

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№5 2017

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

2017

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №5 2017г. – Казань:
Научно-технический вестник Поволжья, 2017. – 204 с.

ISSN 2079-5920

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5

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

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

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

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

Главный редактор Р.Х. Шагимуллин

Редакционная коллегия

С.В. Анаников – д.т.н., проф.; Т.Р. Дебердеев – д.т.н., проф.; Б.Н. Иванов – д.т.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, 2017 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Б.Н. Иванов, В.С. Минкин, К.Г. Николаев, В.С. Желтухин, Р.Х. Шагимуллин</i> ГНОСЕОЛОГИЧЕСКИЕ КОРНИ РАЦИОНАЛЬНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	9
---	---

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

<i>В.Д. Петелина</i> О ПОСТРОЕНИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА	16
<i>А.Ш. Султанов</i> О ПЛОСКО-РАДИАЛЬНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ К СКВАЖИНЕ В ПЛАСТЕ	23
<i>Ю.В. Швец, Н.В. Миллер, Н.И. Попова, И.А. Трефилова</i> УТОЧНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО НЕРАВЕНСТВА ДЛЯ ОДНОЙ НЕПОЛНОЙ ФУНКЦИИ	26

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>А.Е. Филатова, В.Ю. Долуда, В.Г. Матвеева, Э.М. Сульман</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ГИДРИРОВАНИЯ НИТРОБЕНЗОЛА ДО АНИЛИНА В ПРИСУТСТВИИ Ru-СОДЕРЖАЩЕГО КАТАЛИЗАТОРА	30
<i>В.В. Харьков, А.Н. Николаев</i> ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ РЕАКЦИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ	33
<i>Е.И. Шиманская, Э.М. Сульман, В.П. Молчанов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ГИДРОГЕНОЛИЗА ЛИГНИНА С ПОЛУЧЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ БИОТОПЛИВ В ПРИСУТСТВИИ Pd И Ru-СОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИЗАТОРОВ	38

05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>В.И. Ампилов, Д.А. Степанищева</i> МЕТОД КОНСТРУИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ КАРКАСНО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОБВОДОВ	41
<i>С.М. Белобородов, М.Л. Цельмер</i> ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИЕЙ ПРИ СБОРКЕ РОТОРОВ	44
<i>С.М. Белобородов, М.Л. Цельмер, С.Д. Дубина, Е.В. Мехоношина</i> МИНИМИЗАЦИЯ ВНЕШНЕГО ДИСБАЛАНСИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИНАМИКУ ГИБКОГО РОТОРА	47
<i>С.М. Белобородов, М.Л. Цельмер, С.В. Жданов, Л.Н. Бутымова</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВАЛОПРОВОДА	50
<i>С.М. Белобородов, М.Л. Цельмер, В.Я. Модорский</i> АНАЛИЗ И МИНИМИЗАЦИЯ АВАРИЙНОЙ ВИБРОАКТИВНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РОТОРОВ	53
<i>Л.В. Беляев, А.В. Жданов</i> ПОРИСТОСТЬ ОБЪЕМНЫХ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ	56
<i>М.Г. Маликов, Л.В. Беляев, А.В. Жданов</i> РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ	60
<i>В.И. Митряйкин, И.Н. Сидоров, Е.В. Кротова, Т.А. Зайцева</i> РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛОПАСТИ ВИНТА ВЕРТОЛЕТА С УДАРНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ	64
<i>Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова, А.А. Грехов</i> АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ	68

<i>И.М. Пышный</i> ВЫБОР ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ БАНДАЖА ИСХОДЯ ИЗ КРИТЕРИЯ МАКСИМАЛЬНОГО РЕСУРСА ПО ПРОКАТУ	71
<i>И.М. Пышный, А.Е. Саланов</i> ВЫБОР ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ БАНДАЖА ИСХОДЯ ИЗ КРИТЕРИЯ МАКСИМАЛЬНОГО РЕСУРСА ПО ИЗНОСУ ГРЕБНЯ	75
<i>И.Н. Фролова, А.А. Сарбаев, И.О. Пантелеев, С.К. Сахаровский</i> ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ НА ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	79
<i>И.М. Щигарцов, А.Т. Кулаков, Е.П. Барыльникова</i> ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ЭНЕРГООБМЕНА	84

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

<i>Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Г.А. Боброва, В.А. Нестеров, Г.А. Титов, Р.С. Доровских</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МАКСИМАЛЬНО ЭФФЕКТИВНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ	88
<i>В.В. Корепанов</i> АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАСТИН С ДЕФЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ	91
<i>И.В. Нелин, Д.А. Охотников</i> РАДИОСИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ	94
<i>А.А. Талипов, К.С. Мельник</i> СПЕЦИФИКА ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ОДНО- И ДВУХФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ	97
<i>В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, В.В. Педдер, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Г.А. Боброва, Р.С. Доровских, В.А. Шакура</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСТРАЦИИ РАНЕВОГО СОДЕРЖИМОГО НА БАЗЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ	103
<i>В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Р.С. Доровских, Р.Н. Голых</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВТОРОСТЕПЕННЫХ МОД КОЛЕБАНИЙ НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ	106
<i>Р.В. Цветков, В.В. Епин</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЕГМЕНТНОМ ГИДРОНИВЕЛИРЕ	109

05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>И.А. Акимов, В.Н. Абузьяров</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ТРЕТЬЕМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С РАЗЛИЧНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ	112
<i>И.А. Акимов, Е.О. Каракулина</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ЭТАПЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ	116
<i>Р.Г. Асадуллаев, В.В. Ломакин, Н.П. Путивцева, О.С. Резниченко, Ю.Ю. Белоконь</i> РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ОЦЕНКИ ПРОЕКТНЫХ РИСКОВ ПРИ СОЗДАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СФЕРЫ ГОСУДАРСТВЕННЫХ УСЛУГ	120
<i>Е.Н. Белоусова, Ф.С. Жафярова</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫМ ИМУЩЕСТВОМ	123

<i>Д.В. Бережной, М.Р. Шамим, И.С. Балафендиева</i> ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КЛИНЧ-СОЕДИНЕНИЙ	126
<i>Д.В. Бережной, М.Р. Шамим, А.А. Саченков</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ	129
<i>Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский</i> АНАЛИЗ РАБОТЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЯХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ	132
<i>Л.А. Галиуллин</i> РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ	135
<i>С.В. Данилова, А.И. Офилова, Н.А. Андреева</i> ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ЛОГИСТИЧЕСКИМИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ В ИНТЕРНЕТ-ТОРГОВЛЕ	138
<i>В.О. Каледин, А.Д. Ульянов, Вл.О. Каледин</i> КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ СДВИГОВОЙ БАЛКИ ТИМОШЕНКО С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ВЫГОРАНИЯ МАТЕРИАЛА	141
<i>С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский, К.А. Баркалов, В.П. Гергель, Ю.А. Лаптева, Е.А. Козин</i> ИНТЕГРАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ GLOBALIZER И ANSYS ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ КАПЛИ В ПОТОКЕ ГАЗА	145
<i>В.А. Лысов, В.С. Янё, А.В. Кузьмин, А.В. Щеголев, М.В. Иванюк, Е.В. Баширова</i> АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОСНОВА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ПЛОСКОГО КРИВОЛИНЕЙНОГО КОНТУРА ГЛАДКОЙ СОВОКУПНОСТЬЮ ДУГ ОКРУЖНОСТЕЙ	149
<i>Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский</i> О ВОЗМОЖНОСТИ ЧИСЛЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВОЧНЫХ АЭРОУПРУГИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО РАСЧЕТА РОТОРА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ГПА	153
<i>В.А. Столярчук</i> УЧЕБНАЯ САПР С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ	156
<i>Д.Н. Тимофеев, В.В. Шведенко, О.В. Щекочихин</i> ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ	160
<i>В.А. Харитонов, С.В. Леонтьев, А.Д. Курзанов</i> КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА	163
<i>В.Н. Хмельёв, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.С. Клепов, В.Е. Бажин</i> МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЕРЦИОННЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ НА БАЗЕ МОДЕЛИ ДИСКРЕТНОЙ ФАЗЫ	166
<i>М.А. Черноскутов</i> АЛГОРИТМ ПОИСКА ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ СООБЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАВНОУДАЛЕННЫХ ВЕРШИН	169
<i>В.А. Шапов, С.Р. Латыпов</i> СПОСОБЫ ЗАПУСКА ЗАДАЧ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ОКРУЖЕНИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОНТЕЙНЕРНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ DOCKER	172
<i>А.Г. Щербинин, А.И. Кабирова</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАБЕЛЯ С ЖИЛАМИ СЕКТОРНОЙ ФОРМЫ	178
<i>А.Г. Щербинин, Д.Ю. Корюкин</i> ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛАХ БОЛЬШИХ СЕЧЕНИЙ	181
<i>А.Г. Щербинин, С.В. Стариков</i> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАСЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ	184
<i>А.Г. Щербинин, И.А. Титов</i> ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ ШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА	187
АННОТАЦИИ	190

THE RELEASE MAINTENANCE

<i>B.N. Ivanov, V.S. Minkin, K.G. Nikolaev, V.S. Zheltyhin, R.Kh. Shagimullin</i> EPISTEMOLOGICAL BASES OF THE RATIONAL METHODOLOGY OF ELECTRICAL MATERIALS STUDY	9
---	---

01.01.00 — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — MATHEMATICS

<i>V.D. Petelina</i> ABOUT CREATION OF A SPECIAL SYSTEM OF DIFFERENTIAL EQUATIONS OF PERTURBED MOVEMENT OF A SPACECRAFT	16
<i>A.Sh. Sultanov</i> ABOUT RADIAL TWO-DIMANSIONAL FLUID FLOW MOVING TO THE WELL DRILLED IN RESEVOIR	23
<i>Y.V. Shvets, N.V. Miller, N.I. Popova, I.A. Trefilova</i> REFINEMENT OF INTEGRAL INEQUALITY FOR ONE INCOMPLETE FUNCTION	26

02.00.00 — CHEMICAL SCIENCES

<i>A.E. Filatova, V.Yu. Doluda, V.G. Matveeva, E.M. Sulman</i> RESEARCH CATALYTIC HYDRATION OF NITROBENZENE TO ANILINE IN THE PRESENCE OF Ru-CONTAINING CATALYSTS	30
<i>V.V. Kharkov, A.N. Nikolaev</i> KINETICS HIGHLIGHTS OF THERMAL DECOMPOSITION DURING MATERIALS CONCENTRATION IN SUSPENDED DROP LAYER	33
<i>E.I. Shimanskaya, E.M. Sulman, V.P. Molchanov</i> STUDY ON CATALYTIC HYDROGENOLYSIS OF LIGNIN WITH BIOFUELS OBTAINING IN THE PRESENCE OF Pd AND Ru-CONTAINING CATALYSTS	38

05.02.00 — TECHNICAL SCIENCES — MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

