнике используются два квадратурных канала. Опорные сигналы квадратурных каналов сдвинуты друг относительно друга на $\pi/2$. На выходе корреляторов фильтры высоких частот выделяют сигнал доплеровской частоты. Далее происходит объединение квадратурных компонент.

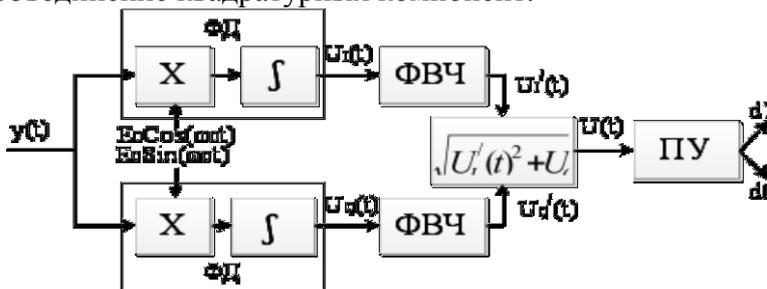


Рис.1. Структура селектора движущейся цели с квадратурными каналами. ФД – фазовый детектор, ФВЧ – фильтр высоких частот, ПУ – пороговое устройство

Периодическую последовательность зондирующих импульсов с амплитудой E_0 и частотой заполнения ω_0 можно представить в следующем виде:

$$U_0(t) = E_0 \sum_k \exp\left(\frac{-\pi(t-kT_{\Pi})^2}{\tau^2}\right) \sin(\omega_0(t - kT_{\Pi})).$$

Если объект неподвижен, то отраженный сигнал $U_{\text{вх}}(t)$ вернется к радару с амплитудой E_1 через время $t_R=2R_1/c$ (c – скорость света, R_1 — расстояние до объекта), со случайной фазой отражения φ :

$$U_{\text{вх}}(t) = E_1 \sum_k \exp\left(\frac{-\pi(t-kT_{\Pi}-2R_1/c)^2}{\tau^2}\right) \sin(\omega_0(t - kT_{\Pi} - 2R_1/c) + \varphi).$$

В случае если сигнал отразился от нескольких местных предметов, сигнал $U_{\text{вх}}(t)$ является суммой отраженных сигналов от каждого объекта. Примем, что все отражатели в зоне действия РЛС можно считать «точечными» («блестящим точками»). Поскольку на частоте $f_0 = 6500$ МГц импульс длительностью 2...3 нс содержит не менее 15...20 периодов несущей частоты, его форма мало меняется при излучении, распространении, отражении и приеме [4]. Тогда эхосигнал на входе приемника:

$$U_{\text{вх}}(t) = \sum_i E_i \sum_k \exp\left(\frac{-\pi(t-kT_{\Pi}-2R_i/c)^2}{\tau^2}\right) \sin(\omega_0(t - kT_{\Pi} - 2R_i/c) + \varphi_i),$$

где: E_i – амплитуда сигнала, отраженного от i -го МП;

R_i – расстояние до i -го МП;

φ_i – случайная фаза отражения от i -го МП.

Разность фаз $\Delta\varphi_i$ между колебаниями излученного и отраженного от произвольного i -го МП сигналов равна:

$$\Delta\varphi_i = \omega_0(t - kT_{\Pi}) - \omega_0\left(t - kT_{\Pi} - \frac{2R_i}{c}\right) - \varphi_i = 2\omega_0 \frac{R_i}{c} - \varphi_i = \left(\frac{4\pi R_i}{\lambda_0}\right) - \varphi_i$$

где: λ_0 – длина волны излученного сигнала.

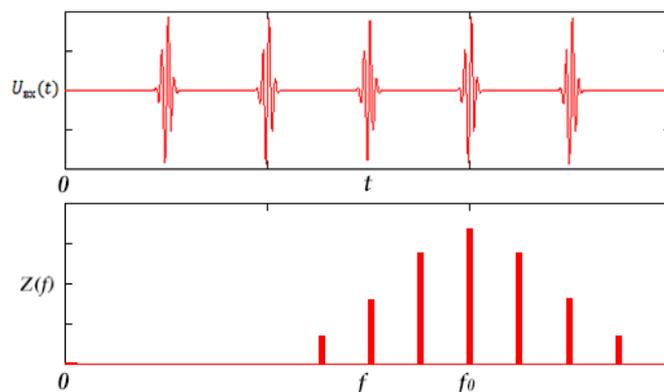


Рис.2 – Сигнал и его спектр на входе приемника при отражении от МП

В корреляторе сигнал $U_{\text{вх}}(t)$, отраженный от объектов и принятый с задержкой $2R_i/c$, перемножается с опорным сигналом. Полученное произведение сигналов интегрируется в течение времени $T(T \gg T_0)$, где T_0 – период несущего колебания) (рис. 3).

Тогда на выходе коррелятора с учетом прихода опорного импульса одновременно с отраженным получаем:

$$U_{\text{корр}}(t) = E_0 \int_t^{t+T} \sum_i E_i \sum_k \exp\left(\frac{-2\pi(\dot{t} - kT_{\Pi} - 2R_1/c)^2}{\tau^2}\right) \cdot \sin(\omega_0(\dot{t} - kT_{\Pi})) \sin(\omega_0(\dot{t} - kT_{\Pi} - 2R_i/c) + \varphi_i) d\dot{t},$$

$$U_{\text{корр}}(t) = E_0 \int_t^{t+T} \sum_i E_i \sum_k \exp\left(\frac{-2\pi\left(t - kT_{\Pi} - \frac{2R_1}{c}\right)^2}{\tau^2}\right) \cdot \left(\frac{\cos(\Delta\varphi_i)}{2} - \frac{\cos(2\omega_0(\dot{t} - kT_{\Pi} - \Delta\varphi_i))}{2}\right)$$

Так как время интегрирования T много больше периода несущего колебания, то слагаемым с удвоенной частотой $\frac{\cos(2\omega_0(t-kT_n-\Delta\varphi_i))}{2}$ можно пренебречь. В результате работы интегратора как фильтра на выходе коррелятора получаем последовательность СШП видеоимпульсов:

$$U_{\text{корр}}(t) = \frac{E_0 T}{2} \sum_i E_i \sum_k \exp\left(\frac{-2\pi\left(t - kT_n - \frac{2R_1}{c}\right)^2}{\tau^2}\right) \cos(\Delta\varphi_i)$$

Работа ФНЧ заключается в выделении узкополосного сигнала, пропорционального изменениям максимальных значений последовательности СШП видеоимпульсов:

$$U_I(t) = \frac{E_0 T}{2} \sum_i E_i \cos(\Delta\varphi_i).$$

Сигнал, отраженный от МП:

$$U_I(t) = \frac{E_0 T}{2} \sum_i E_i \cos(\Delta\varphi_i) + \frac{EE_0 T}{2} \cos(\Delta\varphi_i).$$

Обозначим слагаемое от МП P_I :

$$P_I = \frac{E_0 T}{2} \sum_i E_i \cos(\Delta\varphi_i).$$

Тогда: $U_I = \frac{EE_0 T}{2} \cos(\Delta\varphi_i) + P_I$

Выход второго коррелятора $U_Q(t)$ соответственно:

$$U_I = \frac{EE_0 T}{2} \sin(\Delta\varphi_i) + P_Q,$$

где $P_Q = \frac{E_0 T}{2} \sum_i E_i \sin(\Delta\varphi_i)$.

Эксперимент по бесконтактной вибродиагностики двигателя автомобиля с помощью СШП радиолокатора

В качестве объекта мониторинга использовался двигатель автомобиля BMW пятой серии. Радиолокатор располагался на дистанции 5 см от поверхности двигателя (рис. 3).



Рис. 3 — СШП радиолокатор над поверхностью двигателя автомобиля

На рис. 4 представлена спектрограмма сигнала, полученного с радиолокатора при перегазовке двигателем до 5 тыс оборотов в минуту в первые 40 секунд и перегазовкой до 2 тысяч оборотов в минуту в оставшееся время эксперимента.

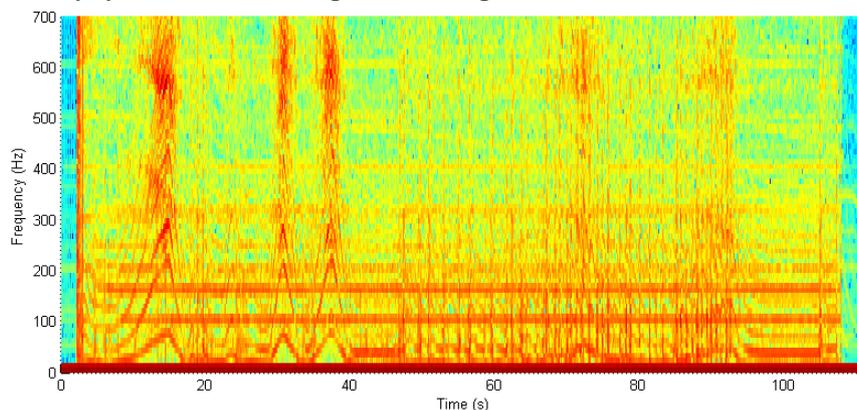


Рис. 4 — Спектрограмма сигнала полученного от заведенного двигателя

На графике видны всплески частоты до 80 Гц на 17, 30 и 38 секунде, что соответствует 4800 оборотам в минуту, а также видны кратные гармоники сигнала, на частотах 200 Гц и выше.

Важным фактором при вибродиагностике является база данных образов дефектов, позволяющая при помощи корреляционного анализа определить наличие конкретного дефекта. Формирование подобной базы является наиболее трудоемкой и дорогостоящей работой, так как требует наличия двигателей с различными дефектами.

Заключение

В статье была рассмотрена система сверхширокополосной бесконтактной вибродиагностики двигателя внутреннего сгорания. Приведенный эксперимент показал уверенную регистрацию необходимой полосы частот для дальнейшего анализа.

Список литературы

1. *Боровцов П.В., Британ А.С., Гладкий И.Л.*, Вибродиагностика деталей газотурбинных двигателей с помощью голографической интерферометрии. *Контроль. Диагностика.* 2007. № 1. С. 57-60.
2. *Зубренков Б.И., Маслов К.Г.*, Частотная вибродиагностика асинхронных двигателей шпиндельного исполнения на подшипниках качения. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.* 2009. Т. 108. № 1. С. 19-24.
3. *Боровцов П.В.* Вибродиагностика электронных узлов систем автоматического управления газотурбинных двигателей с использованием цифровой техники. *Контроль. Диагностика.* 2009. № 10. С. 22-24.

05.11.00

И.В. Нелин канд. техн. наук, **М.К. Седанкин** канд. техн. наук, **В.А. Скуратов**,
М.В. Мартыанова, **Л.Ю. Мершин**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
кафедра 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование»,
Москва, kaf-44-3@yandex.ru;
ФГБУ «ГНИИЦ РТ» МО РФ; Москва;
НИУ «МЭИ», кафедра ОРТ, Москва;
Кафедра оптических и биотехнических систем и технологий РТУ – МИРЭА, Москва.

МИНИАТЮРНАЯ АНТЕННА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВНУТРЕННЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Для неинвазивного мониторинга внутренней температуры головного мозга разработан малогабаритный радиометрический датчик на основе печатной антенны. Дано описание математического моделирования и экспериментальной верификации созданного датчика. Небольшие размеры датчика позволят совмещать его с медицинскими роботизированными системами для повышения эффективности лечения.

Ключевые слова: *микроволновая радиотермометрия, печатная антенна, радиояркостная температура, медицинская робототехника.*

Сегодня инсульт головного мозга является важной медико-социальной проблемой. В структуре статистики смертности острые нарушения мозгового кровообращения занимают 2 место после острой коронарной патологии и составляют около 19% от общего показателя смертности [1, 2].

Для терапии инсульта необходимы различные методы диагностики и лечения, в том числе нейромониторинг в рамках проводимого лечения. Т.к. патологические изменения биологических тканей сопровождаются изменением их метаболизма и локальной температуры, измеряемая радиояркостная температура (далее РТ) может служить важным диагностическим признаком различных заболеваний мозга. Сегодня измерения РТ выполняются в основном с помощью волноводных антенн [3-5]. Однако, эти антенны спроектированы для работы с молочной железой, и, ввиду значительных размеров, закрепить их на теле пациента не представляется возможным. Кроме волноводных в медицине получили распространение следующие типы антенн: рамочные (вибраторные), печатные и внутриполостные [5]. Для измерения температуры головного мозга необходимо адаптировать текущие технические решения для применения в микроволновой радиотермометрии (далее МР) мозга. Создание миниатюрного радиометрического датчика позволит осуществлять эффективное, неинвазивное и безвредное измерение РТ с приемлемой точностью в течение длительного времени.

Сегодня в клинической практике применяется метод краниocereбральной гипотермии (далее КЦГ), который позволяет повысить выживаемость и снизить неблагоприятные последствия церебральных катастроф у пациентов с инсультом. Т.к. терапевтический эффект КЦГ достигается за счёт охлаждения головы человека, то необходим контроль измеряемой РТ для выбора тактики проведения КЦГ соответственно степени поражения мозга [3]. Данные, полученные при использовании радиотермометра «РТМ-01-РЭС» для контроля КЦГ мозга и изучения тепловых особенностей ишемического инсульта, позволяют рассматривать МР как перспективную методику динамического мониторинга пациентов с инсультом. Таким образом, для эффективного контроля за лечением заболеваний головного мозга необходимы малогабаритные радиометрические датчики, конструкция которых позволит эффективно применять методы МР и КЦГ одновременно или попеременно. Кроме того,

миниатюризация аппаратуры позволит совместить прибор с роботизированными системами с целью повышения качества оказания медицинской помощи.

Если прислонить микроволновую антенну к телу человека, то мощность теплового излучения на её выходе будет пропорциональна РТ биологических тканей под антенной $T_{\text{rad}}(r)$ как:

$$P = kT_{\text{rad}}\Delta f(1 - R); \quad (1)$$

где P – мощность шумового сигнала на выходе антенны, Вт; $T_{\text{rad}}(r)$ – РТ, которую измеряет медицинский радиотермометр, $^{\circ}\text{K}$; Δf – полоса частот прибора, МГц; R – коэффициент отражения.

РТ, измеряемая медицинским радиотермометром, зависит от термодинамической температуры $T(r)$ и весовой радиометрической функции $W(r)$ как:

$$T_{\text{rad}}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} T(r)W(r)dV; \quad (2)$$

$$W(r) = \frac{\frac{\sigma(r)}{2}|E(r)|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma(r)}{2}|E(r)|^2 dV}; \quad (3)$$

где $E(r)$ – напряженность электрического поля, создаваемого антенной, $\sigma(r)$ – электропроводность биологических тканей.

Для расчёта электрического поля $E(r)$ необходимо провести численное моделирование в программе электродинамического моделирования, учитывая электрические потери и конструкцию проектируемой антенны. Вычисления производились с помощью программы HIPERCONE FDTD [6], основанной на интерфейсе EMTL (Electromagnetic Template Library) [7]. Высокопроизводительное ядро HIPERCONE использует новый класс асинхронных векторизованных обновлений расчетной сетки. Программа численно решает уравнения Максвелла с учётом сложной структуры биологического объекта методом конечных разностей во временной области. Для проведения расчётов смоделирована ситуация, когда рабочая поверхность антенны непосредственно соприкасается с биологическим объектом. Рассмотрим модель конструкции антенны, используемой в расчётах. На верхнюю сторону подложки диаметром D [мм] и толщиной h [мм] с диэлектрической проницаемостью ϵ нанесена топология излучателя в виде простой прямоугольной щели размерами $L \times S$ [мм]. Нижняя открытая часть подложки контактирует с телом. Для обеспечения приемлемой помехозащищённости подложка установлена в металлический корпус общей высотой – H [мм]. Возбуждение излучателя происходит следующим образом: внешний проводник коаксиального кабеля распаивается на одну сторону щели, внутренний – на другую. Головной мозг моделировался как среда с большими электрическими потерями, аналогичная по физическим свойствам голове человека. Модель представляет собой многослойный куб размерами $100 \times 100 \times 100$ мм. Расчёт электрического поля антенны осуществлялся в этом объёме. Антенна расположена в центре модели при $X_0=50$ мм, $Y_0=50$ мм и излучает в направлении оси Z . Модель с антенной представлена на рис. 1.

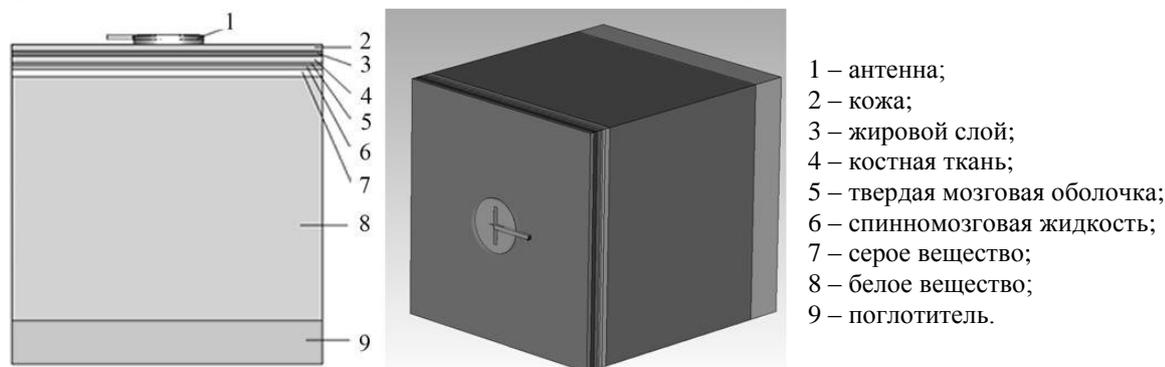


Рис. 1. Модель биологического объекта

На границах модели установлено $E_{\tau}=0$. Биофизические параметры [8,9] каждого слоя модели в диапазоне частот 3.6 ГГц представлены в таблице 1.

Таблица 1. Электрофизические параметры биотканей в диапазоне 3.6 ГГц.

Биологическая ткань \ Электрофизические параметры	Диэлектрическая проницаемость, ϵ	Электропроводность, σ ([См/м])	Толщина слоя биологической ткани, мм
Кожа	36.920	2.086	2
Жировой слой	5.164	0.160	2
Кости черепа	5.176	0.152	2
Тв. мозговая оболочка	40.593	2.439	1
Спинномозг. жидкость	64.410	4.691	1.5
Серое вещество мозга	47.159	2.720	2.5
Белое вещество мозга	34.897	1.873	84

Математическое моделирование выполнено по методологии, изложенной в [10]. В качестве системы возбуждения электромагнитных волн в антенне используется щелевой вибратор в форме простой прямоугольной щели. Рассчитываются мнимые и действительные значения компонент электрического поля $E(x,y,z)$ антенны. Для выбора оптимальных геометрических размеров конструкции антенны и материала подложки проведено математическое моделирование с варьированием различными геометрическими параметрами антенны. В качестве критерия оптимальности выбрана минимизация значения коэффициента стоячей волны (КСВ) на входе питающего фидера. Конструкция антенны должна минимизировать коэффициент отражения (S_{11}) между антенной и телом. КСВ и S_{11} связаны как:

$$КСВ = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \tag{4}$$

В ходе теоретических исследований выполнен ряд расчётов различных вариантов конструкции печатной антенны.

Внутри корпуса установлена подложка антенны с диаметром $D=23$ мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon=20$, её толщина $h=1.5$ мм. Щель излучателя имеет размеры 16×2 мм. Расчёты осуществлялись с варьированием какого-либо одного параметра антенны при неизменности остальных. Антенна располагается в металлическом корпусе с внешним диаметром $D+2=25$ мм и высотой $H=5$ мм. Варьировались следующие параметры: толщина h и диэлектрическая проницаемость ϵ подложки, общая высота антенны H , параметры щели излучателя $L \times S$ и др. Первая серия расчётов связана с изменением параметра h . Расчёты выполнены при значениях $h=0.5; 1; 1.5; 2$ мм и при неизменных других параметрах антенны. На рис. 2а представлен КСВ при различной толщине подложки h . Далее расчёт осуществлялся с варьированием высоты корпуса антенны: $H=4; 5.3; 6.3; 8$ мм. Остальные параметры неизменны и $h=2$ мм. Оптимальный результат получен при $H=5.3$ мм (рис.2б). Далее расчёты осуществлялись при $H=5,3$ мм, $h=2$ мм и неизменных исходных параметрах, варьируя другими параметрами.

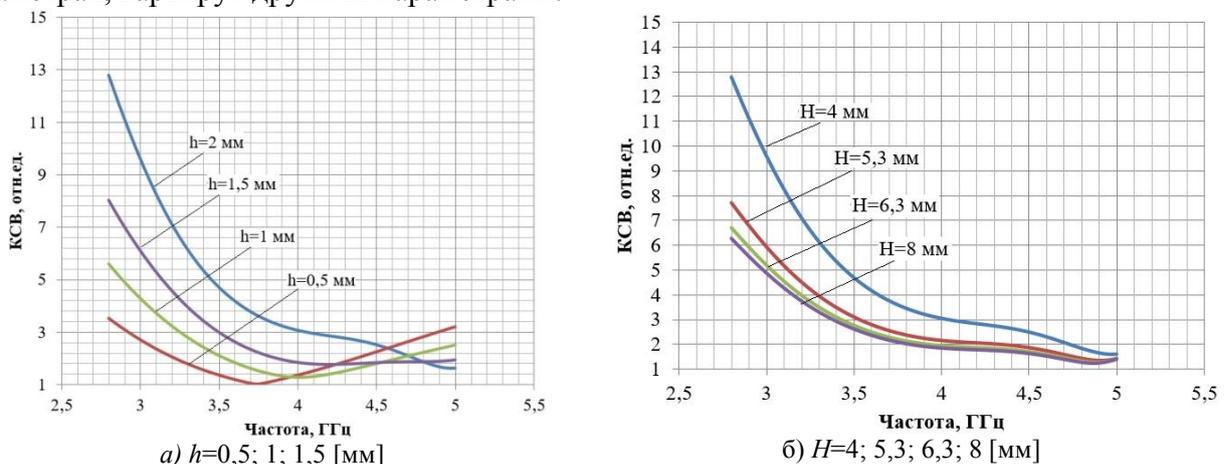


Рис.2. КСВ печатной антенны при различных параметрах

Также выполнен расчёт области измерения РТ, в которой сосредоточено 85% мощности измеряемой антенной. Области измерения РТ для антенны в Е- и Н-плоскостях представлены на рис.3а, 3б.