<i>V.I. Ampilov, D.A. Stepanishcheva</i> METHOD OF CONSTRUCTING COMPLEX FRAMING AND KINEMATIC CONTOURS	41
<i>S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer</i> THE TASK OF INFORMATION MANAGEMENT IN THE ASSEMBLY OF ROTORS	44
<i>S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer, S.D. Dubina, E.V. Mekhonoshina</i> MINIMIZING EXTERNAL DISBALANCING IMPACT ON THE DYNAMICS OF FLEXIBLE ROTOR	47
<i>S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer, S.V. Zhdanov, L.N. Butymova</i> EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHAFTING DYNAMIC STATUS	50
<i>S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer, V.Ya. Modorskii</i> ANALYSIS AND MINIMIZATION OF HIGH-SPEED ROTOR ABNORMAL VIBRATION	53
<i>L.V. Belyaev, A.V. Zhdanov</i> POROSITY OF THREE-DIMENSIONAL SAMPLES OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING OF STAINLESS STEEL POWDERS	56
<i>M.G. Malikov, L.V. Belyaev, A.V. Zhdanov</i> DEVELOPMENT OF ELECTRO-MECHANICAL DRIVE OF RAILROAD SWITCH FOR HIGH-SPEED RAILWAYS	60
<i>V.I. Mitryaikin, I.N. Sidorov, E.V. Krotova, T.A. Zaytseva</i> DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE HARDENING STRENGTH OF A HELICOPTER SCREW WITH IMPAIRED DAMAGES	64
<i>E.V. Poyarkova, L.S. Dinmukhametova, A.A. Grekhov</i> THE ANALYSIS OF THE INFORMATIONAL DIAGNOSTIC PARAMETERS FOR MAGNETIC CONTROL OF COMBINED WELDED ELEMENTS OF METAL CONSTRUCTIONS MADE FROM LOW-ALLOYED STEELS	68
<i>I.M. Pyshny</i> SELECTION OF THE SURFACE PROTECTION SURFACE OF THE BANDAGE BASED ON THE CRITERIA OF THE MAXIMUM RESOURCE ROLLED	71
<i>I.M. Pyshny, A.E. Salanov</i> SELECTING THE PROFILE OF THE SURFACE OF THE SKINING OF THE BANDAGE ACCORDING TO THE CRITERIA OF THE MAXIMUM RESOURCE FOR THE WEAR OF RIDGE	75

<i>I.N. Frolova, A.A. Sarbaev, I.O. Panteleev, S.K. Sakharovsky</i> THE APPLICATION OF THE COLLISION DETECTION ALGORITHM TO SELECT THE MEANS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR THE MACHINING OPERATION	79
<i>I.M. Shchigartsov, A.T. Kulakov, E.P. Barylnikova</i> INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF MECHANISMS OF PISTON ENGINES ON THE PROCESSES OF ENERGY EXCHANGE	84

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

<i>R.N. Golykh, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, G.A. Bobrova, V.A. Nesterov, G.A. Titov, R.S. Dorovskikh</i> MODELING OF FORMATION OF CAVITATION AREA FOR DETERMINING INFLUENCE MODES PROVIDING MAXIMUM EFFICIENCY OF CHANGING OF SUBSTANCES AND MATERIALS PROPERTIES	88
<i>V.V. Korepanov</i> ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF MULTILAYERED COMPOSITE PLATES WITH DEFECTS UNDER STATIC LOADING	91
<i>I.V. Nelin, D.A. Okhotnikov</i> RADIOSYSTEMS IN MEDICINE	94
<i>A.A. Talipov, K.S. Melnik</i> SPECIFICITY OF PHOTONIC CRYSTAL FIBERS USED IN PHOTON PAIRS GENERATION	97
<i>V.N. Khmelev, R.N. Golykh, V.V. Pedder, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, G.A. Bobrova, R.S. Dorovskikh, V.A. Shakura</i> PROVIDING OF REQUIRED RATE OF ULTRASONIC EXTRACTION OF WOUND CONTENTS BY THEORETICAL EVALUATION OF INFLUENCE MODES AND CONDITIONS	103
<i>V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh</i> INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SECONDARY MODES OF OSCILLATIONS ON THE UNIFORMITY OF THE DISTRIBUTION OF OSCILLATIONS OF ULTRASONIC DISK RADIATORS	106
<i>R.V. Tsvetkov, V.V. Epin</i> RESEARCH OF THE FLUID MOTION IN MULTISEGMENT HYDROSTATIC LEVEL	109

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

<i>I.A. Akimov, V.N. Abuzarov</i> MATHEMATICAL MODELING OF NON-STATIONARY THERMAL CONDUCTIVITY IN THE THIRD STAGE OF PRODUCTION OF MULTILAYER STRUCTURES BY THE POLYMERIZATION METHOD WITH DIFFERENT THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENTS	112
<i>I.A. Akimov, E.O. Karakulina</i> MODELING OF THE HEAT TRANSMISSION PROCESS AT THE STAGE OF STABILIZATION OF TEMPERATURE IN THE MANUFACTURE OF COMPOSITE CONSTRUCTIONS WITH A CELLULAR FILLER	116
<i>R.G. Asadullaev, V.V. Lomakin, N.P. Putivzeva, O.S. Reznichenko, Y.Y. Belokon</i> DEVELOPING OF TOOLS FOR PROJECT RISKS ASSESSMENT DURING CREATION OF INFORMATION SYSTEM FOR PUBLIC SERVICES	120
<i>E.N. Belousova, F.S. Zhafyarova</i> PERFECTION OF INFORMATION SYSTEM OF STATE PROPERTY MANAGEMENT	123
<i>D.V. Berezhnoi, M.R. Shamim, I.S. Balafendieva</i> CONSTRUCTION OF NUMERICAL METHODS FOR CALCULATION OF CLINCH CONNECTIONS	126
<i>D.V. Berezhnoi, M.R. Shamim, A.A. Sachenkov</i> NUMERICAL MODELING OF THE DEFORMATION OF A MULTILAYER SHELL WITH THERMAL FORCE LOADING	129
<i>L.N. Butymova., V.Ya. Modorskii</i> ANALYSIS WORK OF GAS-DYNAMIC FORCES IN THE LABYRINTH SEAL OF CENTRIFUGAL COMPRESSORS GAS TRANSMISSION UNITS	132
<i>L.A. Galiullin</i> DEVELOPMENT OF THE DIAGNOSTIC SYSTEM OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES	135

<i>S.V. Danilova, A.I. Ofilova, N.A. Andreeva</i> PROCESS APPROACH TO MANAGEMENT OF LOGISTIC BUSINESS PROCESSES IN INTERNET-TRADE	138
<i>V.O. Kaledin, A.D. Ulyanov, Vl.O. Kaledin</i> THE FINIT ELEMENT MODEL OF THE TIMOSHENKO BEAM WITH TEMPERATURE DEFORMATIOINS AND THERMAL DESTUCTION OF MATERIAL	141
<i>S.L. Kalyulin., V.Ya. Modorskii, K.A. Barkalov, V.P. Gergel, Yu.A. Lapteva, E.A. Kozinov</i> INTEGRATION OF THE GLOBALIZER AND ANSYS SOFTWARE FOR OPTIMIZATION OF COOLING PROCESSES IN THE GAS FLOW	145
<i>V.A. Lysov, V.S. Yanyo, A.V. Kuzmin, A.V. Schegolev, M.V. Ivanyuk, E.V. Bashirova</i> ALGORITHMIC FOUNDATION AND SOFTWARE OF THE AUTOMATED DISPLAY FLAT CURVED CONTOUR OF A SMOOTH SET ARCS OF CIRCLES	149
<i>E.V. Mekhonoshina, V.Ya. Modorskii</i> ON THE POSSIBILITY OF NUMERICAL DETERMINATION OF REFINING AEROELECTRIC COEFFICIENTS FOR NONSTATIONARY CALCULATION OF THE ROTOR OF THE CENTRIFUGAL COMPRESSOR OF GTU	153
<i>V.A. Stolyarchuk</i> OPEN SOURCE TRAINING CAD	156
<i>D.N. Timofeev, V.V. Shvedenko, O.V. Shchekochikhin</i> INTEGRATION OF INFORMATION SUPPORT OF THE ENTERPRISE ON THE BASIS OF THE METRIC SYSTEM OF INDICATORS	160
<i>V.A. Kharitonov, S.V. Leontev, A.D. Kurzanov</i> THE CONCEPT MODEL OF NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE PRODUCTION PARAMETERS AUTOMATED CONTROL	163
<i>V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, V.S. Klepov, V.E. Bazhin</i> METHOD OF CALCULATION OF EFFICIENCY OF INERTIAL DUST SOILS ON THE BASIS OF THE MODEL OF DISCRETE PHASE	166
<i>M.A. Chernoskutov</i> OVERLAPPING COMMUNITY DETECTION BASED ON EQUIDISTANT VERTICES CLUSTERING	169
<i>V.A. Shchapov, S.R. Latypov</i> THE TECHNIQUES OF RUNNING TASKS ON A SUPERCOMPUTER IN ISOLATED ENVIRONMENT WITH USING DOCKER CONTAINERS	172
<i>A.G. Shcherbinin, A.I. Kabirova</i> MATHEMATIC SIMULATION ELECTRICAL FIELD CONDUCTOR SEGMENTAL CABLE	178
<i>A.G. Shcherbinin, D.Y. Koryukin</i> MATHEMATICAL MODELLING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN CONDUCTIVE CORES OF LARGE SECTIONS	181
<i>A. Shcherbinin, S. Starikov</i> DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE FOR AUTOMATION OF THE PROCESSES OF CALCULATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS AND THERMAL RESISTANCE OF CABLE PRODUCTS OF ANY CONFIGURATIONS, IN ACCORDANCE WITH THE METHOD OF CALCULATION	184
<i>A. Shcherbinin, I. Titov</i> NUMERICAL PROBES OF ISOTHERMAL CURRENTS OF THE NEWTONIAN LIQUID IN THE PORT SHNEKOVY EXTRUDER	187
ABSTRACTS	190

02.00.00

¹Б.Н. Иванов д.т.н., ²В.С. Минкин д.х.н., ³К.Г. Николаев, ²В.С. Желтухин д.х.н.,
Р.Х. Шагимуллин к.т.н.

Казанский научно-исследовательский технологический университет,

¹нефтяной факультет, кафедра общей химической технологии,

²факультет нанотехнологий, кафедра физики,

³Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт геологии нерудных полезных ископаемых»,
Казань, ivanovbn@rambler.ru, yerus@yandex.ru, k8966808@gmail.com

ГНОСЕОЛОГИЧЕСКИЕ КОРНИ РАЦИОНАЛЬНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-9-15

Любое серьезное исследование базируется на соответствующей методологии. Глубина, границы применения и ценность последней определяются её гносеологическими корнями.

Ключевые слова: *методология, терминология, электретность, закон сохранения, вещественно-волновая природа, строение вещества.*

Создание фундаментальных методологий затруднено пробелами в используемой терминологии.

Данное обстоятельство, в немалой степени обусловлено отсутствием у многих исследователей (особенно практиков) четкого понимания между действием и его мерой¹.

Понимание этой разницы способствует более рациональному преобразованию одних видов движения материальных образований в другие. Следовательно, и более глубокому раскрытию принципиальных теоретических и практических аспектов многопрофильных и многофункциональных технологий, базирующихся на соответствующих формах проявления основного закона² мироздания.

Основным и, по сути, единственным является закон сохранения (все остальные законы – те или иные формы его проявления).

Он гласит: *ничто не возникает из ничего и ничто не исчезает в ничего.*

Именно такая формулировка, несмотря на её неконкретность, наиболее правильно раскрывает причинно-следственную связь событий (от микромира до сверхмакромира). Из закона сохранения вытекает, что структурный элемент старого качества (уровень и размеры предопределены его типом и условиями взаимодействий) переходит в новое качество. Например, часть атомов исходного вещества в процессе химического превращения входит в новую молекулу (и т.д., и т.п.).

Как многократно отмечалось нами ранее [1], «философский камень», т.е. основа всего сущего в материальном мире, уже давно, прежде всего, благодаря открытию М.В. Ломоносовым корпускулярно-волновой природы любого материального образования, найден и почти раскрыт. Однако, есть немало эзотерического. В частности, электрон (по справедливому выражению В.И. Ленина) также неисчерпаем, как и атом. И этот факт заставляет искать переход и его механизм от псевдоэлементарных частиц к микромиру, субмикромиру, макромиру, сверхмакромиру.