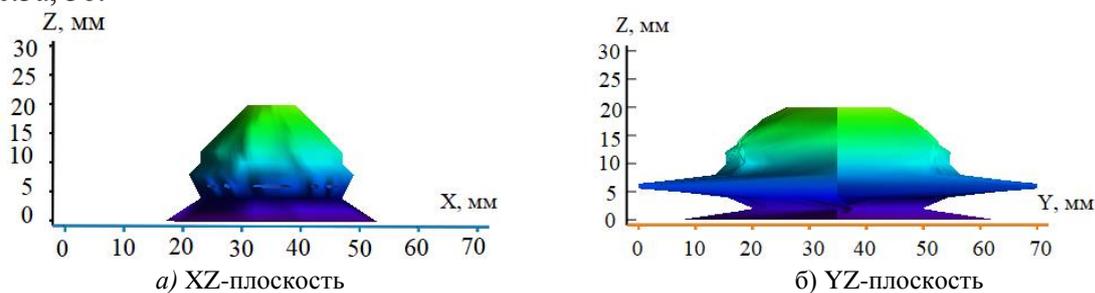


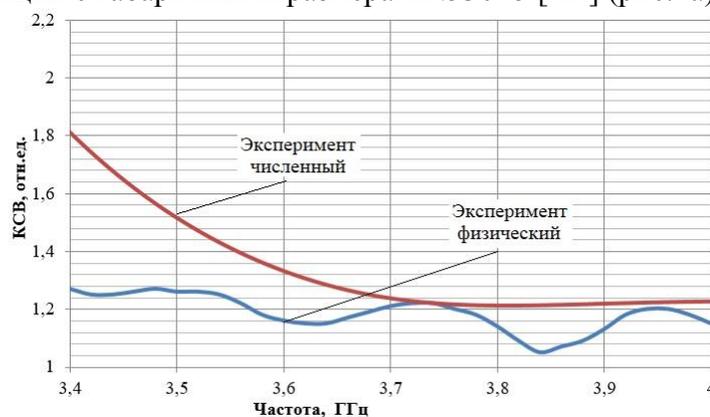
Рис. 3. Область измерения печатной антенны (3,6 ГГц)

По результатам расчёта глубина измерения (длина области измерения в направлении Z) составила 20 мм. Ширина области измерения составила по оси X – 73.4 мм, по оси Y – 28 мм. По итогам расчётов, очевидно, что созданная антенна имеет вполне приемлемые характеристики.

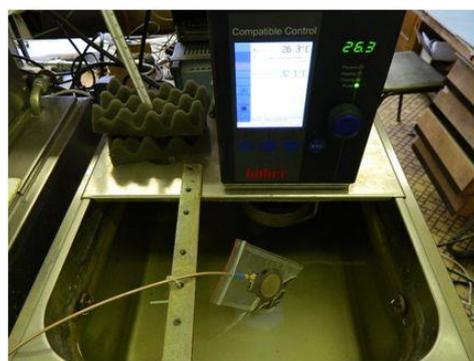
Наиболее эргономичное решение – конструктивное выполнение радиометрического датчика в виде каплеобразной конструкции с габаритными размерами $\varnothing 30 \times 5$ [мм] (рис.4а).



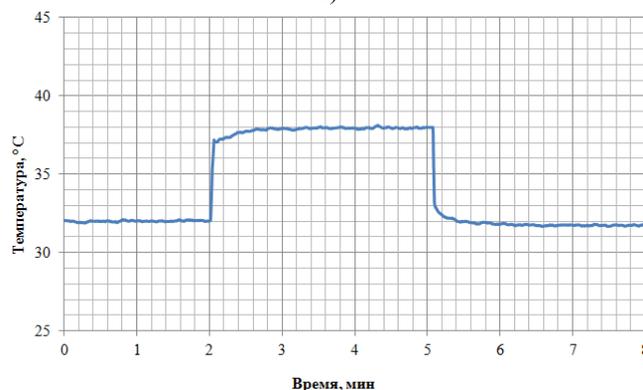
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Радиометрический датчик и его экспериментальные данные: а) радиометрический датчик; б) сравнение данных численного и физического экспериментов; в) экспериментальный стенд (водный фантом); г) результаты измерений (водный фантом).

В нижней части антенны размещена плата с цифровым термодатчиком для контроля температуры корпуса антенны при термокомпенсации. Оптимальные геометрические размеры антенны следующие: общий размер антенны – $\varnothing 30$ мм, диаметр подложки из фольгированного флана – $\varnothing 23$ мм, размеры щели излучателя – $16 \text{ мм} \times 2 \text{ мм}$. Электрические параметры подложки: диэлектрическая проницаемость $\epsilon=10$, тангенс потерь $\text{tg}\delta=1 \cdot 10^{-4}$. Общая высота антенны составила 5 мм. Измерения КСВ антенны выполнены на измерителе модуля коэффициентов передачи и отражения «МИКРАН» Р2М-04 в диапазоне частот 0.01...4.0 ГГц. Стоит отметить, что наилучших результатов согласования антенны удалось добиться

при работе на височной области. На таких участках как теменная область, где кривизна костей черепа наибольшая, показания КСВ антенны несколько хуже вследствие неравномерного прилегания антенны к поверхности головы.

На рис.4б представлено сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных измерений. Для того, чтобы показать приемлемую чувствительность прибора, проведены измерения температуры воды в двух термостатах при разных температурах. Антенна в течение нескольких минут выдерживается в термостате при температуре воды $T=32^{\circ}\text{C}$, затем быстро перемещается в другой термостат с водой с температурой $T=38^{\circ}\text{C}$. Экспериментальный стенд и результаты измерений температуры воды представлены на рис.4в, 4г. Полученные результаты показывают, что разработанная компактная антенна обладает приемлемым согласованием и ожидаемыми тепловыми характеристиками.

Заключение

Большинство существующих типов антенн имеют значительные размеры и не подходят для обследования головного мозга, также невозможна интеграция их с другими медицинскими изделиями и с устройствами, входящими в тип носимых технологий (wearable technology). В результате исследований разработан контактный радиометрический датчик на основе печатной антенны для приема микроволнового излучения головного мозга в диапазоне 3.35–3.85 ГГц. На основе результатов математического моделирования ($\text{КСВ}<2$, глубина измерения – 20 мм) определена оптимальная конструкция и изготовлен радиометрический датчик с печатной щелевой антенной. Антенна изготовлена в виде каплеобразной конструкции с габаритными размерами $\text{Ø}30\times 5$ [мм]. Результаты медико-биологической верификации созданных технических решений подтверждают выполнение системой заданных функций. Происходит стабильная регистрация температуры с погрешностью $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Создание миниатюрного радиометрического датчика позволит в клинической практике осуществлять эффективное и неинвазивное измерение РТ с приемлемой точностью в течение длительного времени.

Список литературы

1. Стародубцева О.С., Бегичева С.В. Анализ заболеваемости инсультом с использованием информационных технологий // Медицинские науки. Фундаментальные исследования. 2012. № 8. С. 424–427.
2. Global and regional burden of stroke during 1990–2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010 / Feigin V. L. [et. al.]// The Lancet. 2014. Vol. 383, Issue 9913. P. 245–255.
3. Диагностические возможности неинвазивного термомониторинга головного мозга/Чебоксаров Д. В.[и др.]//Анестезиология и реаниматология. 2015. № 1. С. 66–69.
4. Веснин С.Г., Седанкин М.К., Пашикова Н.А. Математическое моделирование собственного излучения головного мозга человека в микроволновом диапазоне // Биомедицинская радиоэлектроника. 2015. № 3. С. 17–32.
5. Седанкин М.К. Антенны-апликаторы для радиотермометрического исследования тепловых полей внутренних тканей биологического объекта: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 247 с.
6. Using memory-efficient algorithm for large-scale time-domain modeling of surface plasmon polaritons propagation in organic light emitting diodes / Valuev I.[et. al.]// Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 905. P. 012030.
7. FDTD subcell graphene model beyond the thin-film approximation /Valuev I.[et. al.]// Applied Physics A. 2016. V. 123, Issue 1.
8. S. Gabriel, R. W. Lau, C. Gabriel, The dielectric properties of biological tissues. 2. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz, Phys. Med. Biol. .V.41. P. 2251–2269
9. Нелин И.В., Седанкин М.К., Скуратов В.А. Радиотермометрическая система для обследования головного мозга//Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 5. С. 125–128.
10. Нелин И.В., Седанкин М.К., Скуратов В.А. Радиометрические датчики для медицинских робототехнических комплексов//Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 6. С. 164–166.

05.11.17

¹О.В.Тихоненкова канд. техн. наук, ²П.И.Бегун д-р техн. наук, ³Т.В.Сергеев,
²Д.В.Зеленова, ⁴П. И.Толкачѳв

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», кафедра медицинской радиоэлектроники, Санкт-Петербург, krivohizhinaov@gmail.com

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра ПМИГ, Санкт-Петербург, petrbegun1114@mail.ru

³Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт экспериментальной медицины», отдел экологической физиологии, Санкт-Петербург, stim9@yandex.ru

⁴ООО «АРС – Автоматизированные Реабилитационные Системы», лаборатория механургии, mehanurg@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОСТУРАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В статье рассмотрены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния структур поясничного отдела позвоночника на различные положения тела человека, в том числе, антиортостатической (антиортостатическое положение – голова ниже линии горизонта) нагрузки. Разработаны методики данных исследований.

Ключевые слова: *биомеханика, позвоночник, моделирование, постуральные нагрузки.*

Распространѳнными немедикаментозными методами лечения и реабилитации пациентов, страдающих заболеваниями опорно-двигательного аппарата, является применение методов вытяжения (тракции) [1]. Эффективность тракционных методов может быть значительно повышена путѳм применения динамических постуральных воздействий (ПВ) на основе многоэтапной ориентации-перемещения организма в трёхмерном пространстве. При таких воздействиях происходит перемещение пациента на специальном программно-управляемом столе с дистальной фиксацией нижних конечностей, а пациент поочерѳдно оказывается под действием орто- и антиортостатической нагрузки различной интенсивности [2]. Динамическое перемещение с ориентацией создаѳт условия для вытяжения позвоночника за сѳѳт собственного веса пациента и возникновения отрицательной компрессии в межкостных сочленениях[3]. При этом остаѳтся нерешѳнной задача о взаимосвязи параметров постуральных нагрузок (углов, скоростей, последовательности ориентации-перемещения) и показателей состояния костно-связочного аппарата в позвоночнике.

Таким образом, целью исследования являлось изучение реакции структур поясничного отдела позвоночника на различные положения тела человека, в том числе, антиортостатическое, путѳм проведения испытаний молодых здоровых испытуемых и биомеханических исследований напряженно-деформированного состояния.

В исследовании («Испытание 1» и «Испытание 2») приняли участие четверо молодых здоровых испытуемых («А», «В», «С», «D») обоих полов средний возраст 22,8 лет, средний рост 175,4 см, средний вес 70,8 кг.

Для определения изменения расстояний между позвонками поясничного отдела при различных положениях испытуемого использовалась следующая методика: на поверхности спины испытуемых на уровне седьмого шейного позвонка фиксировалась нулевая (опорная) точка, а на уровне поясничного отдела позвоночника на кожу испытуемого наносились

параллельные цветные линии в направлении перпендикулярном позвоночнику (рис. 1). Ориентирами для меток являлись костные остистые отростки, их местоположение определялось методом пальпации. Расстояния от опорной точки до каждой из этих линий, а также между ними, измерялись при различных последовательно принимаемых положениях испытуемого: стоя, лёжа, в виси вниз головой под углом -80° (1 мин.), лёжа, стоя. Измерение расстояний от опорной точки до каждой из линий проводилось при помощи гибкого ростомера.

Постепенное увеличение антиортостатической нагрузки от 0° до -80° во время испытаний обеспечивается применением специального программно-управляемого поворотного стола и дистальной фиксации нижних конечностей (рис. 2) [4].

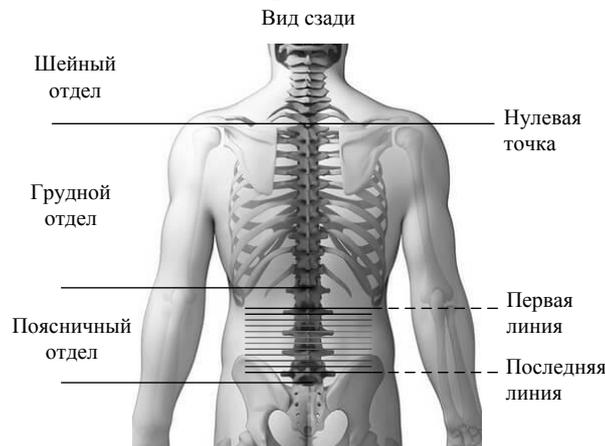


Рис. 1. Схема расположения цветных параллельных линий на уровне поясничного отдела позвоночника испытуемого («Испытание 1»)

«Испытание 1». Исходным положением испытуемого для проведения измерений являлось положение стоя {1} (цифры в фигурных скобках обозначают порядковый номер положения испытуемого). Далее испытуемый обувал специальные ботинки и располагался на ложе стола – это второе положение {2} при котором производят измерения. Для дистальной фиксации испытуемого ботинки жестко крепятся к столу. Ложе стола вместе с испытуемым в течение минуты наклоняется под углом -80° . В таком положении испытуемый находился в течение трёх минут. По истечению этого времени, проводилось измерение в антиортостатическом положении {3}. Ложе в течение минуты возвращалось в горизонтальное положение, затем проводилось следующее измерение {4}. После этого испытуемый вставал – это последнее положение для проведения измерений {5}. Замеры производились для испытуемого «А», «В», «С», «D» по три раза.



Рис. 2. Испытуемый на ложе поворотного стола с дистально фиксированными нижними конечностями, показано промежуточное положение

«Испытание 2» проводилось аналогично «испытанию 1», при этом было увеличено время эксперимента. Замер положения {2} проводился через три минуты. Измерение в антиортостатическом положении {3} проводилось на третьей и шестой минутах. Измерение {4} проводилось на первой и третьей минуте, а измерения {5} проводились на 2-й минуте.

Замеры производились для испытуемого («А», «В», «С») по три раза.

Систематическая погрешность равна половине цены деления ростомера, что составляет 0,5 мм. Методическая погрешность была определена с помощью расчёта среднеквадратичного отклонения (СКО) и не превышает 2 мм.

Результаты

«Испытание 1».

В таблице 1 представлены значения: суммарное изменение длины, происходящее при разных положениях, и суммарное изменение длины за всю процедуру испытаний, приходящееся на межпозвонковые диски (табл. 2).

Таблица 1 - Суммарное изменение длины поясничного отдела при смене положения испытуемых, мм

Сравниваемые положения испытуемого	Испытуемые			
	«А»	«В»	«С»	«D»
Стоя {1} и лёжа {2}	5	2	-6	-18
Лёжа {2} и в висе вниз головой {3}	6	13	3	14
В висе вниз головой {3} и лёжа {4}	-1	-7	0	-3
Лежа {4} и стоя {5}	-2	-8	5	4
Суммарное изменение длины за всю процедуру испытаний	8	0	2	-3

Таблица 2 - Суммарное изменение длины отдельных межпозвонковых дисков за всю процедуру испытаний, мм

Испытуемые	Номера межпозвонковых дисков поясничного отдела				Суммарное изменение длины за всю процедуру испытаний
	2	3	4	5	
«А»	5	2	3	-2	8
«В»	-1	1	2	-2	0
«С»	2	1	0	-1	2
«D»	-1	2	-2	-2	-3

Исходя из результатов, приведенных в таблице 1, можно сделать вывод, что у всех испытуемых при висе вниз головой происходит растяжение структур поясничного отдела. При завершении испытания показатель суммарного удлинения у испытуемых демонстрирует различные тенденции: от удлинения на 8 мм до сжатия на 2 мм. Третьи межпозвонковые диски поясничного отдела у всех испытуемых суммарно демонстрировали тенденцию к удлинению, все пяты – к сжатию (табл. 2).

«Испытание 2».

В таблице 3 представлено значения суммарное изменение длины, происходящее при разных положениях.

Таблица 3 - Суммарное изменение длины при смене положения, мм

Сравниваемые положения испытуемого	Испытуемые		
	«А»	«В»	«С»
Стоя {1} и лёжа {2}	10	7	-6
Лёжа {2} и в висе вниз головой {3} 3 мин.	5	8	15
В висе вниз головой {3} 3 мин. и в висе вниз головой {3} 6 мин.	-1	0	8
В висе вниз головой {3} 6 мин. и лёжа {4} 1 мин.	-7	-8	-26
Лёжа {4} 1 мин. и лёжа {4} 2 мин.	5	0	1
Лёжа {4} 2 мин. и стоя {5} 2 минуты	2	-5	10
Суммарное изменение длины за всю процедуру испытаний	14	2	2

В таблице 4 представлено суммарное изменение длины за всю процедуру испытаний, приходящееся на межпозвонковые диски

Таблица 4 - Суммарное изменение длины отдельных межпозвонковых дисков за всю процедуру испытаний, мм

Испытуемые	Номера межпозвонковых дисков поясничного отдела позвонков-диск-позвонков					Суммарное изменение длины за всю процедуру испытаний
	1	2	3	4	5	
«А»	0	0	5	4	5	14
«В»	1	1	2	-1	-1	2
«С»	-1	0	-1	-1	5	2

Результаты, приведенные в таблице 3, позволяют сделать вывод, что у всех испытуемых при виси вниз головой происходит растяжение структур поясничного отдела. Суммарные изменения у испытуемых различны. Максимальное растяжение у всех испытуемых происходит при смене положения лёжа {2} в положение в виси вниз головой {3} 3 мин. Максимальное сжатие при смене виси вниз головой {3} 6 мин. на положение лёжа {4} 1 мин. В отличие от результатов «Испытания 1» более долгое нахождение в антиортостатическом положении привело к удлинению структур поясничного отдела у всех испытуемых. Большая часть изменений происходит в 3 – 5 межпозвонковых дисках (табл. 4).

Результаты экспериментальных исследований:

- при положении лёжа структуры поясничного отдела позвоночника испытывают минимальное напряжение, происходит декомпрессия;
- при виси вниз головой напряжение в структурах поясничного отдела меньше, чем в вертикальном положении. Вариация растяжения поясничного отдела составляет от 3 мм до 23 мм, среднее значение 10 мм, по результатам теоретических исследований 7 мм;
- после виси эффект удлинения сохраняется в разной степени. В течение двух минут от 2 мм до 14 мм, дальнейшие исследования не проводились. На первой минуте реакция различна от компрессии на 3 мм до растяжения равного 8 мм;
- сложность полученных реакций обусловлена разнообразием физической подготовки испытуемых.

Заключение.

Разработанная методика оценки воздействия антиортостатической нагрузки на поясничный отдел позвоночника позволила экспериментально выявить происходящие в нём изменения.

В результате исследований показано, что у испытуемых при антиортостатической нагрузке происходит растяжение в поясничном отделе позвоночника на разных стадиях эксперимента. Тот факт, что у одних испытуемых максимальное растяжение позвоночника происходит на этапе действия нагрузки, у других в горизонтальном положении говорит о том, что в дальнейших исследованиях стоит особое внимание обратить на рост, вес, возраст, физическое состояние и степень напряжения мышц спины испытуемых. Разработанная методика может стать в дальнейшем основанием для создания «Информационной системы определения нагрузок при исследовании функциональных возможностей людей».

Список литературы

1. Мирютова Н.Ф. Эффективность применения нелинейных тракций позвоночника в комплексе с механическим массажем у больных с деформирующими дорсопатиями. Дальневосточный медицинский журнал Выпуск № 4, 2012, С. 41 – 44.
2. Толкачев П.И., Суворов Н.Б., Сергеев Т.В., Толкачев Н.П. Сочетанные постуральные и мануальные воздействия в курортной и восстановительной медицине // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2016. – Т. 93, № 2-2. – С. 162.
3. Dunk N.M., Kedgley A.E., Jenkyn T.R., Callaghan, J.P. Seated lumbar intervertebral angles using fluoroscopy. Stanford, California: 31st Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, August 23-25. 2007.
4. Толкачев П.И., Пантелеев А.В., Подвязников М.Л. Механургический стол для массажа и мануальной терапии // Патент РФ №2391084. – 2010.

05.11.13

**А.Т. Шляхов канд. физ.-мат. наук, Х.С. Биктимирова канд. экон. наук,
А.Г. Шляхова канд. тех. наук**

Казанский Кооперативный Институт Российского Университета Кооперации,
кафедра естественных дисциплин сервиса и туризма
Казань, 9274573382@mail.ru

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МОДИФИКАЦИЯХ ГАЛЛИЯ

Проведены калориметрические исследования полиморфных модификаций галлия. Переход галлия из стабильной α -фазы в метастабильную β -фазу осуществлен воздействием инфракрасного лазера. Прослежены фазовые превращения в α - и β -галлии, связанные с их плавлением и кристаллизацией. Обнаружен также фазовый переход I рода при -90°C , обусловленный обратным превращением галлия из β в α модификацию.

Ключевые слова: *полиморфные модификации, α и β галлий, микрокалориметр, фазовый переход, плавление, кристаллизация.*

Актуальность. Объемный кристаллический галлий, включая и его микровыделения в полупроводниковых соединениях A^3B^5 , может существовать в нескольких метастабильных модификациях [1], из которых при нормальном давлении устойчивы α -модификация, образующаяся при 303 К, и β -модификация, в которую кристаллизуется переохлажденный расплав.

Целью работы является научное обоснование и оптимизация способа переключения и калориметрического контроля полиморфных модификаций объемного галлия.

Образцы и методика измерений. В зависимости от тепловой предыстории галлия, калориметрические исследования проводятся в трех температурных интервалах: 1) от $+30^\circ\text{C}$ до $+5^\circ\text{C}$, 2) от -16°C до -25°C , 3) от -25°C до -100°C .

Условия эксперимента: масса капель галлия $m \approx 0,1$ мкг радиусом $R \approx 15$ мкм, скорость нагрева-охлаждения составляла 1К/мин. Для достижения поставленной цели необходимо применение дифференциального быстродействующего ($\tau \approx 10^{-2}$ с) микрокалориметра на основе анизотропных термоэлементов (АТЭ) из висмута с термоэлектрическим охлаждением. [2-6].

Генерируемый термоэлектрический сигнал с сенсоров (батарея из висмутовых АТЭ), на которых размещаются исследуемый образец и эталон, соответствует кривой тепловой мощности dq/dt , которая непосредственно фиксируется на двухкоординатном самописце, например, XY-Recorder endim 620/02 от температуры. Скорость изменения температуры не более ≤ 1 град/мин. В случае необходимости применяется усилитель постоянного тока, например TR-1452 с уровнем шума $\leq 0,01$ мкВ. Чувствительность дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) на уровне 0,1 мкВт. Температура образца фиксировалась с помощью термопары медь-константан с точностью 0,1 К.

Экспериментальные результаты На рис.1 показано превращение в α -галлии при изменении температуры образца с помощью термоэлектрического охлаждения. При плавлении и кристаллизации на температурной (либо временной) зависимости потока тепловой мощности наблюдаются характерные аномалии, а именно при температуре $+30^\circ\text{C}$ наблюдается размытый эндотермический отклик $|dq/dt|$, связанный с плавлением галлия, а взрывной кристаллизации соответствует экзотермический пик $+23,5^\circ\text{C}$ (б), т.е. наблюдается переохлаждение. Прослежена зависимость температуры кристаллизации от температуры перегрева. Увеличение температуры перегрева на 100° приводит к экспоненциальному уменьшению температуры кристаллизации на 25 градусов.

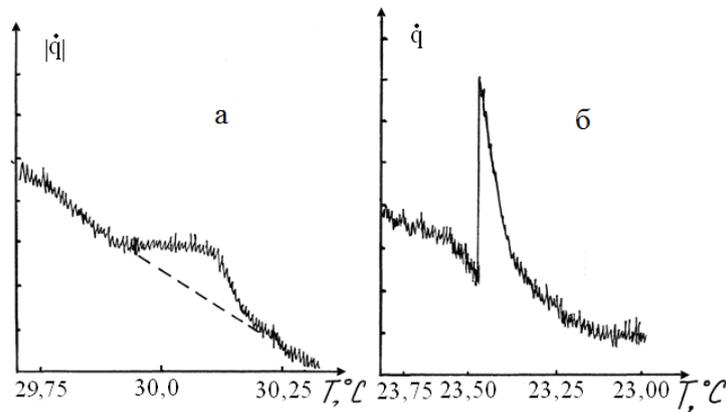


Рис.1. Термограмма α -Ga: кривые ДСК соответствуют плавлению (а) и кристаллизации (б) α -Ga

В предлагаемом способе переход галлия из стабильной α -фазы метастабильную β -фазу осуществляется воздействием инфракрасных лазеров с длинами волн 1,06 мкм либо 10,6 мкм. Основную роль при образовании β -фазы играет высокая скорость закалки расплава галлия. При воздействии лазерного излучения, температура галлия за (1-5) секунд повышается на 100 – 200 градусов выше температуры плавления, примерно с такой же скоростью идет и его охлаждение до комнатной температуры.

Если после лазерного воздействия совершить неполный термоцикл «охлаждение-нагрев», то, при охлаждении фиксируется экзотермический пик при -25°C , затем, если сразу же начать нагревание, то при температуре -16°C наблюдается размытый эндотермический отклик, связанный с плавлением галлия в β -фазе (рис.2). При дальнейшем увеличении температуры вплоть до $+30^{\circ}\text{C}$ никаких тепловых аномалий не наблюдается.

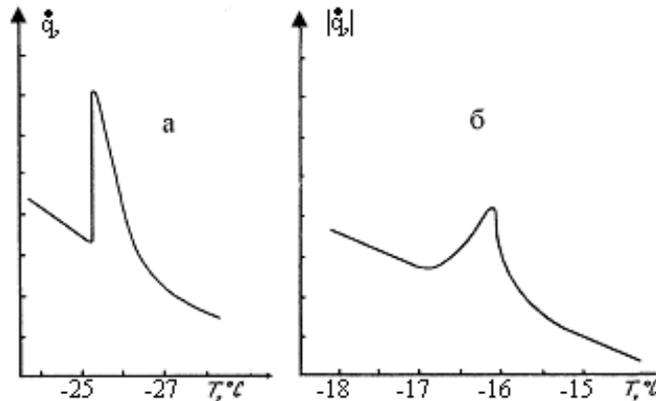


Рис.2. Фазовые превращения в β -Ga: а) - кристаллизация, б)- плавление.

Однако, если же совершить полный термоцикл, то кроме наблюдаемого экзотермического пика при -25°C , связанного с кристаллизацией β -галлия, при дальнейшем понижении температуры фиксируется фазовый переход 1 рода при $\approx -90^{\circ}\text{C}$, сопровождающийся выделением теплоты и обусловленный обратным превращением галлия из β - в α – модификацию (рис.3).

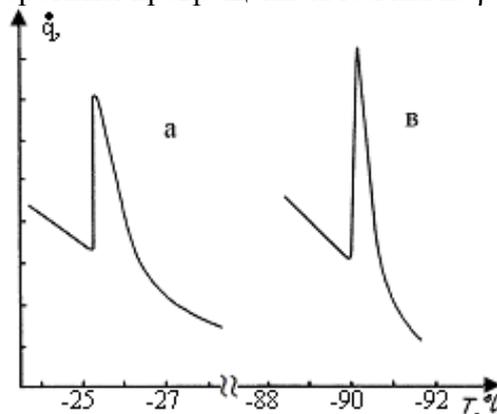


Рис.3. Фазовые превращения в β -Ga : а) - кристаллизация, в) переход из β – в - α - Ga.

Последнее утверждение справедливо, ибо, если теперь осуществить обычный нагрев, до $+30^{\circ}\text{C}$, то наблюдается прежняя картина поведения теплового потока, присущая для α -галлия (рис.1)

Обсуждение. Для расплавов Bi, Ge, Ga, Si, Sb, Sn с ковалентными или частично ковалентными связями характерно наличие двух структур: рыхлой, унаследованной от твердого состояния, и более плотной, возникшей при плавлении [7]. Кристаллический галлий состоит из двухатомных молекул. Фиксированный атом в ромбоэдрической решетке имеет один ковалентно связанный с ним ближайший атом на расстоянии $2,44 \text{ \AA}$ и шесть атомов на расстоянии $2,76 \text{ \AA}$, удерживаемых силами металлической связи. При плавлении происходит отделение внешних р-электронов и разрушение ковалентных связей. Образовавшиеся ионы с $4s^1$ - электронами имеют сферически симметричную конфигурацию, что способствует более плотной их упаковке. При этом часть атомов сохраняет ближний порядок, характерный для кристаллического состояния (α -фаза), остальные атомы образуют более плотную упаковку (β -фаза). При повышении температуры расплава взаимное расположение атомов первого типа постепенно исчезает, уступая место второму. Следовательно, при быстром охлаждении расплава от $(100-150)^{\circ}\text{C}$ до комнатной температуры атомы «не успевают» сформировать ближний порядок, присущий для α -галлия, в результате атомы оказываются «замороженными», сохраняя высокотемпературное расположение атомов, а именно, образуя β -фазу, которая неустойчива при низких температурах. Действительно, при температуре равновесия фаз, равной $T_0 \approx -90^{\circ}\text{C}$ наблюдается фазовый переход первого рода, сопровождающийся выделением теплоты, связанной с превращением галлия из β - в α -модификацию.

Заключение. Проведены калориметрические исследования полиморфных модификаций α - и β - галлия. Переход галлия из стабильной α -фазы в метастабильную β -фазу осуществлен воздействием инфракрасного лазера. Прослежены фазовые переходы связанные с плавлением и кристаллизацией в α - и в β - галлии. При температуре -90°C обнаружен фазовый переход I рода, обусловленный обратным превращением галлия из β - в α -модификацию.

Список литературы

1. Шляхова А.Г., Шляхов А.Т., Галимов Э.Р. Калориметрическое исследование включений матричного металла в GaAs:Te. // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. 2006. т.4. С.423-432.
2. Шляхова А.Г. Дифференциально-сканирующая калориметрия для контроля качества арсенида галлия. // Изв.ВУЗов: Проблемы энергетики. - 2006. - №11-12. - с.104-107.
3. Шляхова А.Г., Дивин Н.П., Шляхов А.Т. Быстродействующий дифференциальный микрокалориметр. // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. 2005. т.3. С.225-235.
4. Шляхова А.Г., Галимов Э.Р., Шляхов А.Т. Разработка высокочувствительных и быстродействующих калориметрических устройств, для изучения тепловых процессов//Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. - 2007. - № 3-4. – с.125–129.
5. Шляхов А.Т., Шляхова А.Г. Термический анализ веществ: история разработок авторских изобретений. // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. 2015. т.14. С.292-311.
6. Шляхова А.Г., Шляхов А.Т. Термический анализ веществ: идеи, реализации, результаты // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 3. С. 33-36.
7. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел / А.Ф. Скрышевский; М.: Высшая школа, 1980. - 328с.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ (05.13.00)

05.13.11

Р.Р. Гатауллин

Институт Прикладной семиотики Академии наук Республики Татарстан,
Казань, ramil.gata@gmail.com

**ГИБРИДНЫЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ТАТАРСКОГО ЯЗЫКА
НА ОСНОВЕ ПРАВИЛ И СТАТИСТИКИ**

В данной работе представлен сравнительный анализ двух подходов морфологической разметки и способ их комбинирования с целью создания гибридной версии морфологического анализатора с улучшенными показателями полноты, точности и скорости анализа, а также с возможностью разрешения морфологической многозначности. Первый подход основан на правилах и реализуется с помощью технологии трансдюсеров конечных состояний – HFST, второй подход является статистическим и реализуется с помощью инструментария – PurePos 2.0. Морфологические модели, разработанные на основе этих подходов, сравниваются по следующим показателям: полнота, точность и быстроедействие. Каждая модель имеет свои преимущества, однако их комбинирование позволяет повышать качество морфологической разметки по всем указанным показателям. В настоящее время версия гибридного морфологического анализатора используется для разметки национального корпуса татарского языка «Туган тел» (<http://tugantel.tatar/>).

Ключевые слова: морфологическая разметка, HFST, PurePos 2.0, гибридная модель, разрешение многозначности, татарский язык.

Введение

Морфологический анализ (парсинг, морфологическая разметка, морфологическое аннотирование) является одним из важных этапов обработки естественно-языковых данных. Если для одних языков с бедной морфологией задача сводится к pos-теггингу (eng, part-of-speech – часть речи), например, для английского языка, то для других, например, агглютинативных языков, таких как венгерский, турецкий, татарский или финский, кроме частей речи важно разметить всю парадигму целиком, включая порядок присоединения аффиксов. Дополнительную трудность создает морфологическая многозначность, когда одной и той же словоформе в разных контекстах соответствуют разные парадигмы аффиксов.

Для большинства языков существующие системы морфологической разметки включают функции лемматизации, pos-теггинга и разрешение морфологической многозначности. Данные системы в основном разрабатываются на базе правил, либо с использованием статистических методов. Очевидно, для первого подхода необходимо описать морфологические правила конкретного языка, например, на основе двухуровневой модели Киммо Коскенъеми [1]. Для второго подхода требуется наличие достаточного объема размеченных текстов. Несмотря на то, что оба подхода обладают высокими техническими показателями (см. таблицы 1 и 2), основной их недостаток связан с трудоемкостью разработки морфологических правил, правил разрешения многозначности, подготовки необходимого объема данных. Кроме того, в отдельно взятом виде эти подходы не способны полностью решить задачу морфологической разметки языкового корпуса. В этой связи актуальной является задача построения гибридной версии морфологического анализатора на основе этих подходов. В данной работе проводится сравнительный анализ моделей разметки, основанных на правилах (HFST [2, 3]) и на статистике (PurePos 2.0 [4, 5]), а также новой гибридной модели, она их основе.

Поскольку система разрабатывалась с целью аннотирования национального корпуса татарского языка «Туган тел», то есть ориентирована на обработку татарских словоформ, важное значение при построении морфологической модели имеет специфика обрабатываемого языка. Татарский язык является агглютинативным типом языка и принадлежит группе тюркских языков. Для таких языков количество присоединяемых к основе морфем теоретически может быть не ограничено, вследствие чего возникает богатое многообразие морфологических форм. В связи с этим задача морфологической разметки текстов для этих языков представляет большой научно-исследовательский интерес и является актуальным в разработке прикладных систем.

HFST

HFST (eng, Helsinki Finite State Transducer) – модель представляет собой конечный автомат. Основан на двухуровневой морфологической модели языка. Двухуровневый формализм представляется в нотации двухуровневых правил, которые устанавливают законы соответствия между поверхностным и глубинным уровнями представления символов в зависимости от контекста реализации. Основным механизмом представления двухуровневых правил в виде двухуровневой компьютерной модели является технология автоматов конечных состояний (АКС) в виде трансдюсеров конечных состояний (ТКС) [1, 3].

При двухуровневом подходе фонология определяется как связь между лексическим уровнем глубинного представления слов и их реализации на поверхностном уровне. Например, лексический уровень аффикса +Дан на поверхностном уровне реализуется как алломорфы +дан, +дэн, +тан, +тэн.

Файл морфотактических правил содержит список лексических единиц, и описание морфотактических правил. Лексическая единица может быть одной единственной морфемой (таких как корень, префикс или суффикс) или морфологическим комплексом слов (корень плюс префикс и суффикс) [3].

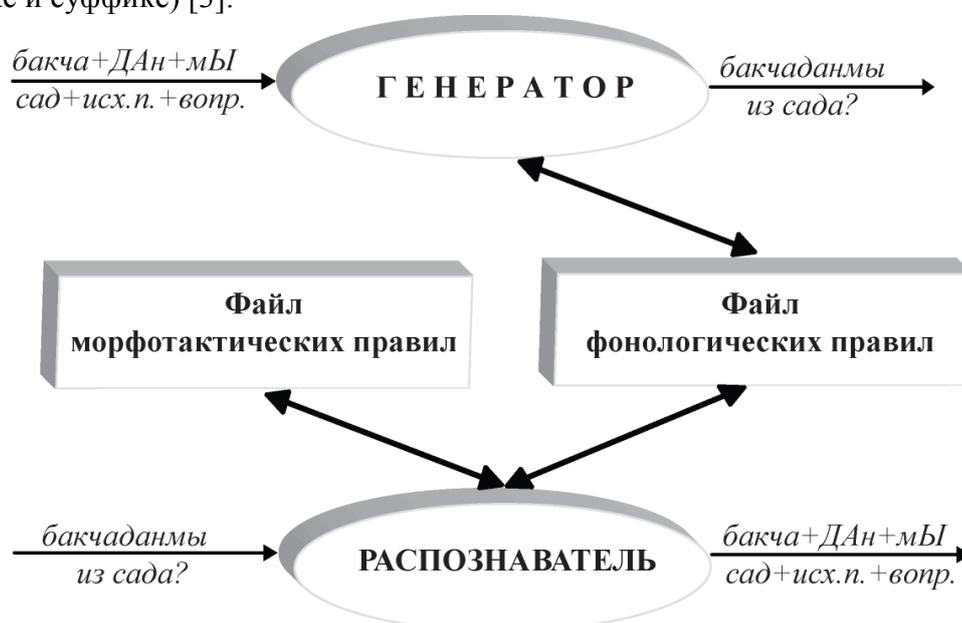


Рис. 1 – Схема работы морфоанализатора на основе двухуровневой модели

Морфотактические правила представлены в виде морфотактических схем, включая глагольные и номинативные парадигмы и определяют взаимосвязи между основой и аффиксальными группами, в том числе и порядок присоединения аффиксов к основе и друг к другу [3].

Данная модель размечает лемму и всю аффиксальную цепочку. Ситуация многозначности не разрешается, а выдаются все возможные варианты аффиксальной парадигмы.

Таблица 1 – Технические характеристики HFST для татарского языка

Морфотактических правил	49
Фонологических правил	55
Слов в словаре основ	28,000
Скорость* обработки (слов в секунду)	~10,000–20,000
Полнота	93–95%
ЯП	C/C++, Python

PurePos 2.0

PurePos 2.0 – гибридная модель, основанная на скрытой Марковской модели (eng, HMM – Hidden Markov Model), разрабатывался для языков со сложной морфологией (в том числе для агглютинативных языков) и с малой ресурсной базой (low resource languages). Основные эксперименты [4] проводились для венгерского языка. Результаты по распознаванию POS-тегов слов имеют оценки точности 97% [4]. Для обучения требуется размеченный корпус со снятой многозначностью. Размечает лемму и всю аффиксальную цепочку. На основе контекста разрешает морфологическую многозначность. С некоторой точностью размечает словоформы, образованные от несловарных основ.

Таблица 2 – Технические характеристики PurePos для татарского языка

Объем размеченного подкорпуса для обучения (в лексических единицах)	2,500,000
Скорость обработки (слов в секунду)	~5,000–7,000
Полнота	92–93%
Разрешение многозначности	86%
Распознавание несловарных словоформ (Полное / Часть речи / Только лемму)	45% / 65% / 79%
ЯП	Java, Python

Гибридная модель

Гибридная модель представляет собой последовательную работу первых двух моделей, таким образом, что:

- 1) сначала неразмеченный текст подается на вход модели HFST;
- 2) после предварительной разметки нераспознанные токены и токены с неснятой многозначностью подаются на вход PurePos 2.0;
- 3) на выходе получаем размеченный текст со снятой морфологической многозначностью и точностью уровня модели HFST.

Метрики и сравнение моделей

Модели сравниваются по следующим показателям: *полнота*, *точность* и *быстродействие*. Под *полнотой* в данном случае понимается объем токенов в тексте, которые анализатор способен распознать, иначе токены получают метку NR (eng, *not recognized* = рус. «не распознано»). Низкий показатель покрытия свидетельствует о неполноте морфологической модели анализатора. Под *точностью* понимается объем правильно размеченных словоформ от всего объема распознанных словоформ. Важным фактором также является *быстродействие* (*скорость обработки словоформы*), в особенности, когда морфологический анализатор используется в промышленных системах, работающих в реальном времени с огромными объемами текстов.

Таблица 3 – Сравнение моделей

Метрики	HFST	PurePos 2.0	Гибридная модель
Полнота	93–95%	92–93%	96%
Точность	98.3%	93.16%	96.12%
Распознавание лемм	97.2%	94.77%	97.68%
Распознавание POS	97.5%	96.52%	98.52%
Разрешение многозначности	-	86.08%	89.81%
Скорость обработки* (слов в секунду)	~10,000–20,000	~5,000–7,000	~7,000–10,000

* эксперименты проводились на комп. HP Compaq, 2x яд. с 4GB OZU.

Заключение

Результаты работы показывают, что модель HFST точнее и быстрее, но имеет существенный недостаток – не разрешает многозначности. PurePos 2.0, хоть и уступает в скорости, но разрешает многозначность и может распознавать несловарные словоформы. А гибридная модель, используя преимущества обеих описанных моделей, способна повысить качество морфологической разметки по всем показателям.

Результаты разметки могут быть использованы в аннотировании языковых корпусов, в системах информационного поиска, машинного перевода, извлечения именных словоформ и в других задачах, связанных с автоматической обработкой текстов на естественном языке.

Список литературы

1. *Koskenniemi, Kimmo.* (1983). Two-level Morphology: A General Computational Model for Word-Form Recognition and Production.
2. *Lindén, K., Silfverberg, M. and Pirinen, T.* (2009g). HFST Tools for Morphology - An Efficient Open-Source Package for Construction of Morphological Analyzers. In Proceedings of the Workshop on Systems and Frameworks for Computational Morphology. Sept. 2009, Zürich, Switzerland.
3. *Сулейманов, Д.Ш.* Двухуровневое описание морфологии татарского языка / Д.Ш. Сулейманов, Р.А. Гильмуллин // Тезисы Международной научной конференции "Языковая семантика и образ мира" в 2 кн. - Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1997. - Кн. 2. - С. 65-67.
4. *Orosz, G. and Novák, A.* 2013. PurePos 2.0: a hybrid tool for morphological disambiguation. Proceedings of Recent Advances in Natural Language Processing, pages 539–545, Hissar, Bulgaria, 7–13 September 2013.
5. *Гильмуллин, Р.А.* Разрешение морфологической многозначности текстов на татарском языке на основе инструментария PurePos. / Р.А. Гильмуллин, Р.Р. Гатауллин // V МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ТЮРКСКИХ ЯЗЫКОВ «TURKLANG 2017». – Труды конференции. В 2-х томах. Т 1. – Казань: Издательство Академии наук Республики Татарстан, 2017. – С. 30-37.

05.13.00

А.А. Гришин, С.П. Строев канд. эконом. наук

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева,
физико-математический факультет, кафедра алгебры и математических методов в экономике
Орел, grishin-andrey@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОВЕДЕНЧЕСКОГО СКОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА

В статье представлены модели поведенческого скоринга. Исследование основано на реальных данных, представляющих поведение клиентов в процессе обслуживания клиентов кредитной организации. Целью исследования было выявить конкретные группы заемщиков, чье кредитное поведение описывается признаками совокупности, которые могут использоваться банком для принятия управленческих решений.

Ключевые слова: *поведенческий скоринг, градиентный бустинг, значимость характеристик выборки, задача классификации.*

Кредит является одним из наиболее распространенных банковских продуктов, как для физических, так и для юридических лиц. При этом, основной задачей при формировании кредитного портфеля банка является оценка уровня риска невозврата кредита заемщиком. Логичным путем снижения риска является включение в кредитный портфель надежных, с точки зрения банка, заемщиков. Для решения данной задачи применяют скоринговые системы [1-4], основное назначение которых при работе с физическими лицами заключается в том, чтобы на основе информации о заявителе обоснованно принять решение о возможности выдачи ему кредита и на каких условиях. Наряду со скорингом заявок в литературе [5-8] выделяется поведенческий и коллекторский скоринг, а также скоринг на предмет мошеннических действий.

Поведенческий скоринг по функционалу напоминает скоринг заявок, но содержит в себе данные о поведении клиента, такие как анализ графика погашения кредитов, обороты по личным счетам и т.д. Динамическая оценка состояния кредитоспособности позволяет гибко подходить к работе с каждым клиентом, увеличивать или уменьшать кредитные линии, применять различные стимулирующие программы.