Этот поиск целесообразно начать с коррекции некоторых основополагающих понятий естествознания [1]. Противоречивость не только неуничтожима в целом, но и не может быть *абсолютного* перехода одного вида противоречий в другой.

Качество при переходе в новое качество частично сохраняет *количественно* основной структурный элемент (иначе нарушается принцип скачкообразности количественно-

¹ Действие – это любое материальное изменение; мера – его относительная ранжированная оценка.

² Закон проявляется *везде и всегда*. В противном случае это не закон.

качественных изменений).

Сформулированные постулаты позволяют уточнить ряд важных для практики понятий:

Процесс – переход рассматриваемой системы из одного состояния в другое. Под *состоянием* следует понимать качество предмета (вещества, поля) на данной стадии развития.

Время – объективный относительный параметр, характеризующий, прежде всего, очередность событий и их соотношение.

Поле – как и всякое материальное образование характеризуется наличием частиц с массой покоя (её принципиально невозможно определить ввиду невозможности полного покоя).

Энергия (от греч. *energeia* - действие) – в наиболее широком смысле есть *мера противоречивости*. Она может быть как мерой одного какого-либо вида противоречия, так и совокупности нескольких или всех видов противоречий, как для одного материального образования, так и для всей материи.

Таким образом, понятие энергии введено для характеристики *качества, количества и способов* движения, осуществляемого посредством вещества и поля. Т.е. термин *энергия* служит для характеристики развития и взаимодействия материальных образований. При этом не система *обладает* энергией, а систему *характеризуют* энергией.

Под обменом энергией в относительно узком смысле следует подразумевать *оценку* обмена материальными образованиями движением и веществом (вещество является носителем движения).

Этот обмен и его порядок (последовательность и степень) обусловлен причинно-следственными связями, то есть являются строго закономерными (включая случайные процессы).

Важным понятием, используемым при оценке химических процессов, является понятие энергии активации. Её характерная особенность в том, что она в принципе не может быть величиной постоянной. Устойчивость одной и той же системы (следовательно, и энергия активации) зависит не только от уровня её организации, но и от внешних условий, которые по-разному влияют на различные виды движения, происходящие в системе. Не может быть, строго говоря, постоянной величиной и внутренняя энергия системы.

Факт, что энергия активации для большинства процессов меньше энергии диссоциации наименее прочной связи в молекуле, можно объяснить следующим образом: поскольку различные виды движения «усредняются», то спектр устойчивости всей системы меньше собственного спектра колебаний отдельной связи.

Известны 3 основные материальные формы проявления закона сохранения:

- сохранение вещества ($\sum_{i=1}^n m_i = \text{const}1$, где m_i – масса материального образования или его ингредиента, включая потери);
- сохранение движения ($\sum_{i=1}^n m_i \cdot v_i = \text{const}2$, где v_i – скорость i -го движения);
- сохранение пространства ($\sum_{i=1}^n V_i = \text{const}3$, $\sum_{i=1}^n F_i = \text{const}4$, где V_i – объем, F_i – поверхность материального образования или его ингредиента).

Законы же сохранения энергии ($\sum_{i=1}^n e_i = \text{const}5$) и времени ($\sum_{i=1}^n \tau_i = \text{const}6$) представляют, по сути, балансы достаточно абстрактных величин, являющихся не самими действиями, а их ранжированными оценками. Поэтому их нельзя считать материальными формами проявления закона сохранения.

Роль волнового движения в поле проявляется нагляднее, чем в веществе. Однако соотношения величин вклада волны в структуру и движения материальных образований колеблются в относительно широком интервале в зависимости от природы ингредиентов и конкретных внешних и внутренних условий. При этом волна одновременно и носитель вещества, и совокупность вещественных частиц и систем, в соответствии с уровнем волны.

Современная трактовка вещественно-волновой природы полностью не объясняет, на наш взгляд, некоторые важные положения и факты.

Представляется целесообразным использовать наши постулаты о сохранении неизменным основного структурного элемента при переходе данного качества в новое; о невозможности абсолютного перехода одного вида противоречий в другое; о генетически первородной (в условиях земли, её недр, литосферы и атмосферы) связи вещественно-волновой природы с

гравитацией, которые позволяют, в частности, дать качественно-количественную оценку электрона, как вещественной частицы, достаточно близко отражающей дискретность и непрерывность материальных образований и их взаимодействий, включая «заряд»¹.

Не приводя здесь элементарных математических операций, представим систему базовых уравнений (1) и краевых условий (2):

$$\left. \begin{aligned} m_k &= \frac{m_{эл}}{x} \\ m_k &= \frac{m_{пр}}{y} \\ m_k &= \frac{\Delta m}{z} = \frac{m_n - m_{пр}}{z} \end{aligned} \right\} (1)$$

где $m_{эл}$ – масса электрона; m_k – масса k -й частицы, составляющей электрон; x – количество k -х частиц в электроне; $m_{пр}$ – масса протона; y – количество k -х частиц в протоне; m_n – масса нейтрона z – число k -х частиц, «нейтрализующих» протон; Δm – разница масс нейтрона и протона.

$$\left. \begin{aligned} x &= 1, 3, 5, 7, \dots \\ y &= \text{нечетное число, причем } y \gg 1 \\ z &= \text{нечетное число} > 1 \\ \varphi &= y + z - \text{четное число} \gg 2 \quad (\varphi - \text{число } k\text{-х частиц в нейтроне}) \end{aligned} \right\} (2)$$

Система (1) должна быть совместной и определенной, так как наличествуют и физический смысл, и общие краевые условия.

Одним из достаточно корректных значений « x » является «5». В этом случае получим: $x=5$, $y \approx 9453$; $z \approx 13$; $\varphi \approx 9466$; $n \approx 1891$.

Рассчитанная по этим значениям масса протона составляет $17221,6 \cdot 10^{-31}$. Справочное значение массы протона $\sim 16725,2 \cdot 10^{-31}$.

Разница справочного и рассчитанного значения составляет:

$$\frac{17221,6 \cdot 10^{-31} - 16725,2 \cdot 10^{-31}}{16725,2 \cdot 10^{-31}} \cdot 100\% \approx 3\%.$$

Эта цифра совпадает с годовым колебанием частоты гравитационного поля Солнца, в котором находится Земля. Не беремся утверждать о всеобъемлющей роли гравитации, но асимметрия колебаний молекул и атомов первоначально порождена, очевидно, ею.

Одним из возможных методов подтверждения этих положений является теплотрическое исследование, поскольку тепловое движение – уникальный вид движения. Оно одновременно и универсально (присуще всем материальным образованиям), и в то же время его невозможно выделить индивидуально. Оно – и причина, и результат взаимодействий. Не случайно теплоемкость характеризует, очевидно, способность системы поглощать определенное количество теплового движения (полученного любым способом) без его существенного перераспределения, то есть без совершения работы. Степень этой способности определяется строением и составом системы (поэтому удельные теплоемкости органических гомологов в одном агрегатном состоянии близки друг к другу).

Для получения тепловизионных снимков нами использовался термограф ИРТИС, представляющий собой прецизионный оптико-механический сканирующий прибор с инфракрасным приемником визуализации и измерения тепловых полей с построено-кадровой разверткой инфракрасного изображения поверхности, имеющий чувствительность $0,05$ °С. Тепловизор обеспечивает представление уровня температур на термоизображении поверхности как в серой шкале, так и в цветовой непрерывной гамме с 5, 10 и 128 уровнями градаций, а также построение профиля температур по линии на термоизображении. Тепловизор позволяет определять на термоизображении поверхности зоны с максимальными и минимальными температурами и зоны с температурой выше или ниже фоновой температуры.

Технические характеристики прибора:

¹ В нашем понимании, заряд – некомпенсированные на поверхностях микрочастиц количества вещества и движения. Прежде всего, на поверхностях ассоциатов. Неслучайно электрические, тепловые, магнитные виды движения в значительной мере обусловлены внутренним и внешним трением.

ИК-приемник InSb
 Спектральный диапазон 3-5 мкм
 Чувствительность на 30 °С 0,05 °С
 Диапазон измерений -40 – +200°С
 Точность измерения ±1%
 Рабочие температуры -40 – +200°С
 Пространственное разрешение менее 2 мрад
 Поле зрения камеры 25×20 град
 Разрешение кадра 256×256
 Время сканирования кадра 1,5 сек.

Проведенные эксперименты (часть результатов представлена на рис. 1, 2) показали, что поверхность как неподвижной, так и движущейся жидкости состоит из локальных областей с температурами, отличающимися друг от друга и фоновой температуры поверхности жидкости.

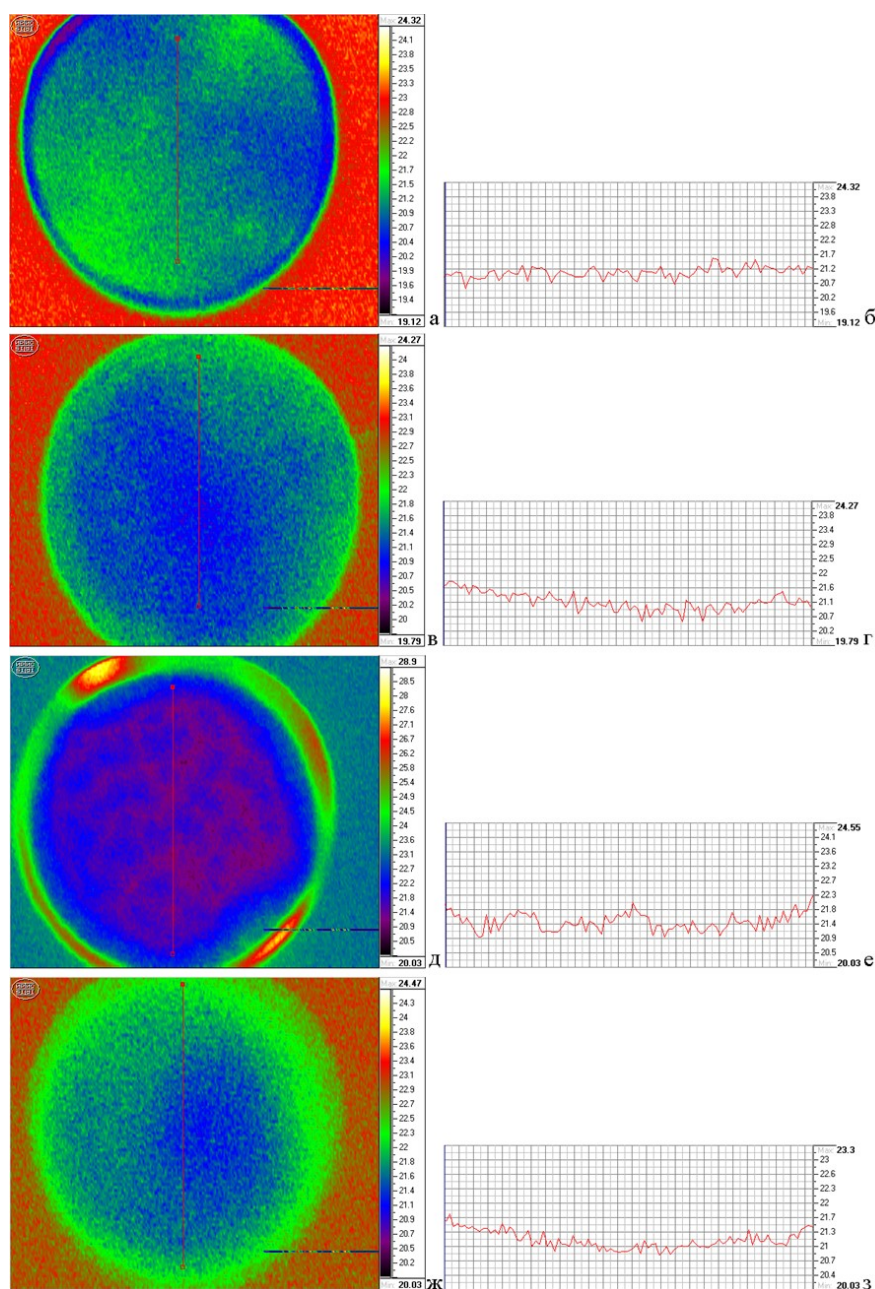


Рис. 1– Термоизображения поверхности «статических» жидкостей и профили температур по линии на термоизображении: а, б – бензин А-76; в, г – этанол; д, е – нефть; ж, з – вода.