Коллекторский скоринг используется для работы с проблемными клиентами путем классификации на группы по уровню их несостоятельности. Позволяет в первую очередь выделить заемщиков недобросовестных заемщиков из всей массы клиентов кредитной организации для планомерной работы с просроченной задолженностью и принятия мер до момента ее списания, продажи или передачи в коллекторское агентство.

Скоринг мошенничества позволяет определить вероятность того, что клиент является мошенником.

В специализированной литературе [1-8] широко освещаются вопросы построения моделей скоринга заявок. При этом вопросы разработки моделей других упомянутых видов скоринга практически не рассматриваются.

В данной статье описываются результаты построения модели поведенческого скоринга на основе использования данных о кредитном поведении клиента.

Согласно [1,9] построение модели поведенческого скоринга предполагает выполнение следующих этапов:

Таблица 1 – Последовательность этапов разработки скоринговой системы

№ этапа	Наименование	Перечень процедур реализации
1	Сбор данных	- Сбор данных, первичная обработка информации; - Оценка параметров, формирующих данные, исключение дублирующихся данных, создание обучающей выборки.
2	Разработка модели	- Оценка параметров в соответствии с выбранной моделью; Расчет базовых статистических показателей и проверка их соответствия решаемой задаче, разработка скоринговой карты.
3	Проверка модели	- Бенчмаркетинг – эталонное тестирование модели на основе эталонных показателей; Адаптация модели под конкретные условия.
4	Внедрение модели	- Разработка программной реализации; - Оценка точности алгоритма
5	Разработка отчета	- Разработка удобного представления данных модели; - Формирование отчета, принятие решения.

В распоряжении авторов имеется выборка объемом 55 тысяч записей, каждая из которых определяется следующим набором признаков клиентов платежной системы (таблица 1).

На начальном этапе исследования проводилась первичная обработка выборки, в частности, с использованием языка программирования Python и библиотеки Pandas выявлены пропуски в исходном массиве данных. Соответствующие записи удалялись из исходной выборки.

Таблица 2 – Модель и структура данных

Блок признаков	
Обозначение признака	Характеристика признака
Discipline	Дисциплина клиента
Блок факторов, характеризующий денежные переводы клиента	
tip-reved	Тип переводов
geogr-pereved	География переводов
geogr-tel	География телефона
summ-perevod	Сумма перевода
perevod-summ-max	Максимальная
perevod-summ-sr	Средняя
perevod-summ-poln	Полная
za-pol-goda-do-kredita	За полгода до взятия кредита
za-god-do-kredita	За год до взятия кредита
Блок факторов характеризующий активность клиента	
Kol-per	Количество переводов
do-1-sms	До 1 смс
posle-1-sms	После 1 смс
do-kredit	До взятия кредита
posle-credit	После взятия кредита
Блок, характеризующий социально-демографические параметры клиента	
kanal-prohoda-klienta	Канал через который пришел клиент
Vozrast	Возраст
Pol	Пол
sovpal-region	Совпал ли регион получения кредита с регионом телефона
drugoi-nomer	Указал иной номер телефона при выдаче кредита

Далее рассматривалась задача по формированию признакового пространства, которое в дальнейшем использовалось при построении модели скоринга.

Для этого использовался метод градиентного бустинга, программно реализованный в библиотеке. Опишем решение данной задачи более подробно.

Для оценки значимости признаков в структуре классификатора воспользуемся метода ансамблей. Наиболее распространенным и часто применяемым методом построения ансамблей является бустинг (boosting) [10], в котором обучение каждой последующей модели основан на получении данных об ошибках в предыдущих моделях. Дальнейшее развитие алгоритма бустинга основано на построении аддитивной функции в виде суммы деревьев решений аналогично методу градиентного спуска.

Проведенная оценка точности классификации на основе всего массива данных с использованием различных реализаций алгоритма, представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментального сравнения алгоритмов градиентного бустинга в различных реализациях.

Алгоритм/Библиотека	Точность классификации
Gradient Boosting (Scikit)	0,815942
Gradient Boosting (light GBM)	0,743241
Gradient Boosting (XGBoost)	0,838331
Gradient Boosting (CatBoost)	0,841533

В методе бустинга методом последовательного построения ансамбля классификаторов итоговое решение было получено путем варьирования шага, отслеживая вероятность переобучения алгоритма. В алгоритмах бустинга чем меньше шаг, тем вероятность получения лучшего решения выше, однако, слишком малая его величина способна вызвать переобучение, когда ошибка классификации начинает расти. В результате минимальный шаг, при котором возможно построение итогового классификатора равен 0,05.

Результаты ранжирования классификационных признаков представлены на рис. 1.

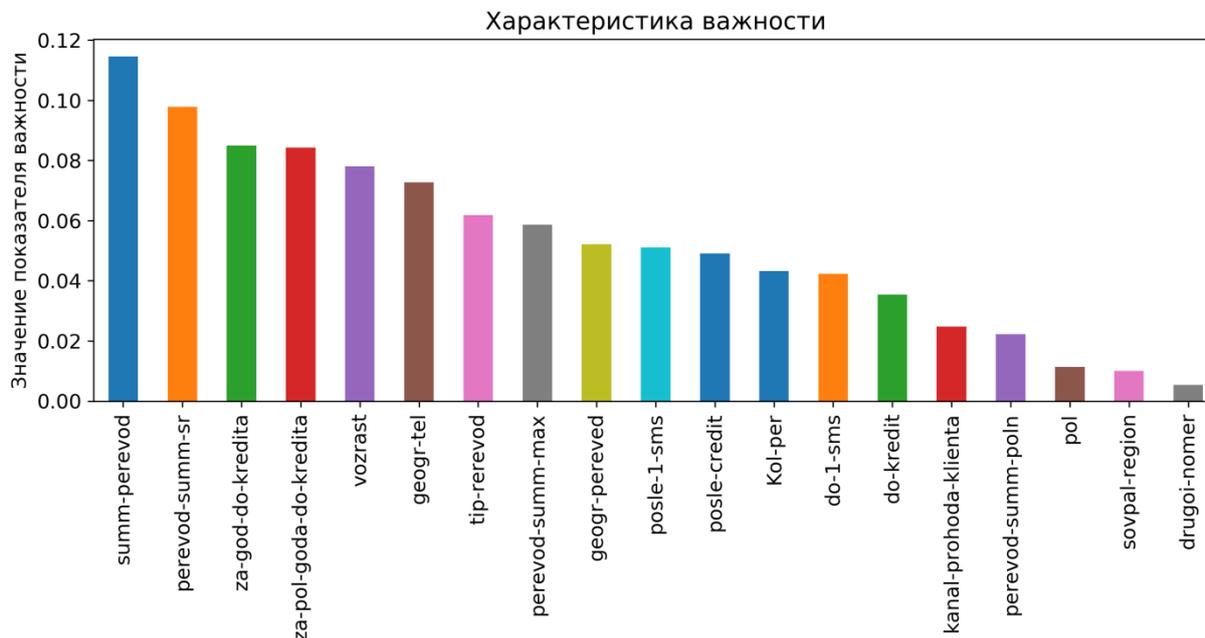


Рис. 1 - Распределение значимости критериев оценки заемщика, полученные с использованием алгоритмов бустинга.

В случае применения алгоритмов бустинга (рис. 1) финансовые показатели являются первоочередными, на втором месте по значимости стоят демографические показатели клиента, а дисциплина имеет лишь третьестепенное значение. Вторым отличие результатов является большая равномерность в ранжировании факторов.

Поведение клиента характеризуется динамическими параметрами, т.е. теми с которыми можно связать функцию времени. Из рассматриваемой совокупности одним из параметров характеризующим поведение нами рассматривалась частота переводов. Каждому переводу соответствуют сумма перевода. Воздействие на клиента со стороны кредитной организации осуществляется при помощи смс, в которых ему приходят уведомления и напоминания. Поэтому показатель частоты переводов может использоваться как основа для построения профиля поведения клиента.

Построив бинарный классификатор, который реализует скоринг заявок, мы отобрали клиентов, которые могут рассматриваться как хорошие. Основным параметр – количество переводов имеет следующие характеристики, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Количество переводов клиента в профиле хорошего клиента скоринговой системы

№ п/п	Обозначение	Описательная статистика показателя	Значение
1	mean	среднее значение	9,92
2	Std	среднеквадратическое отклонение	16,47
3	Min	минимальное значение	1,0
4	25%	первый (или нижний) квартиль	3,0
5	50%	второй квартиль (середины) или медиана	6,0
6	75%	третий (или верхний) квартиль	11,0
7	max	максимальное значение	401,0

Далее необходимо выделить классы для реализации алгоритма поведенческого скоринга.

Фактически задача нахождения профиля предполагает разбиение совокупности данных на конечное число подсовкупностей. Такие задачи часто решают методами неконтролируемого обучения или кластеризации, среди которых наибольшее распространение получили: метод k-средних, иерархическая кластеризация и другие. Особенностью данного рода алгоритмов является то, что они требуют задания некоторых параметров, определяющих впоследствии принадлежность к нему точек. Так, метод k-средних, основанный на минимизации суммарных квадратичных отклонений точек кластеров от центроидов (средних координат) этих кластеров, требует наличия центров кластеров и их количества, задать которые не всегда возможно. Иерархическая кластеризация плохо подходит для большого количества данных и также требует количества кластеров. Поэтому, воспользуемся методом, который не требует задания количества кластеров для разбиения. Таким методом является - метод кластеризации на основе плотности DBSCAN [11; 12]. Данный метод требует задания двух параметров максимальное расстояние между соседними точками (ϵ) и минимальное число точек в окрестности (количество соседей)- $\min_samples$, когда можно говорить, что эти экземпляры данных образуют один кластер. В результате количество кластеров или вариантов поведения клиента равно 5. Проверить данный результат можно используя известную формулу Стержеса, взяв в качестве верхней границы значение третьего квартиля из таблицы 4.

Используя алгоритм градиентного бустинга применительно к задаче множественной классификации, нами была разработана модель прогнозирования поведенческого скоринга на основе 5 профилей или 5 классов, к которым можно отнести клиента кредитной организации (Рис. 4.).

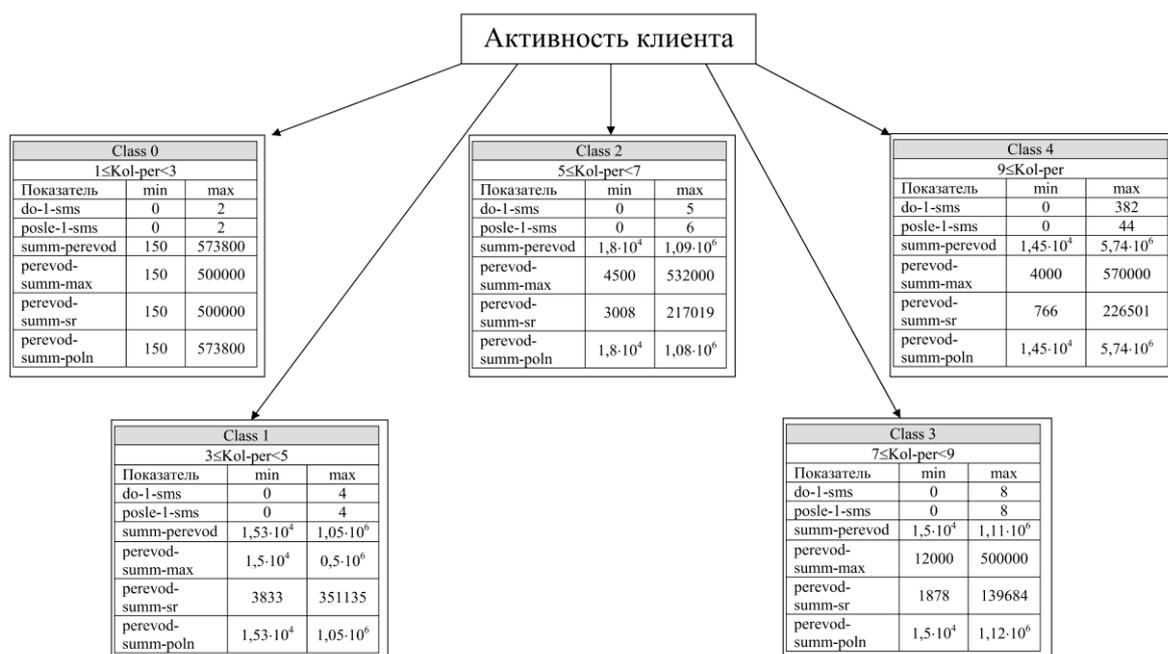


Рис. 2 - Диаграмма классов активности клиента

Каждый класс можно охарактеризовать следующим образом:

- class 0 - низкая. Клиент не активен, количество переводов составляет 1- 2, сумма перевода соответствует или близка к сумме кредита, т.е. кредит гасится за минимальное количество транзакций. Это видно если проанализировать верхние показатели по максимальной, средней сумме перевода. В этом случае количество смс, направляемые клиенту равно количеству переводов.

- class 1 - умеренная. Клиенты, принадлежащие к этой группе, характеризуются неравномерностью по суммам переводов. Количество переводов не превышает 5, а средний размер перевода составляет от 3833 до 351135 руб. В этой группе клиентов практически вдвое выше полная сумма перевода, при этом верхняя граница максимальной суммы одной транзакции такая же как и для клиентов с низкой активностью.

- class 2 - средняя. Центральная совокупность клиентов характеризуется средними показателями по числу переводов и суммами переводимых денежных средств. Видно, что 1-2 смс сообщения могут перевести клиента из переводить клиента из предыдущего класса в данную совокупность.

- class 3 - высокая. Этот класс клиентов будем считать пограничным для большинства клиентов. Здесь присутствуют клиенты осуществляющие от 7 до 9 транзакций. Данное увеличение закономерно снижает среднюю сумму перевода, так как тело кредита изменяется незначительно. Можно увидеть, что уже проявляется рост неравномерности осуществления денежных переводов.

- class 4 - сверхвысокая. Эта группа клиентов особенная и малочисленная. Сюда были отнесены состоятельные заемщики, так как максимальная сумма кредита в более чем 5 раз выше, чем предыдущих совокупностях, а также клиенты, которым организация направляла значительное количество смс сообщений. Это говорит о том, что часть клиентов в этой группе недисциплинированные, раз приходится им напоминать о необходимости погашения части взятых на себя денежных обязательств.

Видно, что смс сообщения посылаемые клиенту является действенным способом увеличения количества переводов денежных средств в счет погашения кредита. Особенностью предлагаемого подхода является то, что он позволяет выявить недисциплинированных клиентов среди совокупности потенциально хороших клиентов. В целом уменьшение количества клиентов, с которыми придется активно взаимодействовать позволит снизить эксплуатационные затраты на смс оповещения и сэкономят время службы поддержки клиентов кредитной организации.

В результате проведенных исследований возможности построения модели кредитного скоринга на основе апостериорных данных, нами получены следующие результаты:

- доказана возможность построения достаточно точной, с вероятностью более 80% модели, характеризующей дисциплину клиента финансовой организации;

- наиболее важными признаками в модели являются те, которые отражают финансовое состояние клиента, блок 1. Остальные факторы являются менее значимыми.

- при построении модели необходимо отдать предпочтение алгоритмам бустинга. Несмотря то, что существует вероятность ошибочного построения классификатора при использовании данных алгоритмов, и что было подтверждено в ходе исследования, уход алгоритма в переобучение, тем не менее, они показали себя более адекватными для данного набора факторов. Устранить недостатки алгоритма бустинга можно используя кросс-проверку, что и было сделано при построении модели, но это увеличило время работы алгоритма.

- выявлена взаимосвязь между количеством адресуемых клиенту смс сообщений и его активностью по погашению своих обязательств перед кредитной организацией и построена модель поведенческого скоринга.

Список литературы

1. *Naeem S.* Credit risk scorecards: developing and implementing intelligent credit scoring. — Hoboken, New Jersey : John Wiley, Sons, 2006. — 208 p.
2. *Lewis E.* An introduction to credit scoring. — San Rafael : The Athena Press, 1992. — 172 p.
3. *Allison P.* Logistic regression using the SAS system: theory and application. — Cary, NC : SAS Institute, 1999. — 303 p.
4. *Anderson R.* The credit scoring toolkit: theory and practice for retail credit risk. — New York : Oxford University press, 2007. — 790 p.
5. *Paleologo G., Elisseeff A., Antonini G.* Subagging for Credit Scoring Models // European Journal of Operational Research. — 2010. — Vol. 2, no. 201. — P. 490–499. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221709001532>.
6. *Javier M.* An Introduction to Credit Scoring For Small and Medium Size Enterprises. — NW Washington : The World Bank Group, 2008. — 47 p. — URL: <https://siteresources.worldbank.org/EXTLACOFFICEOFCE/Resources/870892-1206537144004/MarquezIntroductionCreditScoring.pdf>.
7. *Liu Y.* The evaluation of classification models for credit scoring / ed. by P. D. M. Schumann. — Göttingen : Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Wirtschaftsinformatik, 2002. — 65p. — (Arbeitsbericht Nr. 02/2002). — URL: <http://docplayer.net/20232306-The-evaluation-of-classification-models-for-credit-scoring.html>.
8. *Ravi V.* Advances in banking technology and management: impacts of ICT and CRM. — Hershey, PA : Information Science Reference, 2008. — URL: https://books.google.ru/books?id=5h3ZF7bOx0kC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
9. *Naeem S.* Intelligent Credit Scoring: Building and Implementing Better Credit Risk Scorecards. — Hoboken, New Jersey : John Wiley, Sons, 2017. — 464 p.
10. *Freund Y., Shapire R.* Experiments with a new boosting algorithm // Proceedings of the 13rd International Conference on Machine Learning. P. Morgan Cauffman. — 1996. — P. 146–148.
11. *Ester M. [et al.].* A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining: (KDD-96). — Portland, Oregon : AAAI Press, 08/02/1996. — P. 226–231. — URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3001507>.
12. *Sander J. [et al.].* Density-Based Clustering in Spatial Databases: The Algorithm GDBSCAN and Its Applications // Data Mining and Knowledge Discovery. — 1998. — Vol. 2, no. 2. — P.345–389.

05.13.11

М.Л. Долженкова канд. техн. наук, Г.А. Чистяков канд. техн. наук

Вятский государственный университет,
факультет автоматика и вычислительной техники,
кафедра электронных вычислительных машин,
Киров, gennadiychistyakov@gmail.com

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ НА ОСНОВЕ ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

В работе предлагается структура системы управления наземным беспилотным транспортным средством в основе которой лежит аппарат нечеткого логического вывода посредством продукционных правил. Отличительными особенностями рассматриваемого решения являются высокая степень модульности, а также способность к постепенному повышению качества работы в фиксированном окружении за счет использования механизма самообучения. Требуемый уровень безопасности дорожного движения достигается посредством применения контрольной нейросетевой экспертной системы.

Ключевые слова: беспилотное транспортное средство, продукционная экспертная система, самообучающаяся система, система управления автомобилем.

Введение. Темпы развития промышленности и экономики России существенным образом зависят от совершенствования транспортных средств, которые должны обеспечить повышение мобильности населения, эффективности грузопассажирских перевозок, повышение безопасности дорожного движения, а также комфортности водителей и пассажиров. Одним из перспективных направлений при решении этих задач является создание наземных беспилотных транспортных средств [1]. В 2016 году Совет по инновационному развитию и модернизации при Президенте России одобрил дорожную карту «Автонет», описывающую предложения по развитию российского рынка решений для интеллектуальных автомобилей. Существует несколько сценариев развития этого рынка, начиная с инерционного (российские потребители будут полностью применять импортные системы помощи водителю), заканчивая инновационным (наличие госпрограмм по собственной разработке подобных средств). Инновационный сценарий предполагает развитие трех основных направлений: создание системы, позволяющей контролировать транспортные потоки, разработка специализированных сенсоров и ПО, создание автономного беспилотного интеллектуального автомобиля [2].

Управление беспилотными транспортными средствами. По классификации SAE International существует шесть классов автономности систем управления транспортным средством от уровня 0 (полностью ручное управление с возможностью предупреждения об опасных ситуациях на дороге), до 5 (полностью беспилотный автомобиль). Полная автономность транспортного средства предполагает, что пользователь задает только конечный пункт маршрута, а весь процесс передвижения ложится на искусственный интеллект автомобиля. В том или ином виде функции беспилотного вождения существуют в ряде коммерчески доступных моделях автомобилей. Однако системы управления автомобилем, на которые можно было бы полностью положиться, заменив ими водителя, все еще находятся на стадии проектов. Сложность разработки обусловлена тем, что задача управления беспилотным наземным транспортом плохо формализуема, требуется постоянное сканирование окрестностей автомобиля и высокоскоростная обработка данных полученных с радаров, лидаров и других сенсоров, а так же прогнозирование маневров автомобиля в стандартных и нестандартных ситуациях (как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе), генерация всех решения должна осуществляться в режиме времени [1].

Разработка беспилотных транспортных средств переживает технологический бум в автомобильной отрасли всех ведущих стран мира. Наиболее активно работы по созданию беспилотных транспортных средств ведутся в США, Германии, Японии, Китае, Великобритании, Швеции, Франции, Корее и России. Значительный объем работ по созданию проводится по закрытой тематике в рамках оборонных заказов и по этой причине результаты исследований мало публикуются в открытой печати. Сложные наукоемкие технические решения, математический аппарат, алгоритмы управления движением, программное обеспечение отнесены к продукции двойного назначения, в этой связи необходима разработка собственной структуры системы управления автономным беспилотным наземным транспортным средством.

Структура системы. Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к системам подобного класса, является высокая степень модульности. Именно слабосвязная организация позволяет в дальнейшем максимально эффективно внедрять, поддерживать и модифицировать систему, а также использовать при необходимости альтернативные архитектурно-структурные решения. В связи с этим на первом этапе разработки был сделан вывод о целесообразности применения трехуровневой архитектурной модели, включающей в себя интеллектуальный слой, слой управления и аппаратный слой.

Интеллектуальный уровень может рассматриваться как комплекс программно-аппаратных средств, реализующих функционал по восприятию и обработке внешней информации. При этом под обработкой информации в данном случае понимается выделение характеристик значимых объектов (разметка, дорожные знаки, сигналы светофоров, расположение транспортных средств на проезжей части и прилегающей территории).

Уровень управления, инкапсулирующий сведения о внешней и внутренней среде, отвечает за организацию поведения беспилотного объекта. Формирование представления внешней среды осуществляется посредством данных, передаваемых от блоков интеллектуального слоя. Внутренняя среда определяется композицией текущих состояний электро-механических систем объекта управления.

Устройства аппаратного уровня предназначены для обеспечения взаимодействия и синхронной работы узлов объекта, а также для организации связи электро-механических систем с элементами предыдущего уровня посредством специализированных интерфейсов. Следует заметить, что составляющие уровня тесно интегрированы со штатным электронным блоком управления транспортного средства.

С точки зрения структурной организации интеллектуальный слой включает в себя следующие элементы.

1. Набор сенсоров, реализующих функционал по получению внешней информации в необработанном виде: видеопоток с камер, звуковая информация, датчики расстояния и так далее.

2. Набор блоков обработки, преобразующих полученную с сенсоров информацию в удобную для дальнейшего анализа форму и связанных с сенсорами отношением «многие ко многим».

3. Набор эффекторов, выделяющих из информации об окружающей среде требуемые данные, на основе которых уровнем управления будет сформировано внешнее состояние.

Уровень управления состоит из четырех блоков.

4. Блок выполнения задания, реализующий алгоритмы управления всей системой в целом, а также содержащий прошитую программу осуществления необходимых действий.

5. Блок навигации, реализующий функционал по взаимодействию с картами.

6. Блок принятия решений, определяющий возможность и целесообразность совершения тех или иных действий в ходе выполнения программы [3].

7. Блок безопасности, контролирующей ситуацию на предмет необходимости экстренного вмешательства в управление при вероятности возникновения аварийной ситуации. Является системой жесткого реального времени. С точки зрения организации представляет собой набор искусственных нейронных сетей, предназначенных для выявления определенных

маркеров.

Аппаратный уровень включает в себя следующие элементы.

8. Электро-механические системы объекта управления с набором интерфейсов для взаимодействия с ними.

9. Блок управления исполнительными устройствами.

10. Блок агрегации, предоставляющий уровню управления данные о системах объекта, на основании которых формируется внутреннее состояние.

Схематично рассмотренная структура представлена на рисунке 1.

Структура блока принятия решений. Наибольший интерес представляет структурная организация блока принятия решений, изображенного на рисунке 2.

Основным назначением блока является, во-первых, определение возможности осуществления в конкретный момент времени действия, предусмотренного программой (например, выполнение остановки в разрешенном месте), а во-вторых, формирование реакции на изменение обстановки, обусловленное поведением других участников дорожного движения.

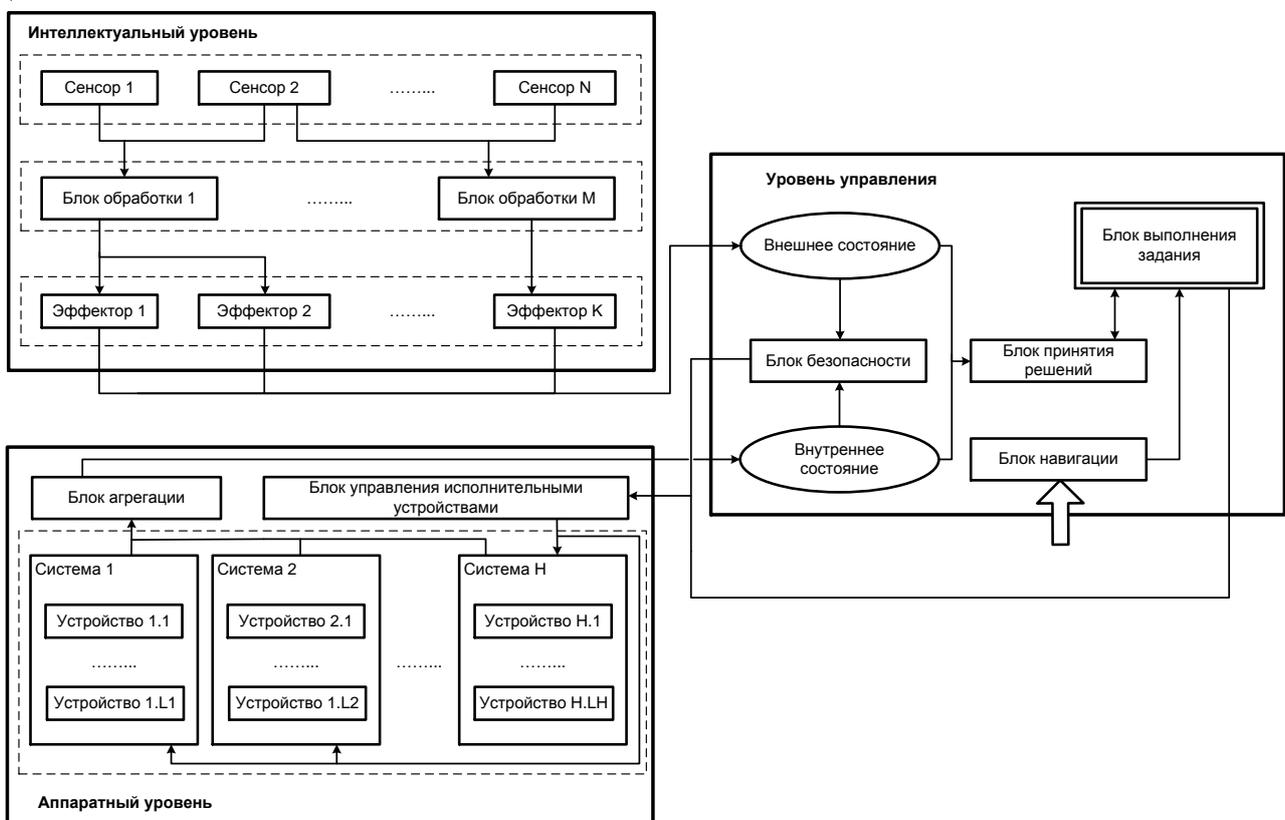


Рис. 1 – Структура системы управления беспилотным наземным транспортным средством

Для решения данных задач используется система нечетких продукционных правил [4], сгруппированных в соответствии с типовыми ситуациями (необходимость выполнения разворота, необходимость постановки транспортного средства на стоянку, проезд регулируемого перекрестка в заданном направлении и так далее). При этом одно и то же правило может использоваться при осуществлении вывода в нескольких ситуациях.

Выбор множества правил, применяемых для определения следующего совершаемого действия, а также построение деревьев вывода выполняется модулем формирования запроса.

Модуль агрегации результата анализирует весовые коэффициенты вердиктов, полученных в каждой из ветвей вывода, и, посредством построения их композиции, устанавливает команду, передаваемую в блок выполнения задания.

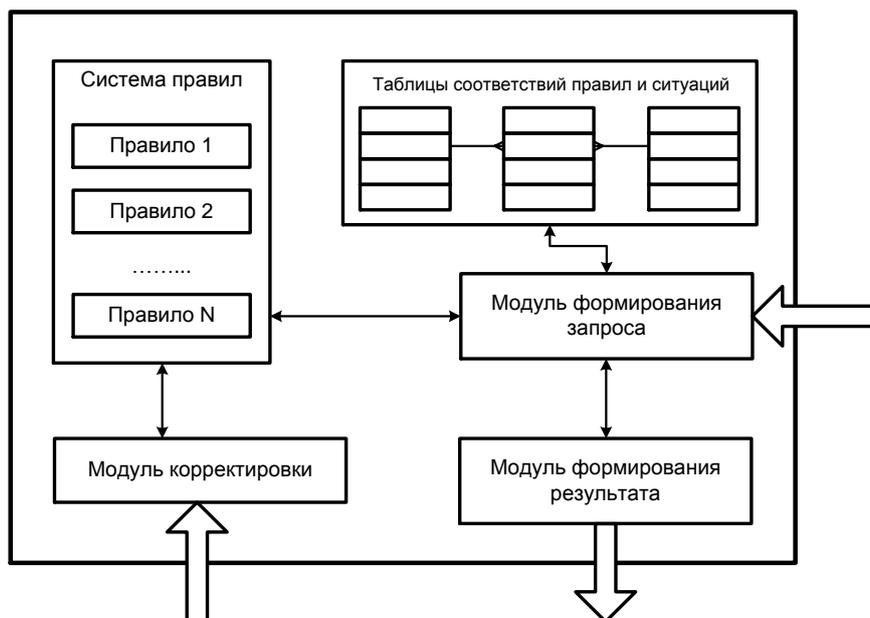


Рис. 2 – Структурная организация блока принятия решений

В случае неуспешной реализации предусмотренного действия (например, аварийная остановка по сигналу блока безопасности), модуль корректировки, осуществляя обратный вывод, идентифицирует правила, оказавшие влияние на принятие решения о выполнении данной команды, и понижает их весовые коэффициенты. Таким образом, используемая в блоке принятия решения экспертная система относится к классу самообучаемых систем с обратной связью.

Заключение. Предложенная структура системы управления наземным беспилотным транспортом является одним из вариантов возможных архитектурно-структурных решений и может быть использована в дальнейших разработках как целиком, так и модульно. Наиболее интересным блоком структуры является система принятия решений, позволяющая на базе ранее установленных умозаключений и «опыта» экспертной системы формировать новые правила для системы управления. Это особенно актуально в случаях, когда решения нельзя принять только на основе информации полученной от внешних датчиков, что критично при возможном отсутствии дорожной разметки, низкой различимости дорожного полотна, при наличии дорожного трафика и помех движению в условиях недостаточной видимости.

Список литературы

1. Дьяков, А.С. Анализ отечественного и зарубежного опыта создания безэкипажных наземных транспортных средств специального назначения // Труды НАМИ. № 4 (271), 2017, с. 75-90.
2. Нагайцев, М.В., Сайкин, А.М., Ендачев, Д.В. «Беспилотные» автомобили – этапы разработки и испытаний // Журнал автомобильных инженеров. №5 (76), 2012, с. 32-39.
3. Рассел, С., Норвиг, П. Искусственный интеллект. Современный подход // М.: Вильямс, 2018. 1408 с.
4. Махортов, С.Д. Математические основы искусственного интеллекта теория LP-структур для построения и исследования моделей знаний продукционного типа // М.: МЦНМО, 2009. 301 с.

05.13.18

А.А. Кротких, П.В. Максимов канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
кафедра «Вычислительная математика и механика»,
Пермь, andrei.krotkih@gmail.com

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО АЛГОРИТМА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ, НЕ ТРЕБУЮЩЕГО ПРОЦЕДУРЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Работа посвящена анализу популярного метода топологической оптимизации SIMP, активно применяемого при проектировании облегченных изделий, изготавливаемых при помощи аддитивных технологий, анализу его эффективности, недостатков и преимуществ. В работе представлен новый метод топологической оптимизации и выполнена его верификация. Предложен алгоритм топологической оптимизации, для решения которой нет необходимости прибегать к фильтрации решения задачи методом конечных элементов. Алгоритм был реализован, его результаты проанализированы при различных параметрах на примере плоской задачи механики деформированного твердого тела.

Ключевые слова: аддитивные технологии, SIMP, топологическая оптимизация, 3D печать.

Введение

Методы топологической оптимизации (ТО) применяются в широком спектре проблем, в частности, при решении задач магнитостатики, теплопроводности, механики деформируемого твёрдого тела для определения наиболее эффективной топологии объекта, исходя из его назначения и набора действующих факторов [1]. Основная идея всех методов оптимизации заключается в выборе целевой функции и управляющих параметров для нахождения минимума выбранной функции на области допустимых значений управляющих параметров [1]. В настоящее время широкое применение методов ТО в различных сферах обусловлено постоянно развивающимися аддитивными технологиями или технологиями 3D-печати, позволяющими воспроизводить объекты произвольных форм и любой сложности, что было невозможно ранее с использованием стандартных (субстративных) технологий обработки материалов [2].

Анализ популярных методов топологической оптимизации

В области решения задач механики деформируемого твёрдого тела широко используются два метода топологической оптимизации на основе конечно-элементного представления исследуемого объекта: метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) и метод BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) [1]. Основная идея обоих методов заключается во введении поля виртуальной плотности, от которого меняются свойства исследуемого объекта. Отличие этих методов друг от друга в том, что SIMP метод вводит интервал значений поля виртуальной плотности от 0 до 1, а метод BESO определяет поле плотности дискретно: допустимы только значения 0 и 1 [1,2].

Рассмотрим постановку задачи механики деформируемого твёрдого тела для метода SIMP. Существует некоторое разбиение объекта на конечные элементы. В каждом конечном элементе задаётся неизвестная величина ρ_i , которая является значением поля виртуальной плотности во всём конечном элементе. Введём следующую зависимость локальной матрицы жёсткости конечного элемента от значения виртуальной плотности в этом элементе:

$$E(\rho_i) = E_{\min} + \rho_i^p (E_0 - E_{\min}), \quad (1)$$

где E_0 – модуль Юнга материала в данной точке, E_{\min} – очень маленькое значение модуля Юнга, вводится для предотвращения сингулярности глобальной матрицы жёсткости, p – штрафной коэффициент, обычно равен 3, вводится для гарантированного «чёрно-белого» решения [1,3].

Введём целевую функцию, которую необходимо будет минимизировать на всей области допустимых значений управляющих параметров:

$$\min c(\vec{\rho}) = \sum_{i=1}^N E(\rho_i) u_i^T k_0 u_i, \quad (2)$$

где c – целевая функция податливости исследуемого объекта, N – количество конечных элементов, u_i – вектор локальных неизвестных конечного элемента, k_0 – нормированная матрица жёсткости.

При этом необходимо понимать, что должны соблюдаться конечно-элементные соотношения из конечно-элементного решения задачи теории упругости, а также ограничения на значения плотности в каждом элементе, кроме того, вводится дополнительное ограничение на отношение итогового количества материала к изначальному:

$$\begin{cases} \frac{V_f}{V_0} = f \\ KU = F \\ \rho_{\min} < \rho_i < 1 \end{cases}, \quad (3)$$

где V_f – итоговое количество материала в области, V_0 – изначальное количество материала в области, f – коэффициент уменьшения массы, K – глобальная матрица жёсткости, U – глобальный вектор узловых неизвестных, F – глобальный вектор узловых сил, ρ_{\min} – минимально возможное значение виртуальной плотности в области.

Итерационная процедура SIMP метода выглядит следующим образом:

$$\rho_i^{j+1} = \begin{cases} \max(0, \rho_i^j - m), \text{ if } \rho_i^j B_i^\eta < \max(0, \rho_i^j - m) \\ \min(1, \rho_i^j + m), \text{ if } \rho_i^j B_i^\eta > \min(1, \rho_i^j + m) \\ \rho_i^j B_i^\eta \end{cases}, \quad (4)$$

где m – шаг значения плотности, B_i – коэффициент чувствительности целевой функции, η – штрафной коэффициент, обычно равен 0.5 [3].

Используя алгоритм (4) мы будем получать стандартные результаты SIMP метода, в которых будет проявляться эффект «шахматной доски». Для удаления эффекта шахматной доски рекомендуется использовать специальные алгоритмы фильтрации внутри итераций алгоритма топологической оптимизации.

Новый алгоритм топологической оптимизации

Авторами работы предлагается устранить необходимость в фильтрационном алгоритме, модифицируя стандартный SIMP метод. Введём во всей области исследуемого объекта поле виртуальной плотности. Разобьём область конечными элементами и положим поле виртуальной плотности дискретным. Установим зависимость параметров материала в конечных элементах от значения плотности следующим образом:

$$C_i^\rho = C_i f(\rho_i), \quad (5)$$

где $f(\rho_i)$ – любая степенная функция, C_i – матрица жёсткости i -го конечного элемента.

Введём следующую целевую функцию податливости, которую необходимо минимизировать на всей области допустимых значений виртуальных плотностей:

$$\min c(\vec{\rho}) = \sum_{i=1}^N u_i^T C_i^\rho u_i,$$

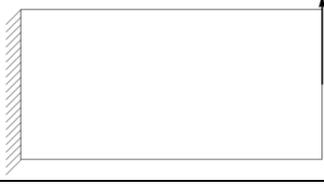
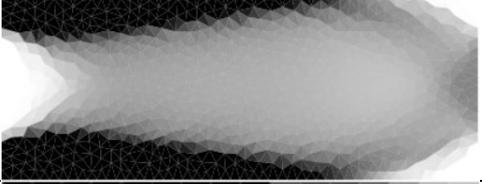
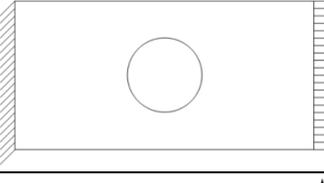
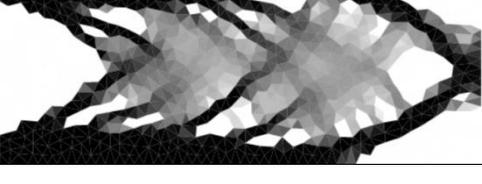
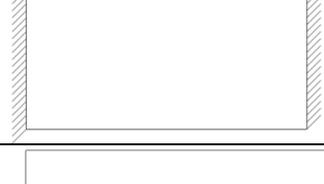
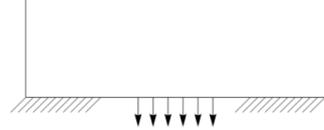
где c – целевая функция податливости исследуемого объекта, N – количество конечных элементов, u_i – вектор локальных неизвестных конечного элемента.

Введём необходимые ограничения для данной задачи:

$$\begin{cases} 0 \leq f(\rho_i) \leq 1 \\ \sum_{i=1}^M \rho_i V_i + \sum_{j=1}^H V_j \leq k \sum_{i=1}^N V_i, \\ CU = F \end{cases} \quad (6)$$

где C – глобальная модифицированная матрица жёсткости, U – глобальный вектор узловых неизвестных, M – количество элементов, внутри которых мы имеем возможность изменять плотность, H – количество элементов, внутри которых плотность неизменна в соответствии с условиями задачи, k – коэффициент уменьшения массы.

Итоговая задача представляет собой типичную задачу оптимизации – нахождение глобального минимума целевой функции. Использовались конечные элементы 1-го и 2-го порядка, треугольной и квадратной формы. Для решения задачи оптимизации авторы предлагают использовать метод внутренней точки. При решении задачи были проанализированы различные постановки задач, проанализировано влияние топологии конечных элементов на итоговый результат.

Параметры конечных элементов	Схема нагружения	Результат топологической оптимизации
Треугольные конечные элементы 1-го порядка с линейной функцией f		
Треугольные конечные элементы 2-го порядка с линейной функцией f		
Треугольные конечные элементы 2-го порядка с линейной функцией f		
Треугольные конечные элементы 2-го порядка с квадратичной функцией f		
Треугольные конечные элементы 2-го порядка с кубической функцией f		
Квадратные конечные элементы 2-го порядка с кубической функцией f		

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Проблема шахматной доски проявляется при решении задачи топологической оптимизации в такой постановке, но её можно решить, увеличив порядок аппроксимации поля перемещений в конечном элементе.
- Предложенный алгоритм способен решать задачи с областями, в которых имеются вырезы.
- Результаты алгоритма верифицируются на существующих известных решениях SIMP метода.

Заключение

Авторами работы воспроизведен и проанализирован популярный алгоритм топологической оптимизации - SIMP метод. Предложен новый подход к решению задачи оптимизации, предложена методика решения задачи ТО, разработан алгоритм, позволяющий решать задачи топологической оптимизации в данном подходе, проанализированы результаты алгоритма на различных примерах плоской задачи МДТТ при разных способах построения конечно-элементной сетки.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «ПНИПУ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0168 от 01.12.2015 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. *Bendsoe M.P.* Topology Optimization Theory, Methods and Applications Bondsoe M.P., Sigmund O; Topology Optimization – Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2002.
2. *M. Bendsoe, E. Lund, N. Olhoff, and O. Sigmund*, “Topology optimization-broadening the areas of application,” *Control Cybern.*, vol. 34, no. 1, pp. 7–35, 2005.
3. *J. Koga, J. Koga, and S. Homma*, “Checkerboard Problem To Topology Optimization of continuum structures,” 1999.

05.13.18

П.В. Максимов канд. техн. наук, А.А. Кротких, Б.И. Ронжин

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
кафедра «Вычислительная математика и механика»,
Пермь, andrei.krotkih@gmail.com

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА НА БАЗЕ LEVEL-SET МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Рассматривается вопрос применимости алгоритма топологической оптимизации на базе level-set метода в моделировании авиационных деталей. Алгоритм реализован в дискретной форме в двумерной постановке на основе гипотезы однородности и изотропности среды. Проанализированы преимущества и недостатки level-set метода в сравнении с гомогенизационными методами.

Ключевые слова: *level-set метод, топологическая оптимизация, аддитивные технологии.*

Топологическая оптимизация – процесс определения топологии исследуемого объекта, удовлетворяющей заданным критериям и условиям задачи. В общем случае, топологическая оптимизация представляет из себя класс задач оптимизации функций. Исследуемый объект можно характеризовать различными свойствами, которые зависят от его формы. При решении задачи с произвольной топологией мы будем получать различные решения, которые можно описать с помощью обобщенных критериев. Например, в задачах теории упругости такой величиной может быть энергия формоизменения, в задачах теплопроводности – суммарный тепловой поток через границы тела. В рамках задач топологической оптимизации в явном виде определяется зависимость обобщенного критерия от топологии объекта и производится минимизация этой величины по допустимому полю значений аргументов, которое определяется исходя из условий задачи.

В области авиадвигателестроения количество методов топологической оптимизации и примеров их успешного использования увеличивается с каждым годом, что связано с активным развитием и внедрением аддитивных технологий в цикл производства авиационных конструкций. Основной задачей применения методов топологической оптимизации в авиакосмической промышленности можно назвать уменьшение веса конструкции с сохранением прочностных и эксплуатационных характеристик. Примерами этому могут послужить guide-weight метод, способный решать задачи топологической оптимизации с учётом собственного веса конструкции и сил инерции, и level-set методы, которые позволяют получать решение или итоговую модель в аналитическом представлении. Данные методы используют совершенно иные подходы, нежели гомогенизационные методы, основанные на понятии виртуальной плотности. Необходимость разработки новых методов и их модификаций обусловлена тем, что решения, построенные с помощью старых методов, имеют ряд недостатков, которые не позволяют их использовать при разработке авиационных деталей. Такими проблемами могут являться:

- Появление эффекта «шахматной» доски, когда область тела перестаёт быть связной и конечные элементы касаются друг друга только узлами;
- Численная нестабильность, появляющаяся при решении задач с силами инерции, приводящая к появлению различных «артефактов»;
- «Рваные» границы тела, которые не позволяют сразу использовать итоговое решение, есть необходимость доработки детали с помощью алгоритмов сглаживания перед окончательным проектированием.