Влияние движения жидкостного потока оценивалось по результатам тепловизионной съемки течения тонкой пленки дистиллированной воды.

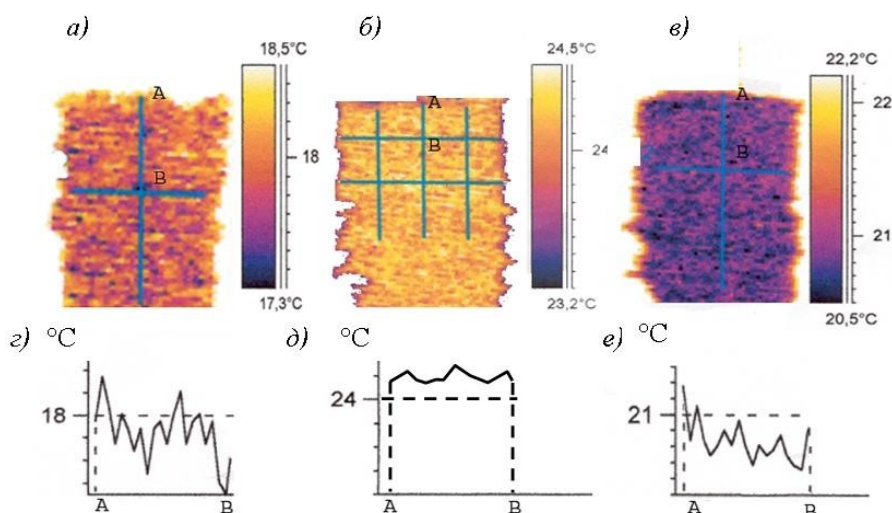


Рис. 2– Термоизображения поверхности потока воды: *а* – при скорости кадровой развертки меньшей скорости движения метки потока; *б* – при скорости кадровой развертки равной скорости движения метки потока; *в* – при скорости кадровой развертки большей скорости движения метки потока; *г* – профиль температур по линии АВ на термоизображении *а*; *д* – профиль температур по линии АВ на термоизображении *б*; *е* – профиль температур по линии АВ на термоизображении *в*.

Как видно из рис. 2 на поверхности жидкости разрушаются и вновь образуются (т. е. постоянно существуют) ассоциаты с отличающейся интенсивностью теплового движения от общей (чаще всего меньше) интенсивности системы. Данное явление можно использовать как своеобразную метку для контроля движения жидкости и получения данных о скорости потока.

Время жизни подобных «меток» может составлять 5 – 20 секунд, что говорит об их относительной устойчивости. Размер наиболее крупных наблюдаемых ассоциатов порядка 1мм. Как показала тепловизионная съемка, подобные частицы образуются и у жидкостей другой природы, причем время жизни и размеры меток примерно такие же. По нашему мнению, это максимально возможные ассоциаты, которые образуются в жидкостях при нормальных условиях. Более мелкие ассоциаты, входящие в данные, должны иметь большую устойчивость, а значит и более долгое время жизни. Такое деление (причем асимметричное) идет до ассоциатов, которые разрушаются только при переходе из жидкого состояния в парообразное (в последнем деление продолжается на наноуровне).

Под устойчивыми ассоциатами мы понимаем системы, состоящие из $10^{10} - 10^{12}$ молекул и соответственно имеющие средний диаметр $1 - 2 \cdot 10^{-6}$ метра. С помощью термографа ИРТИС-2000 зафиксировать такие ассоциаты невозможно. Однако можно уточнить размер наибольших ассоциатов которые фиксируются прибором. При естественной тепловой флуктуации поверхности жидкости, если она обусловлена только броуновским движением молекул, размеры меток для разных жидкостей либо одинаковы, либо различие размеров не выходит за рамки погрешности прибора. В противном случае, размер крупных ассоциатов должен различаться.

Полученные результаты четко свидетельствуют, что ассоциаты и процессы их взаимодействия склонны к самоорганизации. В качестве практического приложения можно привести пример использования тех или иных полей (например, акустических), которые, ассоциируясь, аккумулируют энергию, а при последующем диссоциировании увеличивают силу своего воздействия на исследуемый объект.

Обоснованная [3] четвертая форма проявления закона сохранения – закон форм существования и взаимных переходов материальных образований – объясняет, объединяет и примиряет теорию строения веществ А.М. Бутлерова и «резонансную» теорию Л. Полинга.

Главное их различие (кроме хронологического первенства А.М. Бутлерова) в том, что Лайнус Полинг, правильно говоря, что существует много форм состояния молекул (лучше го-

ворить - множество), и указывая, что наиболее активны «резонансные состояния», почему-то относит их к виртуальным и, даже, нематериальным состояниям.

Лейтмотив теории А.М. Бутлерова проявляется в сочетании двух постулатов:

- 1) природа веществ (состав и строение на микроуровне) определяет их физические и химические свойства,
- 2) в молекуле атомы, фактически, сохраняют свою самостоятельность.

Представляется логичным предположить, что они, говоря об одних и тех же системах, всё же рассматривают разные уровни ассоциативности. Поэтому теория Л. Полинга лучше объясняется статистической термодинамикой, А.М. Бутлерова – классической химической термодинамикой. Кроме того, закон форм существования и взаимных переходов материальных образований способствует, по нашему мнению, и определению прямой связи изменения скорости химической реакции с изменениями скоростей движения составляющих реакцию систему частиц, что позволит предложить новые методы повышения интенсивности и селективности химико-технологических процессов (в первую очередь, механохимические).

Определение количественной оценки связи изменения скорости химической реакции с изменением линейных скоростей механического движения микрочастиц и их макропотока, в принципе, посильная задача. О такой возможности упоминал еще творец теории строения органических соединений Александр Михайлович Бутлеров: «Быть может, не ошибется тот, кто назовет движением все явления химизма. Если наступит время, которое уяснит причинную связь между всеми видами этого движения, то явление химизма получит свою механическую теорию».

Именно корреляция тепловых, электрических и трибохимических свойств позволяет объяснить, предсказать и использовать механохимические процессы. В том числе явление третности. Нами для оценки взаимосвязи изменений скоростей химических и физических движений частиц в искомой системе предлагается совместное использование системы характеристических волновых уравнений (ХВУ), количественно оценивающих тепловые, электрические и трибохимические явления.

Для каждой материальной системы в зависимости от уровня её организации (электрон, молекула, живой организм и т.п.) характерен свой количественный скачок, определяющий возникновение нового структурного образования. Следовательно, в природе одновременно происходит и протекание каждого процесса на своем уровне, и их интеграция.

Абстрагируясь от природы материальных образований и их взаимосвязей, можно выделить верхний и нижний уровень количества движения. Значения энергий верхнего и нижнего пределов определяются силами отталкивания и притяжения. Если превалирует притяжение, происходит повышение уровня структурности системы, если отталкивание – его понижение.

По нашему мнению, основной, хронологически первой, причиной практически всякого взаимодействия служит гравитационное притяжение. Неслучайно закон электростатического притяжения Кулона ($E \sim \varepsilon \frac{q_1 - q_2}{r^2}$, где q_1 и q_2 – заряды частиц, r – расстояние между зарядами, ε – величина, обратная электрической постоянной), положенный в основу большинства современных воззрений на суть химической связи, математически записывается идентично закону Всемирного тяготения Ньютона ($G \sim \gamma \frac{m_1 - m_2}{r^2}$, где m_1 , m_2 – массы притягивающихся тел, r – расстояние между центрами их тяжести, γ – гравитационная постоянная).

Даже не претендуя на точное понимание природы химической связи, ясно, что она вещественно-волновая, которая предполагает, что «носителями» волны являются материальные частицы, а носителями последних – волна.

В огромном интервале между микромиром и сверхмакромиром – субмакромире, «невидимость» проявления вещественно-волновой природы, по-видимому, объясняется тем, что размеры частиц либо много больше (по сравнению с частицами и волнами микромира), либо много меньше длин колебаний (по сравнению с планетами и их волновым движением).

Химическое взаимодействие, при частичном сохранении основных (физических) исходных взаимодействий, сопровождается количественным скачком с образованием нового качества, вследствие чего химическое взаимодействие, по нашему мнению, нельзя считать адди-

тивной функцией физических.

Под химической связью следует, в первую очередь, понимать резонансное движение (и результат этого движения) противоположно движущихся электронов (в атоме – резонанс между электроном и ядром).

Не вдаваясь в суть вопроса о типах химической связи (по нему существует огромное количество общей и специальной литературы), отметим некоторые характерные, на наш взгляд, особенности радикальных, ионных и молекулярных взаимодействий.

Считается, что существуют свободные радикалы, способные перемещаться на значительные расстояния. Однако при времени существования $10^{-12} - 10^{-13}$ сек, максимальные расстояния, которые они при этом успевают пройти, не могут превышать нескольких микронов ($l = \omega \cdot \tau \approx 10^5 \text{ км/сек} \cdot 10^{-13} \text{ сек} = 10 \text{ мкм}$). Нам представляется, что происходят непрерывные, вызывающие друг друга, образование и гибель свободных радикалов, вследствие чего происходит их постепенное перемещение в пространстве.

Важной особенностью ионного взаимодействия является то, что они могут преодолевать очень значительные расстояния (например, в гальванических ваннах, аккумуляторах и т.п.).

Для молекулярного типа взаимодействия характерно сохранение атомами реагирующих молекул практически своей полной индивидуальности. При этом наиболее активным является резонансное состояние молекулы.

Таким образом, основная общность физических и химических взаимодействий проявляется в едином носителе, а основное отличие – в величине этого носителя, скорости и количестве его движения.

РЕЗЮМЕ

Введение в гносеологические корни методологии разработки эффективных электрентных взаимодействий и их носителей обусловлено важностью и глубиной данного вопроса. По сути электрентность – это результат триединого проявления трения, электрического и теплового движений. Причем и физической, и химической, и физико-химической природы.

Поэтому разработка научно обоснованных рациональных технологий получения и применения электрентов должна базироваться на гносеологических корнях электрентности.

Сама методология разработки технологий изложена в следующей статье.