Для преодоления подобных недостатков разрабатываются отдельные алгоритмы фильтрации, которые позволяют использовать решения, построенные с помощью гомогенизационных методов, в цикле производства деталей. В рамках данной работы будет рассмотрен один из алгоритмов топологической оптимизации, основанный на level-set

методе. Выбор метода обусловлен тем, что его решения в дискретной постановке позволяют представить их в аналитической форме, что является важным преимуществом при разработке деталей ГТД.

Сформулируем математическую постановку задачи топологической оптимизации в рамках задачи механики деформируемого твёрдого тела следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } J(u) &= \int_D F(u) d\Omega, \\ \int_D E_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} d\Omega &= \int_D p u d\Omega + \int_{\partial D_\tau} \tau u dS, \\ u|_{\partial D_u} &= u_0 \forall u \in U, \\ \int_D d\Omega &\leq V_{\max}; \end{aligned} \quad (1)$$

где D – область исследуемого тела, ∂D – граница тела, ∂D_u – граница тела с приложенными кинематическими условиями, ∂D_τ – граница тела с приложенными силовыми условиями, u – перемещения, U – поле кинематически допустимых перемещений, E_{ijkl} – тензор упругости, ε_{ij} – тензор деформаций, p – массовые силы, τ – силы на границе тела, u_0 – кинематические граничные условия, V_{\max} – максимально допустимый объём, J – работа внешних сил.

Необходимо переформулировать постановку (1) так, чтобы с помощью level-set метода можно было построить задачу минимизации. Пусть существует скалярная функция Φ определённая в R^n , тогда существует изоповерхность функции Φ : $S = \{x : \Phi(x) = k\}$, где x – координаты точки на изоповерхности, k – значение скалярной функции, равное константе для произвольной изоповерхности. Назовём эту поверхность level-set моделью. Процесс структурной оптимизации можно описать как эволюцию level-set модели во времени: $S = \{x(t) : \Phi(x(t), t) = k\}$. В данном случае изоповерхности S и есть всевозможные решения алгоритма на базе level-set метода. Продифференцировав это выражение, мы получим уравнение Гамильтона-Якоби:

$$\frac{\partial \Phi(x, t)}{\partial t} + \nabla \Phi(x, t) \frac{dx}{dt} = 0 \quad (2)$$

С помощью (2) мы можем представить процесс структурной оптимизации следующим образом: пусть $\frac{dx}{dt}$ – движение произвольной точки изоповерхности в направлении оптимума. Тогда оптимальным решением задачи структурной оптимизации будет решение дифференциального уравнения относительно Φ :

$$\frac{\partial \Phi(x)}{\partial t} = -\nabla \Phi(x) \Gamma(x, \Phi), \quad (3)$$

где $\Gamma(x, \Phi)$ – «вектор скорости» изоповерхности, определяемый из условий решаемой задачи.

Пусть level-set функция Φ определена следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi(x) &> 0 \forall x \in D \setminus \partial D \\ \Phi(x) &< 0 \forall x \in \bar{D} \setminus D \end{aligned} \quad (4)$$

Функция $\Phi(x)$ может определяться разным образом, главное условие – равенство нулю на границе тела. Поскольку начальная топология тела считается известной, определить функцию перед решением задачи Φ можно всегда. В итоге задача оптимизации формы сводится к нахождению такой изоповерхности скалярной функции Φ , что значение целевой функции достигает экстремума. С учётом (2-4) мы можем переформулировать постановку задачи структурной оптимизации в терминах level-set метода следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } J(u, \Phi) = \int_D F(u)H(\Phi)d\Omega, \\
 & \int_D E_{ijkl}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{kl}H(\Phi)d\Omega = \int_D p\nu H(\Phi)d\Omega + \int_{\partial D_i} \tau\nu\delta(\Phi)|\nabla\Phi|dS, \\
 & u|_{\partial D_n} = u_0 \forall u \in U, \\
 & \int_D H(\Phi) \leq V_{\max};
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Самое важное - Level-set метод позволяет в ходе решения задачи получить решение в виде топологически гибкой модели. Изоповерхность S способна самостоятельно образовывать новые границы внутри своей области и объединять их. Способов численной реализации level-set метода очень много. Это связано с тем, что алгоритм, реализующий оптимизацию с помощью level-set метода, условно можно поделить на 5 этапов, каждый из которых можно модифицировать различными способами. В частности, есть варианты реализации алгоритма level-set метода такие, что они не способны образовывать новые границы внутри себя (рис.1), но при этом сходятся к оптимальному решению гораздо быстрее. В большинстве своём задача МДТТ решается с помощью метода конечных элементов, поэтому существуют различные способы связи свойств тела, описанных с помощью конечно-элементных соотношений, с геометрией изоповерхности. Стоит отметить, что level-set метод позволяет достаточно просто описывать задачи в мультиматериальной постановке с учётом нелинейной упругости.

В данной работе авторы реализовали level-set метод в дискретной постановке, в прикладном пакете Wolfram Mathematica V 11.3. В рамках реализации проанализировано получение различных решений с использованием и без определения чувствительности формы тела, которая обуславливает топологическую гибкость метода.

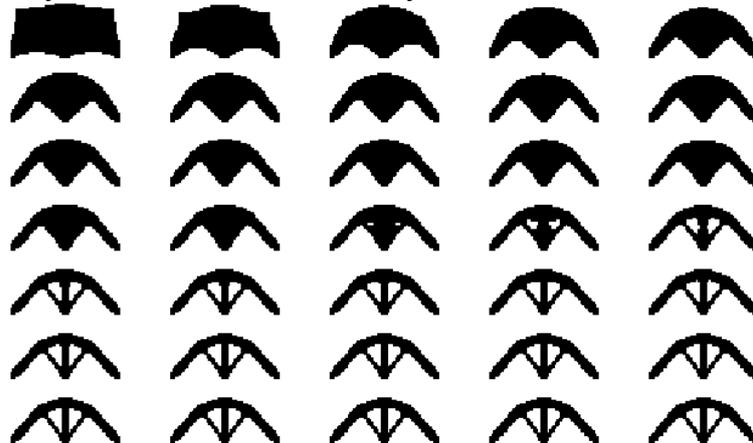


Рис.1 Пример изменения изоповерхности при решении двумерной задачи оптимизации с использованием определения чувствительности формы тела

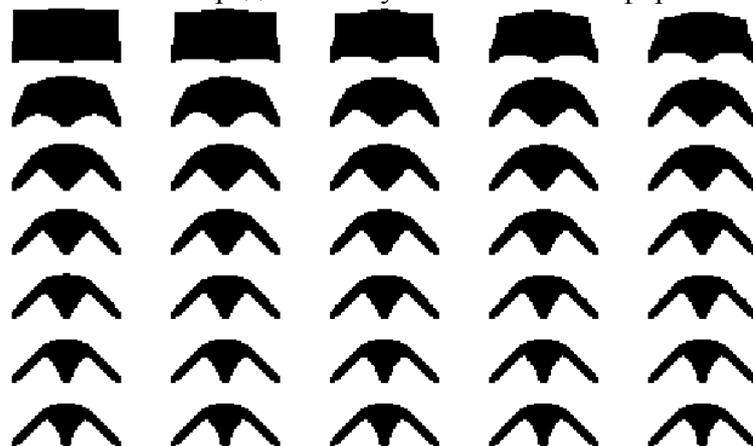


Рис.2 Пример изменения изоповерхности при решении двумерной задачи оптимизации без использования определения чувствительности формы тела

Рис. 1 и рис. 2 качественно показывают процесс эволюции level-set модели объекта при использовании различных алгоритмов level-set метода. Результат решения level-set метода в дискретной постановке требует дальнейшей обработки решения в виде построения конечной формы level-set функции, которая строится с помощью базисных функций. Результатом в данном случае будет аналитическое представление level-set модели. Авторы в данной реализации метода использовали линейные базисные функции локального класса:

$$\varphi = \sum_i N_i^{LIN} \varphi_i, \quad (6)$$

где N_i^{LIN} – локальная базисная функция определённая в i -ой точке level-set модели.

Стоит отметить, что level-set метод имеет ряд преимуществ при проектировании облегченных деталей ГТД. Практически не требуется дополнительная обработка модели, как, например, после гомогенизационных методов. Результатом является аналитическая поверхность, которую можно использовать при дальнейшей работе в инженерно-прикладных пакетах.

Заключение

1. Level-set метод позволяет получить решение в виде гладкой функции.
2. Решение получается связным и физически обоснованным.
3. Метод позволяет решать широкий спектр задач структурной оптимизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0168 от 01.12.2015 г. в составе мероприятия по реализации Постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. *G. Allaire, F. Jouve, and A. M. Toader*, Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method, vol. 194, no. 1. 2004.
2. *V. J. Challis*, “A discrete level-set topology optimization code written in Matlab,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 41, no. 3, pp. 453–464, 2010.
3. *M. Wang, X. Wang, and D. Guo*, “A level set method for structural topology optimization,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 192, pp. 227–246, 2003.

05.13.06

Н.А. Москат канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
кафедра «Вычислительной техники и АСУ»,
Ростов-на-Дону, Nancy-Rostov@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРАФИКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ СКОРОСТНЫМ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ Ж.Д.Т.

Представлен проект Российской системы управления движением поездов на высокоскоростных магистралях. Обоснована актуальность создания моделей информационно-управляющих систем ж.д.т., анализа их трафика. Представлена методика возможности экспериментальной оценки параметров информационных потоков, обладающих свойствами самоподобия и долговременной зависимости.

Ключевые слова: *информационная технология, ВСМ, трафик, самоподобие, долговременная зависимость.*

Введение

В век информационных технологий невозможно обойтись без прогрессивных методов ведения бизнеса. Растущая потребность населения в наиболее мобильных средствах передвижения вкупе с возрастающей загруженностью автомобильной инфраструктуры требует выработки долгосрочных решений, предполагающих повышения эффективности ж.д. системы. Одним из инструментов решения данного вопроса служит развитие скоростных и высокоскоростных магистралей (ВСМ).

В рамках развития высокоскоростного движения предполагается апробация основных прогрессивных технологий, обмен опытом с зарубежными партнерами, а также создание дополнительных рабочих мест.

Под высокоскоростной магистралью понимают новую специализированную железнодорожную линию, предназначенную для поездов со скоростями движения от 200 до 400 км/ч. Под скоростным движением – перевозку пассажиров со скоростями от 140 до 200 км/ч по модернизированным существующим линиям [1].

С конца 2009 года уже функционируют поезда скоростного и высокоскоростного движения в Московской, Тверской, Новгородской, Ленинградской, Владимирской и Нижегородской области.

Пути развития ВСМ предусматривает «Программа развития скоростного и высокоскоростного движения на сети железных дорог ОАО «РЖД» на перспективу до 2020 года», а также «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года».

Предполагаемые линии высокоскоростного и скоростного движения представлены на рис.1.

В рамках программы предусмотрена реализация 20 проектов организации ВСМ/СМ, что позволит организовать более 50 скоростных маршрутов. Общая протяженность скоростных и высокоскоростных магистралей превысит 7000 км. Прибыль от реализации Программы для ОАО «РЖД» - более 1,5 трлн руб.

Ещё одним крупным проектом ВСМ является «Евразия». Цель проекта состоит в формировании скоростного грузопассажирского коридора для перемещения грузов и пассажиров между Китаем и Европой

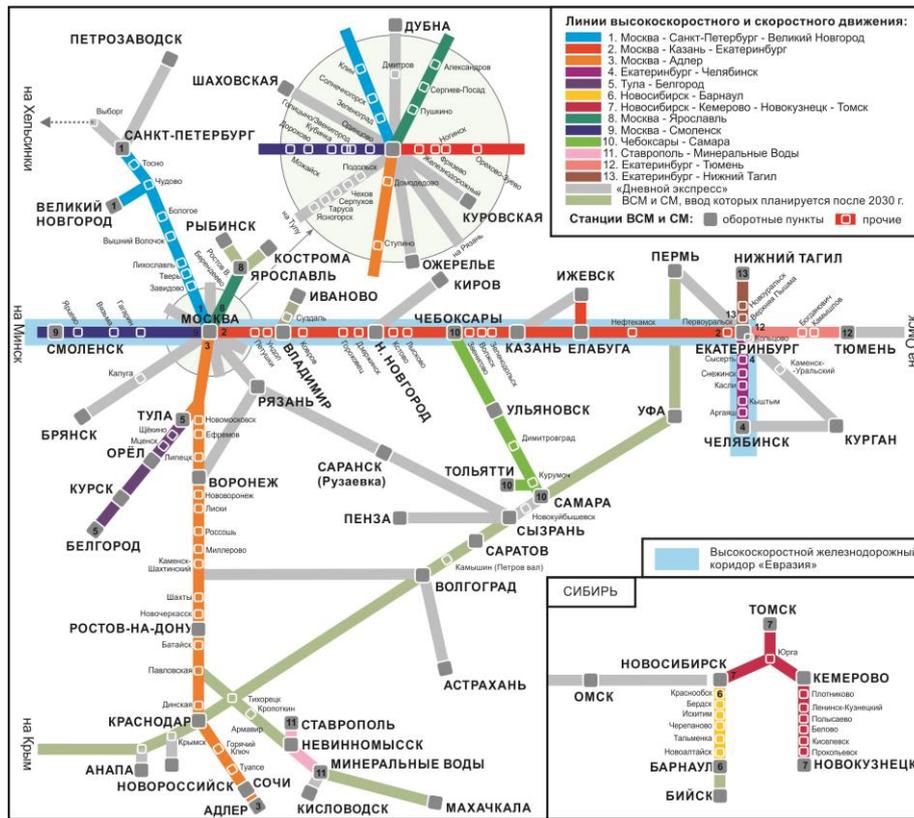


Рис. 1 – Линии высокоскоростного и скоростного движения программы ОАО «РЖД».

Постановка задачи

Управление движением поездов ВСМ предполагает проект Российской системы управления и обеспечения безопасности движением поездов на высокоскоростных магистралях РСУДП ВСМ (RTCS400) – рис. 2

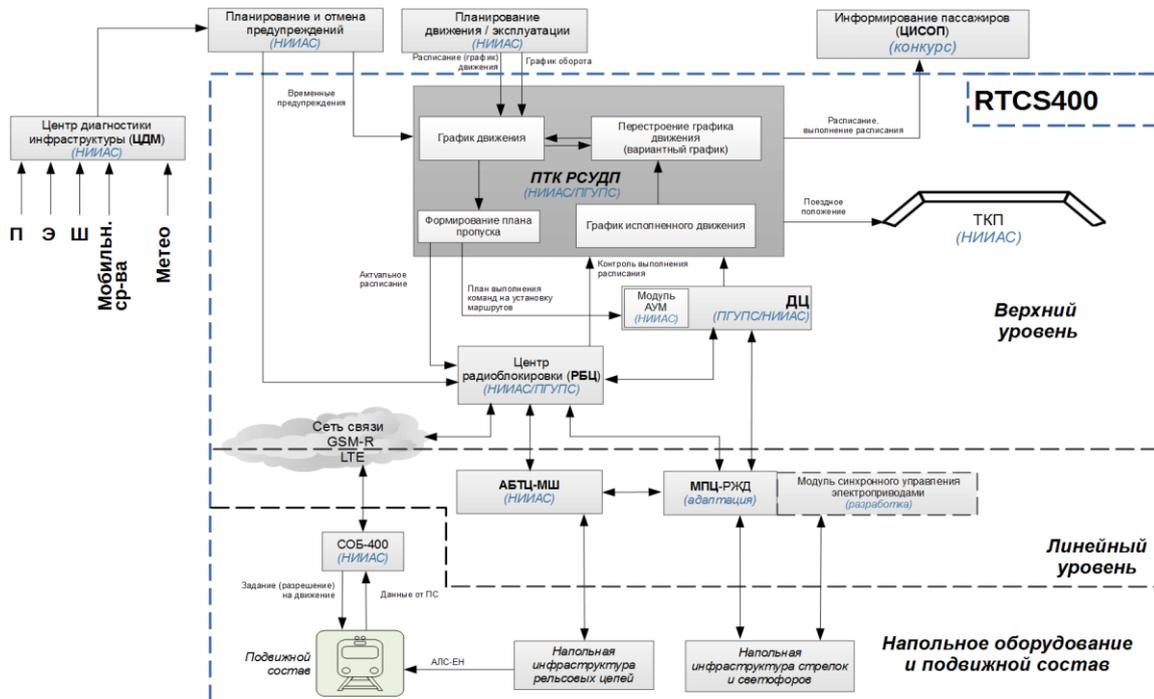


Рис. 2 – Проект Российской системы управления движением поездов

Указанная система предусматривает три уровня:

- верхний уровень – диспетчерский, ядром которого служит программно-технический комплекс российской системы управления движением поездов ПТК РСУДП;

– линейный уровень – станционный, включающий адаптированную систему микропроцессорной централизации (МПЦ), систему интервального регулирования и обеспечения безопасности движения, увязку с верхним уровнем;

– нижний уровень представлен напольным оборудованием, а также бортовыми устройствами подвижного состава.

Предполагается взаимодействие указанной системы с основными информационно-управляющими системами ж.д.т – рис. 3

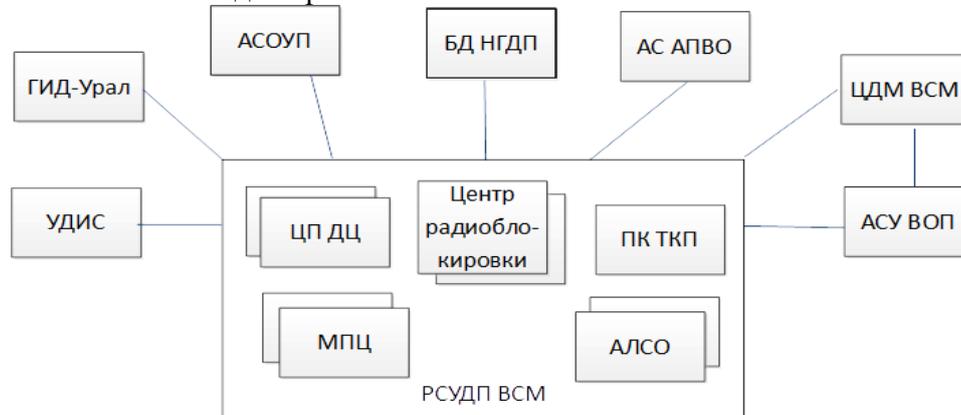


Рис. 3 – Схема взаимодействия РСУДП ВСМ

Информация от станций должна передаваться в Центр диспетчерского управления по резервированным каналам и содержать данные о местоположении подвижных единиц, состоянии объектов подсистем электрической централизации, интервального регулирования и других устройств, необходимые для принятия управляющих решений [2].

При помощи магистральной сети передачи данных, строящейся на основе волоконно-оптических линий связи, осуществляется объединение подсистем в единый комплекс. При этом предусматриваются соответствующие требования по защите данных. Для связи с бортовыми устройствами подвижных высокоскоростных транспортных средств должны использоваться резервированные цифровые радиоканалы, а также индуктивные рельсопроводные каналы доставки информации от традиционных подсистем железнодорожной автоматики.

Для удовлетворения всех вышеперечисленных требований необходимо создание ряда моделей информационно-управляющих систем ж.д.т как на этапе создания данных систем, так и на этапе их функционирования, методы повышения эффективности транспортных систем [3].

Одной из особенностей транспортных систем является периодичность \ однотипность информации, связанная с сезонностью, суточной, квартальной отчетностью. Регулярно строятся прогнозы по ряду показателей. Проводится анализ по основным показателям транспортных информационно-управляющих систем, в том числе и трафику.

Определение самоподобного процесса

Распространенной практикой в процессе создания моделей, предполагающих использование теории очередей, является допущение о том, что информационные потоки автоматизированных информационно-управляющих систем (в том числе транспортных) являются простейшими. В качестве времени обслуживания заявок нередко принимается случайная величина с экспоненциальным распределением.

Однако, предположение об отсутствии последствия, являющееся непоколебимым для простейшего потока, зачастую не подтверждается практически. Далеко не во всех моделях мы можем пренебречь предысторией наступления ранее событий [4]. Типичным примером подобного рода моделей являются ситуации с телетрафиком. Здесь наблюдается свойство самоподобия – долгосрочная зависимость, в которой число наступивших на временной оси событий зависит от предыстории потока (даже в отдаленных временных интервалах). В качестве инструмента измерения подобного рода зависимости для случайных процессов принято использование корреляционной функции.

Количество наступающих в единицу времени событий рассматриваются как элементы (значения) случайного процесса. Далее, представляется случайный процесс в виде дискретной последовательности элементов. В качестве аргумента используется порядковый номер временной единицы: $X = \{X_t : t = 0, 1, 2, \dots\}$.

Предположим, что в качестве искомым случайных процессов представляются стационарные процессы, где ковариация ограничена, $Cov(X_1, X_{i+k}) = (X_1 - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X}) < +\infty$, с дисперсией $D(X) = \overline{(X_1 - \bar{X})^2} = \sigma^2$ и функцией автокорреляции $r(k) = \frac{Cov(X_t, X_{t+k})}{D(X)}$.

Чтобы определить принадлежность процесса к классу самоподобных, обладающих долговременной зависимостью, необходимо выполнить агрегацию путем усреднения данных искомого процесса на общих (пересекающихся) интервалах времени:

$$X^{(m)} = \{X_k^{(m)} : k = 1, 2, 3, \dots\}; X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{(k-1)m+i}$$

Усредненные процессы являются также стационарными с ограниченной ковариацией.

По определению [5] В.И. Неймана, «три источника и три составные части теории самоподобных процессов» определены медленным убыванием дисперсии, долгосрочной зависимостью и флуктуационным характером спектра мощности процессов подобного рода.

Медленное убывание дисперсии представлено как:

$$D(X^{(m)}) \approx am^{-\beta}, 0 < \beta < 1, m \rightarrow \infty,$$

здесь уменьшение вариации агрегированных процессов происходит медленнее, нежели величины, обратной размеру выборки.

Для процессов, обладающих свойством самоподобия, в качестве долгосрочной зависимости выступает присутствие в функции автокорреляции процесса расходимости:

$$\sum_k r(k) = \infty, r(k) \approx k^{-\beta}.$$

Процесс убывания функции автокорреляции осуществляется гиперболически медленно.

Под флуктуационным характером спектра мощности считают соответствие спектру мощности флуктуаций для электронного потока:

$$f(\omega) \approx c\omega^{-\gamma}, \omega \rightarrow 0, \gamma = 1 - \beta, \text{ где } f(\omega) = \sum_k r(k)e^{-i\omega k}.$$

Если поток обладает всеми тремя указанными свойствами, то либо данное совпадение выражено асимптотой $r(k) \rightarrow r^m k, m \rightarrow \infty$, либо функция автокорреляции данного потока точно совпадает с функциями автокорреляции агрегированных процессов $r(k) = r^m(k)$. Таким образом, для самоподобного процесса его корреляционные свойства не изменяются в случае усреднения значений на различных интервалах времени. В этом и есть основная суть самоподобия.

Степень самоподобия для случайного процесса оценивают, как правило, при помощи коэффициента Хёрста, находящегося в интервале $0,5 < H < 1$.

$$E \left[\frac{R(n)}{S(n)} \right] = cn^H, n \rightarrow \infty.$$

При значениях $H > 0,5$ зависимости персистентны. Степень зависимости тем выше, чем выше искомый коэффициент. Так, самоподобные процессы с долгосрочной зависимостью обладают данным параметром в пределах $0,7 - 0,9$. Для процессов с $H = 0,5$ свойства самоподобия нет (явная тенденция не обнаруживается). При значениях $H < 0,5$ зависимости антиперсистентны.

Определение долговременной зависимости

В самоподобных моделях иногда обнаруживается долговременная зависимость – обнаружение нетривиальных зависимостей, проявляющихся для событий, наступающих через большие временные интервалы. Вопрос наличия долговременной зависимости может

стать определяющим в процессе создания аналитических моделей, особенно сетевых.

Наиболее простым вариантом долговременной зависимости выступают модели, для которых функция автокорреляции убывает гиперболически.

Остановимся на следующих свойствах долговременной зависимости... Используем стационарный дискретный поток $X = (X_n, n = 1, 2, \dots)$. Автокорреляционная функция потока – r . Сделаем допущение о том, что процесс обладает свойством долговременной зависимости. Тогда, по определению долговременной зависимости, его автокорреляционная функция $r(k)$ несуммируема $\sum_{n \geq 1} r(n) = \infty$.

Применим к r асимптотическое приближение $r(n) \sim n^{-\beta} L(n)$, где $0 < \beta < 1$, $\left(H = 1 - \frac{\beta}{2} \right)$, L – функция, меняющаяся медленно. Имеем

$$\sum_{n \geq 1} n^{-\beta} L(n) = \infty, \quad (1)$$

здесь суммируемость (несуммируемость) является независимой от функции L . Тогда имеется возможность использовать отношение $r(n) \sim n^{-\beta} L(n)$ как определение процесса с долговременной зависимостью, для которого функция автокорреляции убывает гиперболически. Отметим также, что расходимость в формуле (1) обеспечивает невырожденную корреляционную зависимость потока $X^{(m)} = \{X_j^{(m)}, j = 1, 2, \dots\}$.

Для стационарного процесса с непрерывным временем $X = \{X_t, t \in \mathfrak{R}\}$ определить долговременную зависимость возможно также посредством функции автокорреляции

$$r(t) = \frac{\text{cov}(X(0), X(t))}{\text{Var}(X(0))}, \quad t \in \mathfrak{R}, \quad \text{где } \int_0^{\infty} r(t) dt = \infty.$$

Подводя итоги: процесс X обладает свойством долговременной зависимостью в случае несуммируемости его функции автокорреляции $\sum_k r(k) = \infty$.

Заключение

Процесс развития высокоскоростного движения предполагает использование инновационных технологий в различных областях – от современного подвижного состава до бортовых информационных систем. В процессе построения моделей транспортных систем необходимо учитывать их специфику. Характер трафика изменчив, что не всегда допускает создание «классических» имитационных моделей. Приведенная методика предусматривает возможность экспериментальной оценки параметров информационных потоков, обнаружение в них свойств автомодельности и долговременной зависимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 17-07–620-а, 18-08-00549-а.

Список литературы

1. Проекты ВСМ. URL: http://www.rzd.ru/static/public/ru/ruN.ru.ru?STRUCTURE_ID=5098 (дата обращения: 10.09.2018).
2. Специальные технические условия для проектирования и строительства ВСМ Москва-Казань, актуализированные в 2017 году.
3. Москат Н.А. Методы повышения эффективности автоматизированной системы оперативного управления на железнодорожном транспорте // Инженерный вестник Дона, 2018, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4694.
4. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и её приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
5. Нейман В.И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика // Труды МАС. – 1999. – №1 (9).

**АННОТАЦИИ
ABSTRACTS****В.В. Харьков, А.Н. Николаев
ВЫБОР МОДЕЛИ КИНЕТИКИ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА**

Ключевые слова: моделирование, CFD, периоды сушки.
Рассматривается задача повышения энергоэффективности процессов теплового удаления влаги из материала с сохранением высокого качества готовой продукции с использованием современных вычислительных средств. Выполнена систематизация существующих теоретических подходов к моделированию испарения капель и сушки материалов в дисперсном виде с учетом особенностей кинетики процесса. Выявлены характерные особенности и недостатки основных моделей. Построен универсальный алгоритм CFD расчета и анализа для использования в составе инженерного программного комплекса при численном моделировании сушильных установок.

**В.Ш. Ройтенберг
ОБ ОДНОМ СЛУЧАЕ БИФУРКАЦИЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ
ТРАЕКТОРИИ КУСОЧНО-ГЛАДКОГО ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ**

Ключевые слова: кусочно-гладкое векторное поле, периодическая траектория, бифуркационная диаграмма.
Рассматриваются кусочно-гладкие векторные поля, имеющие периодическую траекторию, касающуюся линии разрыва поля. Описаны бифуркации в окрестности этой траектории.

**Л.С. Сабитов, Н.Ф. Кашапов, И.К. Киямов
ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС)
ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ
СТЕРЖНЕЙ ОБОЛОЧЕК ЗАКРЫТОГО ПРОФИЛЯ**

Ключевые слова: высотное сооружение, численно-аналитические методы, напряженно-деформированное состояние.

На основе анализа литературы и собственного многолетнего опыта проектирования построена полная классификация высотных сооружений, разработана единая теоретическая основа для расчёта и разработки, новых более эффективных конструктивных решений, которая учитывает все особенности поведения сооружения под действием эксплуатационной нагрузки, а также ограничения, накладываемые практикой монтажа и технологией изготовления; теоретические основы включает в себя расчётную модель тонкостенного сплошного стержня замкнутого сечения (с конической формой и меняющейся толщиной стенки по высоте стержня), а также расчётный аппарат, описывающий эту модель и полученный на основе уточнённой теории оболочек А.А. Уманского и применения вариационного принципа Кастиглиано; кроме того, в теоретический аппарат включен ряд новых расчётных схем и выражений, позволяющий рассчитывать НДС узловых сопряжений рассматриваемых сооружений, включая новые решения узлов, предложенные автором; в перспективе теоретические основы методик позволяет создавать новые, ещё не рассмотренные в работе, конструктивные формы высотных сооружений и решения их узловых сопряжений.

**Л.С. Сабитов, Н.Ф. Кашапов, И.К. Киямов, О.И. Ефимов
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОГО УЗЛА
СОЕДИНЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ СТЕРЖНЕЙ**

Ключевые слова: математическое моделирование, численно-аналитические методы, напряженно-деформированное состояние.

Решение опорного узла высотного сооружения из трубчатого

**V.V. Kharkov, A.N. Nikolaev
SELECTION OF KINETICS MODEL FOR DISPERSED
MATERIAL DRYING TO COMPUTING EXPERIMENT**

Keywords: modelling, CFD, drying rate periods
The paper represents a task of the achievement for higher energy efficiency in moisture removal processes from material with the saving of high quality finished products using the modern computing software. A systematization of the existed theoretical models describing evaporation droplets and dispersed material drying is performed. The characteristic features and drawbacks of the main models are detected. A universal CFD algorithm for simulation and analysis has been developed in terms the software packages for numerical modeling of the drying equipment.

**V.Sh. Roitenberg
ON ONE CASE OF BIFURCATIONS OF A PERIODIC
TRAJECTORY OF A PIECEWISE SMOOTH VECTOR
FIELD**

Keywords: piecewise smooth vector field, periodic trajectory, bifurcation diagram.
The paper considers a piecewise smooth vector field having a periodic trajectory tangent to the line of discontinuity of the field. We describe bifurcations in a neighborhood of this trajectory.

**L.S. Sabitov, N.F. Khashapov, I.K. Kiyamov
THEORETICAL AND EXPERIMENTAL METHODS OF
CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF HIGH-
RISE STRUCTURES MADE OF THIN-WALLED BEAMS
OF CLOSED PROFILE SHELLS**

Keywords: high-rise construction, numerical and analytical methods, stress-strain state.

On the basis of the literature analysis and own long-term design experience, a complete classification of high-rise structures is built, a unified theoretical basis for the calculation and development of new more effective design solutions is developed, which takes into account all the features of the behavior of the structure under the influence of operational load, as well as the restrictions imposed by the installation practice and manufacturing technology; the theoretical basis includes a computational model of a thin-walled continuous rod of a closed section (with a conical shape and a changing wall thickness along the height of the rod), as well as a computational apparatus describing this model and obtained on the basis of a refined theory of shells by A. A. Umansky and the application of the variational principle of Castigliano; in addition, a number of new calculation schemes and expressions are included in the theoretical apparatus, allowing to calculate nodal interfaces of the structures under consideration, including new solutions of nodes proposed by the author; in the future, the theoretical basis of the methods allows to create new, not yet considered in the work, the structural forms of high-rise structures and solutions of their node interfaces.

**L.S. Sabitov, N.F. Khashapov, I.K. Kiyamov, O.I. Efimov
THE THEORETICAL FRAMEWORK FOR THE
ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN STATE OF THE
REFERENCE CONNECTION NODE
OF TUBULAR RODS**

Keywords: mathematical modeling, numerical and analytical methods, stress-strain state.

The solution of the support node of a high-rise structure from a

стержня может быть классическим в виде фланца, но, кроме того, автором предлагается новое решение – при помощи конической вставки [1]. При этом данный тип соединения может быть использован и в других узлах, где требуется соединить две трубы разного диаметра.

В.Ю. Долуда, Н.В. Лакина, Р.В. Бровко, С.П. Михайлов
ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ
МЕТАНОЛА С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫХ
УГЛЕВОДОРОДОВ В РЕАКТОРЕ С НЕСТАЦИОНАРНЫМ
ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ

Ключевые слова: метанол, цеолит, H-ZSM-5, углеводороды, триангуланы, нестационарное температурное поле.

В статье приводятся результаты изучения реакции трансформации метанола в углеводороды в трубчатом реакторе с переменным температурным полем с целью получения напряженных углеводородов. Переменное температурное поле реактора сформировано установкой отдельных тепло нагревающих и теплоотводящих элементов, реакция трансформации метанола в углеводороды протекала на поверхности цеолита H-ZSM-5 упакованного в реакторе. Исследование процесса трансформации метанола в углеводороды с целью получения напряженных углеводородов проводилась при скорости подачи метанола $1 \text{ g}(\text{CH}_3\text{OH})/(\text{g}(\text{Cat})\text{h})$, температурном градиенте от 250 до 370°C , при этом наблюдалось увеличение скорости образования производных триангуланов увеличилась с $37 \text{ g}(\text{Ugl.})/(\text{kg}(\text{Cat})\text{h})$ в режиме без температурного градиента до $89 \text{ g}(\text{Ugl.})/(\text{kg}(\text{Cat})\text{h})$ при использовании температурного градиента.

Е.А. Зеленская, Н.П. Шабельская, В.М. Чернышев,
А.А. Нестеров

СИНТЕЗ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ШПИНЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ NiO – CuO – Fe₂O₃ – Cr₂O₃

Ключевые слова: шпинель, оксиды меди, никеля, железа и хрома
В работе на основе изучения фазового состава и морфологических особенностей образцов в системе $0.3\text{NiO} - 0.7\text{CuO} - 0.3\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0.7\text{Cr}_2\text{O}_3$, полученных с применением различных технологических приемов, показано, что с изменением методики синтеза можно формировать материал с различной характеристикой поверхности. Установлено, что при синтезе из смеси нитратов металлов в среде полиакриламида формируется кубическая шпинель состава $\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_{0.7}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$, обладающая повышенным значением площади удельной поверхности. Полученные результаты могут быть использованы для выбора технологических условий формирования ферритов-хромитов переходных элементов со структурой шпинели с развитой поверхностью.

О.А. Платонова
ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ
АВТОЛИЗАТОРА

Ключевые слова: денитрификация, дефосфатация, автолизатор, сточные воды.

В работе представлены результаты исследований по разработке конструкции автолизатора, позволяющего осуществлять глубокую степень денитрификации в аэротенках при любых концентрациях углеродосодержащих соединений в исходной сточной воде. Определено заданное время автолиза иловой смеси для максимальной степени выделения ортофосфатов в раствор. Разработанная модель биотехнологического процесса в автолизаторе позволяет определить технологические параметры процесса автолиза в зависимости от свойств избыточного ила и добиться глубокой очистки сточных вод не зависимо от поступающей их концентрации.

tubular rod can be classical in the form of a flange, but, in addition, the author proposes a new solution – with the help of a conical insert [1]. In this case, this type of connection can be used in other nodes, where you want to connect two pipes of different diameters.

V. Y. Doluda, N.V. Lucina, R.V. Brovko, S.P. Mikhailov
STUDY CATALYTIC TRANSFORMATIONS OF
METHANOL TO OBTAIN A STRAINED
HYDROCARBONS IN THE REACTOR WITH AN
UNSTEADY TEMPERATURE FIELD

Keywords: methanol, zeolite, H-ZSM-5 of hydrocarbons, triangular, the transient temperature field.

The article presents the results of studying the reaction of transformation of methanol into hydrocarbons in a tubular reactor with a variable temperature field in order to obtain stressed hydrocarbons. The variable temperature field of the reactor is formed by the installation of separate heat-heating and heat-conducting elements, the reaction of the transformation of methanol into hydrocarbons occurred on the surface of the h-ZSM-5 zeolite Packed in the reactor. The study of the process of transformation of methanol into hydrocarbons in order to obtain stressed hydrocarbons was carried out at the feed rate of methanol $1 \text{ g}(\text{CH}_3\text{OH})/(\text{g}(\text{Cat})\text{h})$, the temperature gradient from 250 to 370°C , with an increase in the rate of formation of derivatives of triangulans increased from $37 \text{ g}(\text{angle.}) / (\text{kg}(\text{Cat})\text{h})$ in the mode without temperature gradient to $89 \text{ g}(\text{Angle.}) / (\text{kg}(\text{Cat})\text{h})$ when using a temperature gradient.

E.A. Zelenskaya, N.P. Shabelskaya, V.M. Chernyshev,
A.A. Nesterov

SYNTHESIS AND MORPHOLOGICAL
CHARACTERISTICS OF SPINELS IN THE SYSTEM NiO –
CuO – Fe₂O₃ – Cr₂O₃

Keywords: spinel, copper, nickel, iron and chromium oxides
In work on the basis of studying of phase structure and morphological features of samples in system $0.3\text{NiO} - 0.7\text{CuO} - 0.3\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0.7\text{Cr}_2\text{O}_3$, obtained with the use of various technological methods, it is shown that with a change in the synthesis technique it is possible to form a material with different surface characteristics. It was found that the synthesis of a mixture of metal nitrates in polyacrylamide formed cubic spinel composition $\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_{0.7}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{1.4}\text{O}_4$, which has an increased value of the specific surface area. The obtained results can be used to select the technological conditions for the formation of ferrite chromite transition elements with a spinel structure with a developed surface

О.А. Платонова
DEEP SEWAGE TREATMENT WITH USING A NEW
DESIGN OF THE AUTOLYZER

Keywords: denitrification, dephosphatization, autolysis, wastewater.

The paper presents the results of studies on the design of an autolyser that allows a deep degree of denitrification in aerotanks, at any concentrations of carbon-containing compounds in the original wastewater. The preselected autolysis time of the sludge mixture is determined for the maximum degree of orthophosphate release into the solution. The developed model of the biotechnological process in the autolyser makes it possible to determine the technological parameters of the autolysis process depending on the properties of excess sludge and to achieve deep wastewater treatment, regardless of their incoming concentration.

А.С. Андреев, Е.В. Дороговцева, Е.А. Сутыркина
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ АНТРОПОМОРФНОЙ РУКИ
РОБОТА

Ключевые слова: антропоморфная рука робота, стабилизация движения, синтез управления.

В работе предлагается новый подход к управлению движением антропоморфной руки робота с тремя степенями свободы. Решаются задачи о робастной стабилизации произвольного положения и глобального отслеживания траектории руки робота.

А.П. Буйносов, Е.В. Федоров
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
КОМПРЕССОРОВ ЛОКОМОТИВА

Ключевые слова: локомотив, компрессор, производительность, метод, определение.

В статье приведен разработанный метод, позволяющий без проведения сложных расчетов выбрать характеристики компрессорной установки и главных резервуаров тормозной магистрали локомотива. Показана работа компрессорной установки локомотива с применением способа контроля тормозной магистрали на одной и двух ветвях циклограммы.

Г.Е. Кокиева, Г.А. Герасимова, И.В. Гоголева
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФАКТОРЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ПРОЦЕССА МИКРОБНОГО СИНТЕЗА В
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФЕРМЕНТАЦИОННОЙ
УСТАНОВКЕ

Ключевые слова: экспериментальные исследования, микробный синтез, кормовой белок, скорость циркуляции жидкости, концентрация растворенного кислорода, кормовая добавка.

Процесс культивирования микроорганизмов состоит из различных технологических стадий, основная масса из которых проходят при подводе кислорода. Кислород играет большую роль при производстве кормового белка, так как при его наличии происходит рост микробного белка и его интенсификация. На данный момент невозможно определить концентрацию растворенного кислорода без экспериментального определения концентрации и коэффициента массообмена по кислороду.

Г.Е. Кокиева Л.А. Дарбасова, Н.Н. Неустроев
КОНСТРУКТИВНАЯ ОСОБЕННОСТЬ
ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГОСЯ УСТРОЙСТВА ПРИ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ И АКТИВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА
КОРМОВОГО БЕЛКА

Ключевые слова: ферментационная жидкость, процесс перемешивания, механическое перемешивание, конструктивная особенность оборудования.

Интенсификация и активизация производства кормового белка микробным синтезом зависит от коэффициента массоотдачи в жидкой фазе и зависит от скорости перемешивания питательной среды и условий протекания аэрирования культуральной жидкости. Конструирование крайне необходимо при расчете ферментаторов с механическим перемешивающим устройством.

Г.Е. Кокиева, И.А. Савватеева, Т.Г. Дмитриева
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АППАРАТА ДЛЯ
КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ С ПОДВОДОМ
КИСЛОРОДА, СОДЕРЖАЩИМ МЕХАНИЧЕСКОЕ
ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

Ключевые слова: культивирование микроорганизмов, ферментатор, продуцент кормового белка, дрожжевая клетка. Кормовые дрожжи применяют и используют в качестве кормового средства не только в случае изменения их свойств, но и в связи с нарушением технологии производства или превышением сроков их хранения. При этом визуальные и биохимические характеристики таких дрожжей должны оставаться на уровне стандартов, характерных для кормовых дрожжей.

A.S. Andreev, E.V. Dorogovtseva, E.K. Sutyркиna
MOTION CONTROL OF AN ANTHROPOMORPHIC
ROBOT ARM

Keywords: anthropomorphic robot arm, motion stabilization, control synthesis.

The paper proposes a new approach to motion control of an anthropomorphic robot arm with three degrees of freedom. The problems of robust stabilization of an arbitrary position and global trajectory tracking control have been solved.

A.P. Buinosov, E.V. Fedorov
METHOD OF DETERMINING THE PERFORMANCE OF
COMPRESSORS LOCOMOTIVE

Keywords: locomotive, compressor, productivity, method, definition.

The article presents a developed method that allows without complex calculations to select the characteristics of the compressor unit and the main tanks of the brake line of the locomotive. Shows the operation of the compressor of the locomotive with the application of the method of control of brake lines on one and two branches of the timeline.

G.E. Kokieva, G.A. Gerasimova, I.V. Gogoleva
FACTORS OF PRODUCTION THE INTENSIFICATION OF
THE PROCESS OF MICROBIAL SYNTHESIS

Keywords: experimental study, microbial synthesis and feed protein, the rate of circulation of the liquid, the concentration of dissolved oxygen, a feed additive.

The process of cultivation of microorganisms consists of various technological stages, the bulk of which are in the supply of oxygen. Oxygen plays an important role in the production of feed protein, as in its presence is the growth of microbial protein and its intensification. At the moment it is impossible to determine the concentration of dissolved oxygen without experimental determination of the concentration and mass transfer coefficient of oxygen.

G.E. Kokieva, L.A. Darbasova, N.N. Neustroev
CONSTRUCTIVE PECULIARITY OF MIXING DEVICE AT
INTENSIFICATION AND ACTIVATION OF FOOD
PROTEIN PRODUCTION

Keywords: fermentation liquid, mixing process, mechanical mixing, design feature of the equipment.

Intensification and activation of feed protein production by microbial synthesis depends on the mass transfer coefficient in the liquid phase and depends on the rate of mixing of the nutrient medium and the conditions of aeration of the culture liquid. The design is extremely necessary in the calculation of the digesters with mechanical mixing device.

G.E. Kochieva., I.A. Savvateeva, T.G. Dmitrieva
MATHEMATICAL MODELING OF APPARATUS FOR
CULTIVATION OF MICROORGANISMS WITH OXYGEN
SUPPLY CONTAINING MECHANICAL MIXING DEVICE

Keywords: cultivation of microorganisms, fermenter, producer of feed protein, yeast cell, design feature of the equipment.