Список литературы

1. *Иванов, Б.Н.* Качественный подход к оценке реакционной способности материальных образований. Сообщение / Б.Н. Иванов // ВИНТИ. – 1987. – №2338. – В87
2. *Иванов, Б.Н.* К вопросу об энерго-аналитической оценке процессов нефтепереработки / Б.Н. Иванов // Интенсификация химических процессов переработки нефтяных компонентов: Межвуз. сб. – Казань, 1991. – с.74-79.
3. *Иванов, Б.Н.* Некоторые трибологические аспекты сложных жидкофазных органических систем. Сообщение 1 / Б.Н. Иванов, Р.Н. Костромин, А.Р. Садыков // Вестник Казанского технологического университета – Казань, 2004. – №2. – с.57-63
4. *Иванов, Б.Н.* «Философский камень» жидкофазных процессов химической технологии. Часть 1, часть 2 / Б.Н. Иванов // Энергосбережение в Республике Татарстан. – Казань, 2005. – №21-22. – с.20-24; Казань, 2006-2007. – №23-24. – с.61-66
5. *Иванов, Б.Н.* Онтология теоретических основ химической технологии: учебное пособие / Б.Н. Иванов – Казань: КГТУ, 2006. – 72с.
6. *Иванов, Б.Н.* Практическое применение характеристического уравнения / Б.Н. Иванов, Р.Н. Костромин // Энергетика Татарстана. – 2013. – №3. – с.30-34
7. *Kostromin, R.N.* The Conjugated Qualitative and Quantitative Approximation of Water, Salt, Sulfur, Asphaltene and Mechanical Ingredients of Oil-Containing Systems Interrelation./ R.N. Kostromin, B.N. Ivanov, M.S. Petrovnina, M.I. Safiullin. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 2015. – Volume 6, Issue 6, 2015 (November – December).- Pp.1612-1616.
8. *Иванов, Б.Н.* Четвертая материальная форма проявления закона сохранения / Б.Н. Иванов, А.К. Мезиков // Энергетика Татарстана, 2016, №2, с.62-67

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА (01.01.00)

01.01.00

В.Д. Петелина

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

**О ПОСТРОЕНИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ
УРАВНЕНИЙ ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА****DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-16-22**

Статья посвящена определению возмущений 2-го и более высоких порядков от Луны в прямоугольных координатах и составляющих скорости движения космического аппарата. Строится специальная система дифференциальных уравнений возмущенного движения, правые части этой системы представляются конечными многочленами относительно независимой регуляризирующей переменной. Это позволяет построить единый алгоритм для определения возмущений 2-го и более высоких порядков в виде конечных многочленов относительно некоторых регуляризирующих переменных, которые выбираются на каждом этапе приближения.

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

Теоретически обосновывая проблемы межпланетных полетов, К.Э. Циолковский выполнил ряд приближенных расчетов, касающихся полета космического аппарата в поле тяготения двух тел. Он разработал некоторые вопросы механики возмущенного движения искусственных спутников планеты, высказал ряд рекомендаций относительно способов расчета возмущенных траекторий полета. Но все эти вычисления проводились фактически в рамках невозмущенной задачи двух тел. Дальнейшие уточнения требуют анализа возмущенного движения тела, построения формул для вычисления траектории полета тела с учетом различных внешних факторов.

В проблеме межпланетных полетов одной из важных задач является приближение прямоугольных координат, составляющих скорости космического аппарата и времени на пассивном участке полета алгебраическими многочленами наименьшей степени относительно вспомогательной переменной с наперед заданной степенью точности.

В настоящей работе строится специальная система дифференциальных уравнений возмущенного движения космического аппарата к Луне и производится интегрирование этой системы методом последовательных приближений, при использовании которого координаты и составляющие скорости космического аппарата представляются в виде многочленов по степеням некоторой вспомогательной переменной. При этом на каждом этапе приближения выбирается своя независимая переменная.

Задача ставится следующим образом. Исследуется пространственное, почти-параболическое, геоцентрическое движение к Луне космического аппарата, который считается материальной точкой. Задача рассматривается в рамках ограниченной задачи трех тел, где Луна оказывает на движение космического аппарата возмущающее действие, которое заключается в ее притяжении. В работе строится алгоритм расчета возмущений любого порядка от Луны в прямоугольных координатах, составляющих скорости и времени движения космического аппарата, и он доводится до реализации на ЭВМ для получения

результатов в виде коэффициентов соответствующих многочленов. При этом впервые осуществляется представление указанных выше функций конечными многочленами на различных этапах приближения с высокой степенью точности. За исходное приближение выбирается невозмущенная параболическая или почти-параболическая орбита. В качестве исходной системы уравнений выбрана система регуляризованных уравнений невозмущенной задачи двух тел [1, стр.36]:

$$\begin{aligned}x'' &= 2hx - f_1 & x''' &= 2hx' \\y'' &= 2hy - f_2 & y''' &= 2hy' \\z'' &= 2hz - f_3 & z''' &= 2hz' \\r'' &= 2hz + \mu \\t' &= \frac{dt}{d\psi} = r ; \quad h = \frac{\xi^{12} + \eta^{12} + \zeta^{12}}{2\rho^2} - \frac{\mu}{\rho} \\ \rho &= \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}\end{aligned} \quad (1)$$

где μ - произведение постоянной тяготения на массу Земли,

h - постоянная интеграла энергии,

f_1, f_2, f_3 - постоянные интегралов Лапласа,

ψ - регуляризирующая переменная,

ξ, η, ζ - начальные значения прямоугольных координат.

Регуляризация проводится с целью упрощения правых частей системы дифференциальных уравнений движения космического аппарата и аналитических свойств решения. Поставим задачу Коши для системы (1). Необходимо найти решение этой системы для начальных значений координат ξ, η, ζ составляющих регуляризованной скорости ξ', η', ζ' и начального момента времени τ при заданном значении независимой регуляризирующей переменной ψ . Выбираем это значение произвольно, считаем его равным нулю. Общее решение системы (1) будем искать в виде рядов по степеням регуляризирующей переменной ψ вида

$$x = \xi + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \cdot \xi^{(k)} \cdot \psi^k \quad (2)$$

Имеем:

$$x' = \xi' + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \cdot \xi^{(k+1)} \cdot \psi^k \quad (3)$$

$$x'' = \xi'' + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \cdot \xi^{(k+2)} \cdot \psi^k \quad (4)$$

Подставим выражения (2), (4) в первое уравнение (1). Получим в левой и правой частях уравнения (1) ряды по степеням ψ . Приравнявая коэффициенты в обеих частях уравнения (1) при одинаковых степенях ψ .

Получим:

$$\xi'' = 2 \cdot h \cdot \xi - f_1, \quad \xi''' = 2 \cdot h \cdot \xi', \quad \xi^{IV} = 2 \cdot h \cdot \xi'', \dots$$

Таким образом:

$$\xi^{(k+2)} = 2 \cdot h \cdot \xi^{(k)}, \quad \text{если } k=1, 2, \dots$$

Отсюда следует, что четные коэффициенты рекуррентным образом выражаются через четные, нечетные через нечетные. Поэтому можно ввести функции:

$$S_1 = \frac{\psi}{1!} + \frac{\sigma \psi^3}{3!} + \frac{\sigma^2 \psi^5}{5!} + \dots$$

$$S_2 = \frac{\psi^2}{2!} + \frac{\sigma\psi^4}{4!} + \frac{\sigma^2\psi^6}{6!} + \dots$$

и вообще,

$$S_k = \frac{\psi^k}{k!} + \frac{\sigma \cdot \psi^{k+2}}{(k+2)!} + \dots = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{\sigma^l \psi^{k+2l}}{(k+2l)!}, \quad (5)$$

где $\sigma = 2h$

Функции S_k ($k=0,1,2,\dots$) называются обобщенными функциями Штумпфа. Заметим, что между функциями S_k существуют рекуррентные отношения следующего вида:

$$S_k = \frac{\psi^k}{k!} + \sigma \cdot S_{k+2}, \quad S'_k = S_{k-1}, \quad S_{k+1} = \int_0^\psi S_k d\psi, \quad (k=2,3,\dots)$$

Таким образом, выражение (2) с помощью функций S_k можно представить в следующем виде:

$$x = \xi + \xi' \cdot S_1 + \xi'' \cdot S_2 \quad (6)$$

Функции S_k являются целыми, они сходятся абсолютно при любых значениях σ и ψ .

Итак, в задаче 2-х тел прямоугольные координаты, составляющие регуляризированной скорости и время невозмущенного движения представляются сходящимися рядами по степеням некоторой регуляризирующей переменной ψ для всех начальных значений координат, составляющих регуляризированной скорости и времени, если начальное значение радиуса вектора ρ отлично от нуля. Общее решение системы (1) запишем в виде:

$$\begin{aligned} x &= \xi + \xi' \cdot S_1 + \xi'' \cdot S_2, \quad x' = \xi' + \xi'' \cdot S_1 + \xi''' \cdot S_2 = \xi' \cdot S_0 + \xi'' \cdot S_1 \\ y &= \eta + \eta' \cdot S_1 + \eta'' \cdot S_2, \quad y' = \eta' \cdot S_0 + \eta'' \cdot S_1 \\ z &= \zeta + \zeta' \cdot S_1 + \zeta'' \cdot S_2, \quad z' = \zeta' \cdot S_0 + \zeta'' \cdot S_1 \\ r &= \rho + \rho' \cdot S_1 + \rho'' \cdot S_2, \quad t = \tau + \rho \cdot \psi + \rho' \cdot S_2 + \rho'' \cdot S_3 \end{aligned} \quad (7)$$

Начальные значения регуляризированной скорости ξ', η', ζ' связаны с начальными значениями обычной скорости ξ, η, ζ следующим образом:

$$\xi' = \xi \cdot \rho; \quad \eta' = \eta \cdot \rho; \quad \zeta' = \zeta \cdot \rho \quad (8)$$

Система дифференциальных уравнений невозмущенного движения для задачи 2-х тел может быть записана в виде:

$$x'' = \frac{r' \cdot x'}{r} - \frac{\mu \cdot x}{r}, \quad y'' = \frac{r' \cdot y'}{r} - \frac{\mu \cdot y}{r}, \quad z'' = \frac{r' \cdot z'}{r} - \frac{\mu \cdot z}{r} \quad (9)$$

равносильном системе первых трех уравнений (1). С помощью уравнений (9) получим начальные значения регуляризированного ускорения:

$$\xi'' = \frac{\rho' \cdot \xi'}{\rho} - \frac{\mu \cdot \xi}{\rho}, \quad \eta'' = \frac{\rho' \cdot \eta'}{\rho} - \frac{\mu \cdot \eta}{\rho}, \quad \zeta'' = \frac{\rho' \cdot \zeta'}{\rho} - \frac{\mu \cdot \zeta}{\rho}$$

Так как правые части исходных регуляризированных уравнений (1) не зависят явно от независимой переменной ψ , то в любом интеграле, связывающем текущие и начальные значения прямоугольных координат, составляющих скорости, времени и переменной ψ , можно начальные и текущие значения поменять местами, а у переменной ψ изменить знак, т.е. делается замена:

$$\xi^{(k)}, \eta^{(k)}, \zeta^{(k)}, \tau, \psi \Leftrightarrow x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)}, t, -\psi \quad (10)$$

Учитывая эту замену, получим следующие уравнения, связывающие $\xi, \eta, \zeta, \xi', \eta', \zeta', \xi'', \eta'', \zeta''$ с $x, y, z, x', y', z', x'', y'', z''$.

Вида:

$$\begin{aligned}
 \xi &= x - x' \cdot S_1 + x'' \cdot S_2, & \xi' &= x' \cdot S_0 - x'' \cdot S_1 \\
 \eta &= y - y' \cdot S_1 + y'' \cdot S_2, & \eta' &= y' \cdot S_0 - y'' \cdot S_1 \\
 \varsigma &= z - z' \cdot S_1 + z'' \cdot S_2, & \varsigma' &= z' \cdot S_0 - z'' \cdot S_1 \\
 \xi'' &= x'' \cdot S_0 - x' \cdot \sigma \cdot S_1, & \rho &= r - r' \cdot S_1 + r'' \cdot S_2, \\
 \eta'' &= y'' \cdot S_0 - y' \cdot \sigma \cdot S_1, & \rho' &= r' \cdot S_0 + r'' \cdot S_1, \\
 \varsigma' &= z'' \cdot S_0 - z' \cdot \sigma \cdot S_1, & \rho'' &= \sigma \cdot \rho + \mu = r'' \cdot S_0 - r' \cdot \sigma \cdot S_1 \\
 \tau &= t - r \cdot \psi + r' \cdot S_2 - r'' \cdot S_3
 \end{aligned} \tag{11}$$

Уравнения (11) представляют собой первые интегралы регуляризованных уравнений невозмущенной задачи 2-х тел.