Feed yeast is used and used as a feed agent not only in the case of changes in their properties, but also in connection with the violation of production technology or exceeding their shelf life. At the same time, the visual and biochemical characteristics of such yeast should remain at the level of standards typical for fodder yeast.

С.Л. Марулин, А.П. Буйносов
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
ЛОКОМОТИВОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Ключевые слова: локомотив, деталь, обработка, упрочнение, термический, моделирование, результаты.

Приведены результаты моделирования упрочнения деталей локомотивов при термической обработке с применением сканирующего теплового неподвижного источника. Результаты расчета использованы при разработке технологий упрочнения деталей при нагреве плазменной дугой в азоте, в том числе гребней бандажей колесных пар локомотивов.

В.И. Митряйкин, Т.А. Зайцева, Р.М. Габсаттаров,
А.А. Хабибуллин

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ВЫВИХА
ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА С
РАЗЛИЧНЫМИ ПАТОЛОГИЯМИ

Ключевые слова: биомеханика, тазобедренный сустав, контактное взаимодействие, математическое моделирование, эндопротезирование.

Разработана методика определения плотности и пористости композиционных материалов и костных структур с использованием компьютерного томографа. Получены корреляционные зависимости для определения плотности через единицы HU, которые позволяют определять определять механические характеристики импланта и костных структур в месте его установки. Разработана математическая модель для расчета системы "имплант-кость". Проведена теоретико-экспериментальная оценка вывиха эндопротеза ТБС с учетом дисплазии и изменения прочностных характеристик биоматериалов.

П.М. Салов, Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, С.В. Солин,
А.Н. Егоров, И.С. Васильев, А.Ю. Орлов, С.Р. Васильев,
Д.А. Коновалов, А.М. Сидельников, В.В. Филиппов
НАГРЕВАНИЕ И ОСТЫВАНИЕ ЗАГОТОВОК ПРИ
ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ В УСЛОВИЯХ
ОГРАНИЧЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ

Ключевые слова: нагревание заготовок, длительность процесса, нестабильность процессов, увеличенные припуски, снижение прочности стыков

В работе рассмотрены условия относительно продолжительного шлифования, при которых возможен прогрев заготовок до температур, приводящих к ухудшению технологической наследственности деталей и снижению эффективности процессов

П.М. Салов, Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, С.В. Солин,
С.О. Красилов, С.Е. Майков, А.С. Петров, Д.А. Софронов,
С.А. Тимофеев, Е.В. Петров

РОЛЬ ТЕПЛООВОГО ФАКТОРА ПРИ ШЛИФОВАНИИ
ЗАГЛУБЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Ключевые слова: заглубленные поверхности, температуры, податливость, тонкостенность, остывание (нагревание)

В работе рассмотрена методика управления теплофизической ситуацией при шлифовании ответственных поверхностей, находящихся в глубине отверстий деталей, для которых недопустим локальный прогрев отдельных элементов объема. Разработаны рекомендации по выбору цикла обработки, методикам расчета режимов и условий шлифования, конструкции кругов.

И.В. Грубрин, И.Ю. Лыгина
КОМПЕНСАЦИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТИ КАНАЛОВ В
МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Ключевые слова: информация, неидентичность, компенсация.
В работе предложен способ, пригодный для компенсации влияния неидентичности каналов на характеристики

S.L. Marulin, A.P. Buinosov
THE RESULTS OF THE MODELING OF HARDENING
LOCOMOTIVE PARTS DURING HEAT TREATMENT

Keywords: locomotive, part, machining, hardening, thermal, simulation, results.

The results of modeling the hardening of locomotive parts during heat treatment using a scanning stationary heat source are presented. The results of the calculation are used in the development of technologies for hardening parts under heating by a plasma arc in nitrogen, including the ridges of the wheel sets of locomotives.

V.I. Mitryaykin, T.A. Zaitseva, R.M. Gabsattarov,
A.A. Khabibullin

THE CALCULATION OF CRITICAL LOADS FOR
DISLOCATION OF THE ENDOPROSTHESIS OF THE HIP
JOINT WITH VARIOUS PATHOLOGIES

Keywords: biomechanics, hip joint, contact interaction, mathematical modeling, endoprosthetics.

A method for determining the density and porosity of composite materials and bone structures using a computer tomograph is developed. Correlation dependences for determination of density through HU units are received, which allow to define mechanical characteristics of implant and bone structures in the place of its installation. A mathematical model for calculating the "implant-bone" system is developed. Theoretical and experimental assessment of dislocation of the TBS endoprosthesis taking into account dysplasia and changes in the strength characteristics of biomaterials was carried out.

P.M. Salov, D.P. Salova, T.G. Vinogradova, S.V. Solin,
A.N. Egorov, I.S. Vasilyev, A.Yu. Orlov, S.R. Vasilyev,
D.A. Kononov, A.M. Sidelynikov, V.V. Filippov
HEATING AND COOLING OF PREPARATIONS AT
VNUTREN-NEM GRINDING IN THE CONDITIONS OF
LIMITED RIGIDITY OF TECHNOLOGICAL SYSTEM

Keywords: heating of preparations, process duration, instability of processes, the increased allowances, decrease in durability of joints

In work conditions of rather long grinding under which warming up of preparations up to the temperatures leading to deterioration in technological heredity of details and decrease in efficiency of processes is possible are considered.

P.M. Salov, D.P. Salova, T.G. Vinogradova, S.V. Solin,
S.O. Krasilov, S.E. Maykov, A.S. Petrov, D.A. Sofronov,
S.A. Timofeev, E.V. Petrov

ROLE OF THE THERMAL FACTOR WHEN GRINDING
THE BURIED SURFACES

Keywords: the buried surface, temperatures, pliability, thin wall, cooling (heating)

In work the technique of management of a heatphysical situation when grinding the responsible surfaces which are in depth of openings of details for which local warming up of separate elements of volume is inadmissible is considered. Recommendations about the choice of an operation cycle, method of calculation of the modes and conditions of grinding, a design of circles are developed.

I.V. Grubrin, I.U. Ligina
THE COMPENECION OF CHANNEL NONIDENTITY IN
MULTICHANNEL INFORMATION-MEASURING
SYSTEMS

Keywords: information, nonidentity, compensation
The paper proposes a method suitable for compensation the nonidentity of channels in multichannel information-measuring

многоканальных информационно-измерительных систем, на базе адаптивных многоотводных линий задержки (трансверсальных фильтров).

systems based on adaptive multi-tap delay lines (transversal filters).

В.В. Епин, Р.В. Цветков

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОГО ВЫСЫХАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

Ключевые слова: гидростатический нивелир, незамерзающая жидкость, неоднородная плотность.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов неравномерного высыхания различных водных растворов применительно к системам гидростатического нивелирования. Эти результаты позволяют осуществить выбор жидкостей, пригодных для эксплуатации при отрицательных температурах. А также позволяют оценить характерные времена, при достижении которых требуется перемешивание растворов в гидронивелире для обеспечения их однородности.

V.V. Epin, R.V. Tsvetkov

THE RESEARCH OF UNEVEN DRYING OF SOME AQUEOUS SOLUTIONS FOR HYDROSTATIC LEVELING SYSTEMS

Keywords: hydrostatic level system, antifreeze liquid, nonuniform density.

This paper presents the results of experimental studies of the processes of non-uniform drying of various aqueous solutions for hydrostatic leveling systems. These results allow the selection of liquids suitable for operation at negative temperatures. And also allow to estimate the characteristic times at which required mixing of the solutions in hydrostatic level to ensure their uniformity.

И.В. Нелин, Д.А. Охотников, М.С. Виноградов

БЕСКОНТАКТНАЯ ВИБРОДИАГНОСТИКА ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ

Ключевые слова: Вибродиагностика, СШП радиолокатор.

Вибродиагностика двигателей внутреннего сгорания достаточно широко представлена в литературе [1,2,3], однако в большинстве случаев датчик, регистрирующий вибрации крепится непосредственно на корпусе двигателя, что накладывает на всю систему определенные ограничения. В случае если датчик необходимо монтировать на корпус по средствам специальных креплений, то на корпусе двигателя должны быть конструктивно заложены крепления ответные тем, которые на датчиках. В этом случае сужается диапазон применяемых систем. Использование датчиков на магнитах требует демонтажа пластиковых кожухов, которыми часто закрываются металлические поверхности современных двигателей. Еще одним недостатком рассмотренных систем является возможность регистрации ускорения перемещений, а не самих перемещений поверхности двигателя. С увеличением ширины полосы анализируемых частот при вибродиагностики актуальными становятся ограничения, вызванные массой самих датчиков, особенно в случае, если они крепятся на магнитах.

I.V. Nelin, D.A. Okhotnikov, M.S. Vinogradov

CONTACTLESS VIBRATION DIAGNOSTICS OF THE CAR ENGINE

Keywords: Vibration diagnostics, UWB radar.

Vibration diagnostics of internal combustion engines is widely presented in the literature [1,2,3], but in most cases, the sensor that registers vibrations is mounted directly on the engine body, which imposes certain restrictions on the entire system. If the sensor is to be mounted on the body by means of special mounts, the mounting on the motor housing should be structurally laid to those that are on the sensors. In this case, the range of systems used is narrowed. The use of sensors on magnets requires the dismantling of plastic covers, which often close the metal surfaces of modern engines. Another disadvantage of the considered systems is the possibility of recording the acceleration of movements, and not the displacement of the engine surface. With the increase in the bandwidth of the analyzed frequencies in vibration diagnostics, the restrictions caused by the mass of the sensors themselves become relevant, especially if they are mounted on magnet.

И.В. Нелин, М.К. Седанкин, В.А. Скуратов, М.В. Мартыанова, Л.Ю. Мершин

МИНИАТЮРНАЯ АНТЕННА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВНУТРЕННЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Ключевые слова: микроволновая радиотермометрия, печатная антенна, радиояркостная температура, медицинская робототехника.

Для неинвазивного мониторинга внутренней температуры головного мозга разработан малогабаритный радиометрический датчик на основе печатной антенны. Дано описание математического моделирования и экспериментальной верификации созданного датчика. Небольшие размеры датчика позволяют совмещать его с медицинскими роботизированными системами для повышения эффективности лечения.

I.V. Nelin, M.K. Sedankin, V.A. Skuratov, M.V. Martyanovs, L.Y. Mershin

MINIATURE ANTENNA FOR MONITORING THE INTERNAL BRAIN TEMPERATURE

Keywords: microwave radiometry, printed antenna, brightness temperature, medical robotics.

For non-invasive monitoring of the internal temperature of the brain, a small-sized radiometric sensor based on a printed antenna has been developed. Mathematical simulation and experimental verification of the created sensor are described. The small size of the sensor will allow it to be combined with medical robotic systems to improve the effectiveness of treatment.

О.В. Тихоненкова, П.И. Бегун, Т.В. Сергеев, Д.В. Зеленова, П.И. Толкачев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОСТУРАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Ключевые слова: биомеханика, позвоночник, моделирование, постуральные нагрузки.

В статье рассмотрены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния структур поясничного отдела позвоночника на различных положениях тела человека, в том числе, антиортостатической

O.V. Tikhonenkova, P.I. Begun, T.V. Sergeev, D.V. Zelenova, P.I. Tolkachyov

EXPERIMENTAL STUDY OF THE LUMBAR SPINE DURING DYNAMIC POSTURAL LOADS

Keywords: biomechanics, spine, modeling, postural loads.

The article is devoted to experimental and theoretical studies of the stress-strain state of the structures of the lumbar spine in different positions of the human body, including anti-orthostatic (anti – orthostatic position-head below the horizon) load.

(антиортостатическое положение – голова ниже линии горизонта) нагрузки. Разработаны методики данных исследований.

А.Т. Шляхов, Х.С. Биктимирова, А.Г. Шляхова
КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ
ПЕРЕХОДОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МОДИФИКАЦИЯХ
ГАЛЛИЯ

Ключевые слова: полиморфные модификации, α и β галлий, микрокалориметр, фазовый переход, плавление, кристаллизация. Проведены калориметрические исследования полиморфных модификаций галлия. Переход галлия из стабильной α -фазы в метастабильную β -фазу осуществлен воздействием инфракрасного лазера. Прослежены фазовые превращения в α - и β -галлии, связанные с их плавлением и кристаллизацией. Обнаружен также фазовый переход I рода при -90°C , обусловленный обратным превращением галлия из β в α модификацию.

A.T. Shlyakhov, Kh.S. Biktimirova, A.G. Shlyakhova
CALORIMETRIC RESEARCHES OF PHASE
TRANSITIONS IN CRYSTAL MODIFICATIONS OF
GALLIUM

Keywords: polymorphs, α and β gallium, differential microcalorimeter, phase transition, melting, crystallization. Calorimetric studies conducted polymorphs of gallium. In the proposed method of transition gallium stable α -phase in the metastable β -phase infrared laser exposure was done. Traced in phase transformation α - and β -gallium related to their melting and crystallization. Also found a phase transition at the I kind of -90°C , due to the inverse transformation of gallium from β to α modification.

Р.Р. Гатауллин
ГИБРИДНЫЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР
ТАТАРСКОГО ЯЗЫКА НА ОСНОВЕ ПРАВИЛ И
СТАТИСТИКИ

Ключевые слова: морфологическая разметка, HFST, PurePos 2.0, гибридная модель, разрешение многозначности, татарский язык.

В данной работе представлен сравнительный анализ двух подходов морфологической разметки и способ их комбинирования с целью создания гибридной версии морфологического анализатора с улучшенными показателями полноты, точности и скорости анализа, а также с возможностью разрешения морфологической многозначности. Первый подход основан на правилах и реализуется с помощью технологии трансдюсеров конечных состояний – HFST, второй подход является статистическим и реализуется с помощью инструментария – PurePos 2.0. Морфологические модели, разработанные на основе этих подходов, сравниваются по следующим показателям: полнота, точность и быстродействие. Каждая модель имеет свои преимущества, однако их комбинирование позволяет повысить качество морфологической разметки по всем указанным показателям. В настоящее время версия гибридного морфологического анализатора используется для разметки национального корпуса татарского языка «Туган тел» (<http://tugantel.tatar/>).

R.R. Gataullin
HYBRID MORPHOLOGICAL ANALYSER OF TATAR
LANGUAGE USING RULES AND STATISTICS

Keywords: morphological analysis, morphological disambiguation, Tatar language.

The paper presents a comparative analysis of two morphological analyzers and shows how they can be combined to improve the result. HFST is based on rules, and PurePos 2.0 uses statistics. Coverage, accuracy and speed are the main metrics that were compared on. So, each model has its advantages, and combining them may significantly improve the quality of morphological markup. As a result, an obtained hybrid analyzer is used for marking the Tatar National Corpus “Tugan Tel”.

А.А. Гришин, С.П. Строев
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОВЕДЕНЧЕСКОГО СКОРИНГА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ГРАДИЕНТНОГО
БУСТИНГА

Ключевые слова: поведенческий скоринг, градиентный бустинг, значимость характеристик выборки, задача классификации. В статье представлены модели поведенческого скоринга. Исследование основано на реальных данных, представляющих поведение клиентов в процессе обслуживания клиентов кредитной организации. Целью исследования было выявить конкретные группы заемщиков, чье кредитное поведение описывается признаками совокупности, которые могут использоваться банком для принятия управленческих решений.

A.A. Grishin, S.P. Stroevev
DEVELOPMENT OF BEHAVIORAL SCORING MODEL
USING METHODS OF GRADIENT BOOSTING

Keywords: behavioral scoring, gradient boosting, significance of sample characteristics, classification problem.

The paper presents models of behavioral scoring. The research is based on the real-life data presenting customer behavior in the process of loan servicing. The purpose of the research was to identify specific groups of borrowers whose credit behavior is described with regard to measures banks can take.

М.Л. Долженкова, Г.А. Чистяков
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ
ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ НА ОСНОВЕ
ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Ключевые слова: беспилотное транспортное средство, продукционная экспертная система, самообучающаяся система, система управления автомобилем.

В работе предлагается структура системы управления наземным беспилотным транспортным средством в основе которой лежит аппарат нечеткого логического вывода посредством продукционных правил. Отличительными

M.L. Dolgenkova, G.A. Chistyakov
CONTROL SYSTEM OF AN AUTONOMOUS UNMANNED
VEHICLE BASED ON THE PRODUCTION MODEL OF
KNOWLEDGE REPRESENTATION

Keywords: unmanned vehicle, product expert system, self-learning system, vehicle control system.

The paper proposes the structure of the unmanned vehicle control system, which is based on the apparatus of fuzzy inference by production rules. The distinctive features of this solution are a high degree of modularity, as well as the ability to gradually improve the quality of work in a fixed environment

особенностями рассматриваемого решения являются высокая степень модульности, а также способность к постепенному повышению качества работы в фиксированном окружении за счет использования механизма самообучения. Требуемый уровень безопасности дорожного движения достигается посредством применения контрольной нейросетевой экспертной системы.

А.А. Кротких, П.В. Максимова
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО
АЛГОРИТМА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ, НЕ
ТРЕБУЮЩЕГО ПРОЦЕДУРЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Ключевые слова: аддитивные технологии, SIMP,
топологическая оптимизация, 3D печать.

Работа посвящена анализу популярного метода топологической оптимизации SIMP, активно применяемого при проектировании облегченных изделий, изготавливаемых при помощи аддитивных технологий, анализу его эффективности, недостатков и преимуществ. В работе представлен новый метод топологической оптимизации и выполнена его верификация. Предложен алгоритм топологической оптимизации, для решения которой нет необходимости прибегать к фильтрации решения задачи методом конечных элементов. Алгоритм был реализован, его результаты проанализированы при различных параметрах на примере плоской задачи механики деформированного твердого тела.

П.В. Максимов, А.А. Кротких, Б.И. Ронжин
РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА НА БАЗЕ LEVEL-SET МЕТОДА
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ
ОПТИМИЗАЦИИ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Ключевые слова: level-set метод, топологическая оптимизация,
аддитивные технологии.

Рассматривается вопрос применимости алгоритма топологической оптимизации на базе level-set метода в моделировании авиационных деталей. Алгоритм реализован в дискретной форме в двумерной постановке на основе гипотезы однородности и изотропности среды. Проанализированы преимущества и недостатки level-set метода в сравнении с гомогенизационными методами.

Н.А. Москат
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА
ТРАФИКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ
СКОРОСТНЫМ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ
Ж.Д.Т.

Ключевые слова: информационная технология, ВСМ, трафик,
самоподобие, долговременная зависимость.

Представлен проект Российской системы управления движением поездов на высокоскоростных магистралях. Обоснована актуальность создания моделей информационно-управляющих систем ж.д.т., анализа их трафика. Представлена методика возможности экспериментальной оценки параметров информационных потоков, обладающих свойствами самоподобия и долговременной зависимости.

through the use of the self-learning mechanism. The required level of road safety is achieved through the use of a control neural network expert system.

A.A. Krotkih, P.V. Maximova
DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF EFFECTIVE
ALGORITHM OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION
WITHOUT
USING OF FILTER PROCEDURE

Keywords: additive technology, SIMP, topology optimization,
3D-printing

The work is devoted to the analysis of the popular topological optimization method SIMP, which is actively used in the design of lightweight products manufactured using additive technologies, analysis of its effectiveness, disadvantages and advantages. The authors of paper suggest a new method of topological optimization and a verification of this method. The formulation of the topological optimization problem is suggested for the solution of which there is no need to use the filter algorithm of the problem by the finite element method. A method is developed based on algorithms for finite element analysis of the object and the search for a minimum of the objective compliance function, which makes it possible to fine the solution of problem in this formulation, and its results for various parameters are analyzed using the example of the plane problem of the mechanics of a deformed solid.

P.V. Maximova, A.A. Krotkih, B.I. Ronjih
DEVELOPMENT OF ALGORITHM BASED ON LEVEL-
SET METHOD IN TERMS OF SOLVING TOPOLOGY
OPTIMIZATION AIRCRAFT DETAILS

Keywords: level-set method, topology optimization, additive
technology.

The question of the applicability of the topological optimization algorithm on the basis of the level-set method in the modeling of aircraft details is considered. The algorithm is implemented in a discrete formulation in a 2D within the assumption of a homogeneous isotropic medium. The advantages and disadvantages of the level-set method in comparison with homogenization methods are analyzed.

N.A. Moskat
BUILDING FEATURES MODELS FOR TRAFFIC
ANALYSIS OF AUTOMATED MANAGEMENT
INFORMATION SYSTEMS FOR THE MANAGEMENT OF
HIGH-SPEED RAILWAYS TRAFFIC.

Keywords: information technology, HSR, traffic, self-similarity,
long-term dependence

The project of the Russian system control of movement of trains on high-speed highways is presented. It justifies urgency of creation of models of information management systems well.d.t., analysis of their traffic. The technique of possibility of an experimental estimation of parameters of the information streams possessing properties of self-similarity and long-term dependence is presented.

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 регистрационных данных для осуществления публикации в журнале (имя, фамилия, отчество, адрес автора, контактный телефон и e-mail приводятся в регистрационной форме, заполняемой авторами при отправке статьи в журнал). Обработка осуществляется редакцией журнала для целей надлежащей отправки журнала автору и возможности связи с автором лиц, заинтересованных в результатах труда автора статьи. Под обработкой персональных данных в контексте настоящего согласия понимаются действия редакции по сбору, систематизации, накоплению, хранению, использованию, распространению, уничтожению персональных данных, а также действия по их дальнейшей обработке с помощью автоматизированных систем управления базами данных, и иных программных средств, используемых редакцией журнала. Настоящее согласие автора на обработку персональных данных является бессрочным и может быть отозвано в любой момент путем отказа автора от получения журнала и дальнейшей обработки его персональных данных.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ

№9 2018

Направления:

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

**05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И
МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**05.11.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

**05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

www.ntvp.ru

Свидетельство № ПИ № ФС77-41672 от 13 августа 2010г.

Подписано в печать 29.08.2018 Формат 60 x 84 1/8. Печать цифровая.

7,1 усл.печ.л. 8,1 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 1510.

Учредитель: ООО "Научно-технический вестник Поволжья"

420021, Республика Татарстан, Казань,

ул. З.Султана, д.17а, оф. 19

Адрес редакции, издателя и типографии совпадают с адресом учредителя

Цена свободная.

© Научно-технический вестник Поволжья

тел.(843) 216-30-35

Отпечатано с готового оригинал-макета

ООО «Научно-технический вестник Поволжья»