Регуляризованные уравнения возмущенного движения имеют вид:

$$\begin{aligned}
 x'' &= \frac{x' \cdot r' - \mu \cdot x}{r} + r^2 \cdot X \\
 y'' &= \frac{y' \cdot r' - \mu \cdot y}{r} + r^2 \cdot Y \\
 z'' &= \frac{z' \cdot r' - \mu \cdot z}{r} + r^2 \cdot Z
 \end{aligned} \tag{12}$$

Где X, Y, Z – составляющие возмущающего ускорения из-за притяжения космического аппарата Луной:

$$\begin{aligned}
 X &= \mu_1 \cdot \left(\frac{x_1 - x}{\Delta_1^3} - \frac{x_1}{r_1^3} \right) \\
 Y &= \mu_1 \cdot \left(\frac{y_1 - y}{\Delta_1^3} - \frac{y_1}{r_1^3} \right) \\
 Z &= \mu_1 \cdot \left(\frac{z_1 - z}{\Delta_1^3} - \frac{z_1}{r_1^3} \right)
 \end{aligned} \tag{13}$$

x_1, y_1, z_1 , - координаты Луны,

Δ_1 , - взаимное расстояние между космическим аппаратом и Луной

$$\Delta_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2},$$

r_1 - геоцентрическое расстояние до Луны.

Применим к регуляризованным уравнениям (11) основную операцию. Рассматриваем первую группу уравнений (11). Если ξ – постоянная первого интеграла уравнений невозмущенного движения, то

$$\frac{d\xi}{d\psi} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \cdot t' + \frac{\partial \xi}{\partial x} \cdot x' + \frac{\partial \xi}{\partial y} \cdot y' + \frac{\partial \xi}{\partial z} \cdot z' + \frac{\partial \xi}{\partial x'} \cdot x'' + \frac{\partial \xi}{\partial y'} \cdot y'' + \frac{\partial \xi}{\partial z'} \cdot z'' = 0$$

Заменим x'', y'', z'' выражениями (12) тогда,

$$\frac{d\xi}{d\psi} = r^2 \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x'} \cdot X + r^2 \cdot \frac{\partial \xi}{\partial y'} \cdot Y + r^2 \cdot \frac{\partial \xi}{\partial z'} \cdot Z \tag{14}$$

Для определения $\frac{d\xi}{d\psi}$ необходимо найти производные $\frac{\partial \xi}{\partial x'}, \frac{\partial \xi}{\partial y'}, \frac{\partial \xi}{\partial z'}$

Имея в виду, что x'', y'', z'' определяются формулами невозмущенного движения, запишем следующие соотношения.

$$x'' = \frac{x' \cdot (x \cdot x' + y \cdot y' + z \cdot z')}{r^2} - \frac{\mu x}{r}; \quad r'' = \sigma r + \mu$$

$$\sigma = \frac{(x')^2 + (y')^2 + (z')^2}{r^2} - \frac{2\mu}{r}$$

Из этих уравнений имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x''}{\partial x'} &= \frac{x \cdot x' + y \cdot y' + z \cdot z'}{r^2} + \frac{x \cdot x'}{r^2} = \frac{r \cdot r' + x \cdot x'}{r^2} \\ \frac{\partial x''}{\partial y'} &= \frac{x' \cdot y}{r^2}; \quad \frac{\partial x''}{\partial z'} = \frac{x' \cdot z}{r^2} \\ \frac{\partial r''}{\partial x'} &= r \frac{\partial \sigma}{\partial x'} = \frac{2x'}{r}; \quad \frac{\partial r''}{\partial y'} = \frac{2 \cdot y'}{r}; \quad \frac{\partial r''}{\partial z'} = \frac{2 \cdot z'}{r} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial x'} &= \frac{2 \cdot x'}{r^2}; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial y'} = \frac{2 \cdot y'}{r^2}; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial z'} = \frac{2 \cdot z'}{r^2} \end{aligned} \quad (15)$$

Используя соотношения (15) получим уравнение для определения переменной величины σ следующего вида

$$\frac{d\sigma}{d\psi} = r^2 \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x'} \cdot X + \frac{\partial \sigma}{\partial y'} \cdot Y + \frac{\partial \sigma}{\partial z'} \cdot Z \right) = 2(x' \cdot X + y' \cdot Y + z' \cdot Z) = 2R' \quad (16)$$

Где:

$$R' = x' \cdot X + y' \cdot Y + z' \cdot Z;$$

$$R = x \cdot X + y \cdot Y + z \cdot Z$$

Определим частные производные $\frac{\partial \xi}{\partial x'}, \frac{\partial \xi}{\partial y'}, \frac{\partial \xi}{\partial z'}$ используя первое уравнение (11), уравнение

(16) и зависимость S_k от σ .

$$\begin{aligned} r^2 \frac{\partial \xi}{\partial x'} &= r^2 \cdot \left(-S_1 + S_2 \cdot \frac{\partial x''}{\partial x'} - x' \cdot \frac{\partial S_1}{\partial x'} + x'' \cdot \frac{\partial S_2}{\partial x'} \right) = -r^2 \cdot S_1 + S_2 (r \cdot r' + x \cdot x') - \\ &- x' \cdot \frac{\partial S_1}{\partial \sigma} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x'} + x'' \cdot \frac{\partial S_2}{\partial \sigma} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x'} = -r^2 \cdot S_1 + S_2 (r \cdot r' + x \cdot x') - x' \cdot \frac{\partial S_1}{\partial \sigma} \cdot 2x' + \\ &+ x'' \cdot 2x' \cdot \frac{\partial S_2}{\partial \sigma} = r(r' \cdot S_2 - r \cdot S_1) + x' \left(x \cdot S_2 - 2x' \cdot \frac{\partial S_1}{\partial \sigma} + 2x'' \cdot \frac{\partial S_2}{\partial \sigma} \right); \\ r^2 \frac{\partial \xi}{\partial y'} &= r^2 \cdot \left(S_2 \cdot \frac{\partial x''}{\partial y'} + x'' \cdot \frac{\partial S_2}{\partial y'} - x' \cdot \frac{\partial S_1}{\partial y'} \right) = x'y \cdot S_2 + \left(2x'' \cdot \frac{\partial S_2}{\partial \sigma} - 2x' \cdot \frac{\partial S_1}{\partial \sigma} \right) \cdot y'; \\ r^2 \frac{\partial \xi}{\partial z'} &= r^2 \cdot \left(S_2 \cdot \frac{\partial x''}{\partial z'} + x'' \cdot \frac{\partial S_2}{\partial z'} - x' \cdot \frac{\partial S_1}{\partial z'} \right) = x'z \cdot S_2 + \left(2x'' \cdot \frac{\partial S_2}{\partial \sigma} - 2x' \cdot \frac{\partial S_1}{\partial \sigma} \right) \cdot z'; \end{aligned} \quad (17)$$

Функции Штумпфа S_k ($k=0,1,2,\dots$) имеют различные аналитические представления в зависимости от знака постоянной интеграла энергии h . Если $h>0$, то орбита двух тел – гипербола и функции S_k имеют вид:

$$S_0 = chH, \quad S_1 = \frac{shH}{\sqrt{\sigma}}, \quad S_2 = \frac{chH-1}{\sigma}, \quad S_1 = \frac{shH}{\sigma\sqrt{\sigma}}, \dots$$

где $H = \sqrt{\sigma} \cdot \psi$

Если $h=0$, орбита – парабола и функции S_k представляются многочленами:

$$S_0 = 1, S_1 = \psi, S_2 = \frac{\psi^2}{2}, S_3 = \frac{\psi^3}{6}, \dots \quad (18)$$

Если $h < 0$, орбита – эллипс и функции S_k имеют вид:

$$S_0 = \cos J, S_1 = \frac{\sin J}{\sqrt{-\sigma}}, S_2 = \frac{1 - \cos J}{-\sigma}, S_3 = \frac{J - \sin J}{-\sigma \cdot \sqrt{-\sigma}}, \dots$$

где $J = \sqrt{-\sigma} \cdot \psi$

Определим частные производные $\frac{\partial S_k}{\partial \sigma}$. Дифференцируем ряд для S_k (5) по σ , в результате получим:

$$2 \frac{\partial S_k}{\partial \sigma} = 2 \cdot \sum_{l=1}^{\infty} \frac{l \cdot \sigma^{l-1} \cdot \psi^{k+2l}}{(k+2l)!} = \psi \cdot \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\sigma^{l-1} \cdot \psi^{k+2l-1}}{(k+2l-1)!} - k \cdot \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\sigma^{l-1} \cdot \psi^{k+2l}}{(k+2l)!}, \quad (19)$$

т.к.

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l \cdot \sigma^{l-1} \cdot \psi^{k+2l}}{(k+2l)!} + k \cdot \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\sigma^{l-1} \cdot \psi^{k+2l}}{(k+2l)!} &= \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(2l+k) \cdot \sigma^{l-1} \cdot \psi^{k+2l}}{(k+2l)!} = \\ &= \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(2l+k) \cdot \psi \cdot \sigma^{l-1} \cdot \psi^{k+2l-1}}{(k+2l-1)! (k+2l)} = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\psi^{k+2l} \cdot \sigma^{l-1}}{(k+2l-1)!} \end{aligned}$$

Заменяя переменную суммирования в выражении (19) $l=m+1$, получим:

$$2 \frac{\partial S_k}{\partial \sigma} = \psi \cdot S_{k+1} - k \cdot S_{k+2} \quad (20)$$

Таким образом,

$$2 \frac{\partial S_1}{\partial \sigma} = \psi \cdot S_2 - S_3, \quad 2 \frac{\partial S_2}{\partial \sigma} = \psi \cdot S_3 - 2S_4 \quad (21)$$

Стоящие в выражениях (17) круглые скобки можно преобразовать следующим образом, используя выражения для функций S_k (18) и их частных производных по σ (21)

$$\begin{aligned} r' \cdot S_2 - r \cdot S_1 &= (\rho' \cdot S_0 + \rho'' \cdot S_1) \cdot S_2 - (\rho + \rho' \cdot S_1 + \rho'' \cdot S_2) \cdot S_1 = -\rho \cdot S_1 + \rho' \cdot (S_0 \cdot S_2 - S_1^2) = \\ &= -\rho \cdot S_1 + \rho' \cdot S_2; \\ -x' \cdot 2 \frac{\partial S_1}{\partial \sigma} + x'' \cdot 2 \frac{\partial S_2}{\partial \sigma} &= -(\xi' \cdot S_0 + \xi'' \cdot S_1) \cdot (\psi \cdot S_2 - S_3) + (\xi'' \cdot S_0 + \xi' \cdot \sigma \cdot S_1) \cdot (\psi \cdot S_3 - 2S_4) = \\ &= -S_2 \cdot (\xi' \cdot S_1 + \xi'' \cdot S_2) + S_3 \cdot \xi' = S_2 \cdot (\xi - x) + S_3 \cdot \xi' \end{aligned} \quad (22)$$

Подставляя полученные соотношения (22) в выражения (17), а результаты подстановки в выражение (14), получим уравнения для определения ξ, η, ζ . Таким образом, получены уравнения, представляющие собой первые интегралы регуляризованных уравнений невозмущенной задачи двух тел, и на основе этих уравнений и проведения ряда преобразований построена специальная система регуляризованных уравнений возмущенного движения [2 стр.254-255 формулы (30-34)]. Искомые функциями в построенной системе дифференциальных уравнений возмущенного движения являются оскулирующие начальные значения прямоугольных координат ξ, η, ζ составляющих регуляризованной скорости ξ', η', ζ' регуляризованного ускорения ξ'', η'', ζ'' оскулирующие начальные значения момента времени τ , радиуса вектора ρ и его производных ρ' и ρ'' по независимой регуляризующей переменной ψ . Нормирование регуляризующей переменной ψ дает представление указанных возмущений в виде конечных многочленов наинизшей степени.

Основные выводы по работе сводятся к следующему:

- Построена специальная система дифференциальных уравнений возмущенного движения космического аппарата к Луне, позволяющая представить прямоугольные координаты, составляющие регуляризированной скорости и время движения во втором и более высоких приближениях конечными алгебраическими многочленами относительно особым образом введенной регуляризирующей переменной, которая выбирается на каждом этапе приближения.
- Строго доказана возможность представления указанных выше функций многочленами по степеням регуляризирующей переменной.

Список литературы

1. *Яров-Яровой М.С.* Аналитическая теория движения космического корабля к Луне. – Труды Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга, т. 36, М., 1967, стр.24-160.
2. *Петелина В.Д.* Возмущения второго и более высоких порядков от Луны при геоцентрическом движении космического аппарата. – В сб.: Проблемы исследования Вселенной. Развитие методов астрономических исследований, вып.8, М.-Л., 1979, стр. 247-258.

01.01.00

А.Ш. Султанов

Нижевартковский государственный университет,
факультет информационных технологий и математики,
кафедра физико-математического образования,
Нижевартовск, aidarsh@mail.ru

О ПЛОСКО-РАДИАЛЬНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ К СКВАЖИНЕ В ПЛАСТЕ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-23-25

В работе исследуется неустановившийся плоско-радиальный поток жидкости к скважине в пласте бесконечной протяженности, не имеющем внешней границы. В условиях такого потока давление в любой точке зависит только от радиуса r и от времени t . Получены аналитические выражения скорости фильтрации $u(t)$ через стенку скважины радиуса a и возмущения суммарного давления $p(t)$ на границе скважины.

Ключевые слова: возмущение давления, скорость фильтрации, функции Бесселя, Макдональда, преобразование Лапласа.

1. Выражение скорости фильтрации через стенку скважины.

Плоско-радиальный (прямолинейно осесимметричный) поток вне скважины радиуса a определяется следующей системой уравнений [1]

$$\rho_0 \frac{\partial u^{(1)}}{\partial t} + m \frac{\partial p^{(1)}}{\partial r} = -m \frac{\mu}{k} u^{(1)} \quad (1)$$

$$\frac{m}{c^2} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial t} + \frac{\rho_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru^{(1)}) = 0, \quad r > a$$

$$p^{(1)}(r, t)|_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial p^{(1)}}{\partial t} \right|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

$$p^{(1)}(r, t)|_{r=a} = p(t), \quad u^{(1)}(r, t)|_{r=a} = u(t), \quad p^{(1)} \rightarrow 0, \quad r \rightarrow \infty$$

где $p^{(1)}$, $u^{(1)}$ - распределение возмущений давления и скорости фильтрации в пласте вокруг скважины, ρ_0 - плотность жидкости в невозмущенном состоянии, μ - динамическая вязкость жидкости, k - проницаемость и m - пористость пласта, c - скорость звука в жидкости.

Решение первого уравнения системы (см.[2]) задается формулой

$$u^{(1)}(r, t) = -\frac{m}{\rho_0} \int_0^t \frac{\partial p^{(1)}}{\partial r} e^{(t'-t)/t_v} dt', \quad t_v = \frac{\rho_0 k}{m \mu} \quad (3)$$

Теперь из второго уравнения системы (1), подставляя вместо $u^{(1)}$ найденное выражение (3), получаем

$$\frac{\partial^2 p^{(1)}}{\partial t^2} + \frac{1}{t_v} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial t} = c^2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial r} + \frac{\partial^2 p^{(1)}}{\partial r^2} \right) \quad (4)$$

Применяя преобразование Лапласа к (4) переходим к уравнению Бесселя

$$\frac{d^2 \hat{p}^{(1)}(r, \lambda)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\hat{p}^{(1)}(r, \lambda)}{dr} - k^2(\lambda) \hat{p}^{(1)}(r, \lambda) = 0 \quad (5)$$

$$\text{где } k^2(\lambda) = \frac{\lambda^2 t_v^2 + \lambda^2 t_v}{c^2 t_v^2}, \quad \hat{p}(r, \lambda) \rightarrow 0, \quad r \rightarrow \infty \quad (6)$$

Решение уравнения (5), удовлетворяющее условию (6) имеет вид

$$\hat{p}(r, \lambda) = \frac{k_0(k(\lambda)r)}{k_0(k(\lambda)a)} \int_0^\infty p(t') e^{-\lambda t'} dt' \quad (7)$$

где $\operatorname{Re} k(\lambda) > 0$, $r \geq a$, $k_0(z)$ - функция Макдональда и $k_0(z) \rightarrow 0$, $z \rightarrow \infty$, кроме того, $k_\nu(z)$, $\nu \in R$, аналитическая функция от z в плоскости с разрезом $(-\infty, 0)$, не имеет нулей в области $|\arg z| \leq \pi/2$ и нули $k_\nu(z)$, лежащие в остальной части плоскости, комплексно сопряженные и число их конечно [3].

Скорость фильтрации $u^{(1)}(a, t) = u(t)$ через стенку скважины находим контурным интегрированием [4] из формулы (3), учитывая (7) и вышесказанные свойства функции Макдональда

$$u(t) = -\frac{2m}{\rho_0 c \pi^2 t_v \alpha} \int_0^t k(t-t') p(t') dt' + \frac{2m}{\rho_0 c \pi^2 \alpha} E(\alpha) p(t) \quad (8)$$

$$k(t-t') = \int_0^1 \frac{e^{-y(t-t')/t_v} dy}{(1-y) \left[J_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) + Y_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) \right]}, \quad \alpha = \frac{a}{ct_v}$$

$$E(\alpha) = \int_0^1 \frac{dy}{y(1-y) \left[J_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) + Y_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) \right]}, \quad E(\alpha) > 0$$

где $J_\nu(z)$, $Y_\nu(z)$ - функции Бесселя первого и второго рода соответственно [3]

2. Аналитическое решение для $p(t)$.

По закону сохранения массы имеем

$$\pi a^2 (u_e + u_f) = 2\pi a L u$$

где a - радиус скважины, u_e , u_f - осевые скорости среды падающей и отраженной волн, L - длина проницаемости участка, u - скорость фильтрации через стенку скважины.

Отсюда, учитывая $p_e = \rho_0 c u$, $p_f = \rho_0 c u_f$ - возмущения давления падающей и отраженной волн и $p = p_e + p_f$ - возмущение суммарного давления, получаем

$$\alpha(2p_e - p) = 2Lu\rho_0 c.$$

Из этого равенства, с учетом (8) для $u(t)$, получаем интегральное уравнение Вольтерра для $p(t)$

$$2p_e - \left[1 + \frac{4mLt_v c}{\pi^2 a^2} E(\alpha) \right] p(t) = -\frac{4mLc}{\pi^2 a^2} \int_0^t k(t-t') p(t') dt' \quad (9)$$

Подвергая (9) преобразованию Лапласа имеем

$$\hat{p}(\lambda) = \frac{2\hat{p}_e}{[1 + c_1 M(\lambda t_v; \alpha)]}, \quad c_1 = \frac{4mLc t_v}{\pi^2 a^2} > 0$$

$$M(\lambda t_v; \alpha) = \int_0^1 \frac{\lambda t_v dy}{(\lambda t_v + y) y (1-y) \left[J_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) + Y_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) \right]}$$

Теперь, считая на стенке скважины постоянное понижение пластового давления, т.е. $p_e = p^{(0)} = \text{const}$, обратным преобразованием Лапласа находим выражение для $p(t)$

$$p(t) = \frac{p^{(0)}}{\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{e^{\lambda t} d\lambda}{[1 + c_1 M(\lambda t_v; \alpha)] \lambda}, \quad \sigma > 0 \quad (10)$$

Здесь $1 + c_1 M(\lambda t_v; \alpha) = 0$ при некотором $\lambda t_v \in (-1, 0)$. Для упрощения выражения $M(\lambda t_v; \alpha)$ воспользуемся теоремой о среднем [5] $\int_a^b f(y) g(y) dy = f(y^*) \int_a^b g(y) dy$ где $g(y)$ - непрерывная и знакопостоянная на (a, b) , $f(y)$ - непрерывная на (a, b) .

$$M(\lambda t_v; \alpha) = \frac{\lambda t_v}{\lambda t_v + y^*} E(\alpha), \quad y^* \in (0, 1), \quad \lambda < 0 \quad (11)$$

Теперь покажем, что $y^* = 1/2$ Для этого, учитывая разложение $\frac{\lambda t_v}{\lambda t_v + y} = 1 - \frac{y}{\lambda t_v + y}$ получаем

$$M(\lambda t_v; \alpha) = E(\alpha) - \int_0^1 \frac{dy}{(\lambda t_v + y)(1-y)} \left[J_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) + Y_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) \right]$$

Применяя теорему о среднем к последнему интегралу имеем

$$M(\lambda t_v; \alpha) = E(\alpha) - \frac{F(\alpha)}{\lambda t_v + \hat{y}}, \quad \hat{y} \in (0,1) \quad (12)$$

$$\text{где } F(\alpha) = \int_0^1 \frac{dy}{(1-y)} \left[J_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) + Y_0^2(\sqrt{y(1-y)}\alpha) \right]$$

Из разложения

$$\frac{1}{y(1-y)} = \frac{1}{y} + \frac{1}{1-y}$$

легко получить $E(\alpha) = 2F(\alpha)$

Отсюда и из (11), (12) получаем равенство $\lambda t_v(1 - \frac{1}{2y^*}) = \frac{1}{2} - \hat{y}$, $y^*, \hat{y} \in (0,1)$ которое возможно при $y^* = \hat{y} = 1/2$ Итак, в формуле (11) для $M(\lambda t_v; \alpha)$ $y^* = 1/2$

Подставляя это выражение для $M(\lambda t_v; \alpha)$ в (10) имеем

$$p(t) = \frac{p^{(0)}}{\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{(\lambda t_v + 0,5)e^{\lambda t} d\lambda}{[\lambda t_v(1 + c_1 E(\alpha)) + 0,5]\lambda} \quad (13)$$

Под интегралом (13) функция от λ однозначная, аналитическая при $\text{Re } \lambda < \sigma$, $\sigma > 0$ за исключением простых полюсов $\lambda_1=0$, $\lambda_2 = -1/2(1+c_1 E(\alpha))t_v$.

Поэтому контурным интегрированием из (13) находим

$$p(t) = 2p^{(0)} \left[1 - \frac{c_1 E(\alpha)}{1 + c_1 E(\alpha)} e^{-t/2[1+c_1 E(\alpha)]t_v} \right]$$

Список литературы

1. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газа в пористых пластах. М.: Недра, 1984.
2. Султанов А. Ш., Шагапов В. Ш. К акустической теории взаимодействия ударной волны, имеющей экспоненциальную зону релаксации, с пористой средой // ПММ. 2008. Т. 72. Вып. 6. С 942-950.
3. Никифоров А.Ф., Уваров В. Б. Специальные функции математической физики. М.: Наука, 1978.
4. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1987.
5. Зорич В. А. Математический анализ. Т.1. М.: Наука, 1985.

01.01.00

Ю.В. Швец, Н.В. Миллер, Н.И. Попова, И.А. Трефилова

Сибирский государственный университет путей сообщения,
инженерно-экономический факультет,
кафедра высшей математики,
Новосибирск, skorpi.1962@mail.ru

УТОЧНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО НЕРАВЕНСТВА ДЛЯ ОДНОЙ НЕПОЛНОЙ ФУНКЦИИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-26-29

В работе изучается несобственный интеграл первого рода с переменным нижним пределом $S(x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_x^\infty e^{-t^{2p}} dt$, где $\Gamma(k)$ — гамма-функция Эйлера, $p \in \mathbb{N}$. Ранее было

показано [1], что для любого $x \in \mathbb{R}$ и $t \in [1; \sqrt[2p]{3}]$ выполняется интегральное неравенство $S^3(x, p) < S(tx, p)$. В данной статье установлено, что границы для параметра t в этом неравенстве являются неумлучшаемыми.

Ключевые слова: несобственный интеграл первого рода, гамма-функция, степенные оценки, интегральные неравенства, неумлучшаемые оценки, неполная гамма-функция.

Введение

В математическом анализе важную роль играют специальные функции, которые применяются в различных приложениях и теоретических исследованиях. Среди них особую роль играет гамма-функция Эйлера, которая при $x > 0$ задается формулой

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt.$$

Важность этой функции определяется тем, что через неё выражается большое число определенных интегралов, бесконечных произведений и сумм рядов.

Усилия многих авторов были направлены на получение различных оценок для гамма-функции.

В работе [2] G.D. Anderson и S.-L. Qiu установили верхнюю и нижнюю границы для гамма-функции

$$x^{(1-C)x-1} < \Gamma(x) < x^{x-1} \quad (x > 1),$$

где $C=0.57721\dots$ — константа Эйлера.

Song-Zhimin, Dou-Xiangkai и Yin Li в работе [3], используя разложение функции $\frac{\Gamma'(x)}{\Gamma(x)}$ в

ряд, получили двойное неравенство

$$\frac{(x+y)^{x+y}}{x^x y^y e} \leq \frac{\Gamma(x+y+1)}{\Gamma(x+1)\Gamma(y+1)} \leq \frac{(x+y)^{x+y}}{x^x y^y},$$

где $x, y \in \mathbb{R}^+$.

Другие интересные оценки можно найти в работах [4], [5]. Отметим, что в работе [6] установлена взаимосвязь гамма-функции с дискретными вероятностными распределениями.

Показано, что при $\lambda < 1$ имеет место соотношение $\Gamma(\lambda) = \lim_{n \rightarrow \infty} P(\xi = n-1) \cdot \prod_{s=1}^{n-1} \left(\frac{s}{\lambda} - 1\right) (ne)^\lambda \cdot \frac{\pi}{\sin \lambda \pi}$,

где ξ — случайная величина, распределенная по закону Пуассона с параметром λ .

Многие авторы изучают свойства неполной гамма-функции, которая имеет

вид: $\Gamma(a, x) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_x^\infty t^{a-1} e^{-t} dt$.

Так J. M. Borwein и O-Yeat Chan в работе [7] показали, что

$$\frac{c-2}{c-1}|z|^{a-1}e^{-x} \leq |\Gamma(a, z)| \leq \frac{c}{c-1}|z|^{a-1}e^{-x},$$

где $c \geq 2$, $a > 3$, $\text{Re}(z) > 0$, и $|z| \geq c(a-1)$.

В работе [8] Xiao-Li Hu рассматривал неполную функцию вида $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$, которая естественно возникает во многих важных статистических распределениях. Он установил, что

$$Q^2(x) < Q(ax) \quad (1)$$

для всех x и $a \in [1; \sqrt{2}]$.

Однако вопрос о точности границ для параметра a в этой работе не изучался.

В работе [9] было показано, что интервал для параметра a не может быть расширен.

В работе [10] неравенство (1) распространено на третью степень функции $S(x, p)$ и интервал $[1; \sqrt[3]{3}]$. Позднее в [1] доказано, что интегральное неравенство

$$S^3(x, p) < S(mx, p) \quad (2)$$

выполняется для всех $x \in \mathbb{R}$, $p \in \mathbb{N}$ и любого $m \in [1; \sqrt[2p]{3}]$. Однако, не было показано, что границы для параметра m в этом неравенстве являются неумлучшаемыми.

1. Формулировка основных результатов

Цель данной статьи – доказать, что в неравенстве (2) границы интервала для параметра m не могут быть расширены. Мы покажем, что левая граница не может быть меньше 1, а правая не может превышать $\sqrt[2p]{3}$.

Сформулируем основные результаты работы.

Теорема 1.1. Для любого сколь угодно малого $\varepsilon > 0$ существует $x \in \mathbb{R}$ такое, что

$$S^3(x, p) > S\left((\sqrt[2p]{3} + \varepsilon)x, p\right), \quad (3)$$

где $p \in \mathbb{N}$.

Теорема 1.2. Для любого сколь угодно малого $\varepsilon > 0$ существует $x \in \mathbb{R}$ такое, что

$$S^3(x, p) > S((1 - \varepsilon)x, p), \quad (4)$$

где $p \in \mathbb{N}$.

2. Доказательство основных результатов

Доказательство теоремы 1.1.

Оценим снизу $S(x, p)$. При $x > 0$ и $\tau > 0$ имеем:

$$S(x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} dt > \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \int_x^{x+\tau} e^{-t^{2p}} dt > \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-(x+\tau)^{2p}} \cdot \tau.$$

Отсюда

$$S^3(x, p) > \frac{p^3}{\Gamma^3\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-3(x+\tau)^{2p}} \cdot \tau^3. \quad (5)$$

Для функции в правой части (3) проведем оценку сверху. При любом положительном x имеем:

$$S\left((\sqrt[2p]{3} + \varepsilon)x, p\right) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^{(\sqrt[2p]{3} + \varepsilon)x}} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} dt < \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^{(\sqrt[2p]{3} + \varepsilon)x}} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} \frac{t^{2p-1}}{(\sqrt[2p]{3} + \varepsilon)^{2p-1} x^{2p-1}} dt$$

Эта оценка следует из того, что в области интегрирования $t > (\sqrt[2p]{3} + \varepsilon)x$ и под знаком интеграла стоят положительные функции. Отсюда

$$S\left((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)x, p\right) < -\frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \cdot \frac{1}{2p} \cdot \frac{1}{(\sqrt[p]{3} + \varepsilon)^{2p-1} x^{2p-1}} e^{-t^{2p}} \bigg|_{(\sqrt[p]{3} + \varepsilon)x}^{\infty}.$$

Используя правило Лопиталя, из последней оценки получаем

$$S\left((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)x, p\right) < \frac{1}{2\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \cdot \frac{e^{-((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)x)^{2p}}}{\left((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)x\right)^{2p-1}}. \quad (6)$$

Из неравенств (5) и (6) следует, что для доказательства теоремы 1.1 достаточно показать, что существуют $x > 0$ и $\tau > 0$ такие, что:

$$\frac{p^3}{\Gamma^3\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-3(x+\tau)^{2p}} \cdot \tau^3 > \frac{e^{-((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)x)^{2p}}}{2\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right) \left((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)x\right)^{2p-1}}. \quad (7)$$

Покажем, что последнее неравенство выполняется, например, при $x = \frac{1}{\varepsilon^{2p}}$, $\tau = \varepsilon$.

При этих значениях x и τ для справедливости неравенства (7) достаточно установить, что

$$e^{-3(\varepsilon^{-2p} + \varepsilon)^{2p}} \cdot \varepsilon^3 > \left((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)\varepsilon^{-2p}\right)^{1-2p} \cdot e^{-((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)\varepsilon^{-2p})^{2p}},$$

или

$$e^{((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)x)^{2p}} \left((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)\varepsilon^{-2p}\right)^{2p} \cdot \varepsilon^3 > \left((\sqrt[p]{3} + \varepsilon)\varepsilon^{-2p}\right)^{2p} \cdot e^{3(\varepsilon^{-2p} + \varepsilon)^{2p}}. \quad (8)$$

Справедливость (8), а следовательно и (7), следует из того, что

$$(\sqrt[p]{3} + \varepsilon)\varepsilon^{-2p} > \sqrt[p]{3}(\varepsilon^{-2p} + \varepsilon).$$

Теорема 1.1. доказана.

Доказательство теоремы 1.2.

Покажем, что существует положительное значение x , такое, что выполняется неравенство

$$S^3(-x, p) > S((\varepsilon - 1)x, p).$$

$$\text{Имеем } S(-x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_{-x}^{\infty} e^{-t^{2p}} dt = 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_{-\infty}^{-x} e^{-t^{2p}} dt = 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_x^{\infty} e^{-t^{2p}} dt. \quad (9)$$

Из (9) получаем:

$$S(-x, p) = 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_x^{\infty} e^{-t^{2p}} dt > 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_x^{\infty} e^{-t^{2p}} \cdot \frac{t^{2p-1}}{x^{2p-1}} dt =$$

$$1 + \frac{p}{2p \cdot \Gamma\left(\frac{1}{2p}\right) x^{2p-1}} e^{-t^{2p}} \bigg|_x^{\infty} = 1 - \frac{e^{-x^{2p}}}{2\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right) x^{2p-1}}.$$

Эта оценка следует из того, что в области интегрирования $x < t < \infty$.

Отсюда:

$$S^3(-x, p) > \left(1 - \frac{e^{-x^{2p}}}{2\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right) x^{2p-1}}\right)^3. \quad (10)$$

При положительных x и τ выведем оценку сверху для $S((\varepsilon - 1)x, p)$.

Имеем:

$$S((\varepsilon - 1)x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_{(\varepsilon - 1)x}^{\infty} e^{-t^{2p}} dt = 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_{-\infty}^{(\varepsilon - 1)x} e^{-t^{2p}} dt = 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_{(1 - \varepsilon)x}^{\infty} e^{-t^{2p}} dt.$$

Следовательно,

$$S((\varepsilon-1)x, p) < 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_{(1-\varepsilon)x}^{(1-\varepsilon)x+\tau} e^{-t^{2p}} dt < 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-((1-\varepsilon)x+\tau)^{2p}} \cdot \tau. \quad (11)$$

Из (10) и (11) вытекает, что для доказательства оценки (4) достаточно установить, что существуют положительные числа x и τ , такие что выполняется неравенство

$$\left(1 - \frac{e^{-x^{2p}}}{2\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)x^{2p-1}}\right)^3 > 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-((1-\varepsilon)x+\tau)^{2p}} \cdot \tau.$$

Последнее неравенство выполняется, если

$$1 - \frac{3e^{-x^{2p}}}{2\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)x^{2p-1}} > 1 - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-((1-\varepsilon)x+\tau)^{2p}}. \quad (12)$$

Заметим, что (12) следует из оценки

$$2p \cdot x^{2p-1} \cdot e^{-((1-\varepsilon)x+\tau)^{2p}} > 3 \cdot e^{-x^{2p}} \quad (13)$$

Покажем, что соотношение (13) выполняется, например, при $\tau = \varepsilon$, $x = \frac{1}{\varepsilon^4}$.

Для этого достаточно заметить, что

$$\varepsilon^{-4} > (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{-4} + \varepsilon$$

При достаточно малых значениях ε .

Теорема 1.2. доказана.

Таким образом, левая граница для параметра m не может быть меньше 1, а правая не может превышать $\sqrt[2p]{3}$.

Список литературы

1. Швец Ю.В., Миллер Н.В., Пучнин Р.В. Степенная оценка одной неполной функции // Вестник современной науки. 2015. №11, С. 17– 20.
2. Anderson G.D., Qiu S.-L. A monotoneity property of the gamma function // Proc. Amer. Math. Soc. 125 (1997), 3355-3362.
3. Song-Zhimin, Dou-Xiangkai, Yin Li. Octagon Mathematical Magazine // Vol. 17, No.1, April 2009, pp 14-18.
4. Alzer H. On some inequalities for the incomplete gamma function // Math. Comp. 66 (1997), no 218, 771-778.
5. Baricz A. A functional inequality for the survival function of the Gamma distribution // J. Inequal. Pure and Appl. Math., 9, 1 (2008), Article 13.
6. Пожидаев А.В., Пекельник Н.М., Хаустова О.И., Трефилова И.А. О некоторых представлениях гамма функции // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2015. №4(36).С. 29-37.
7. Borwein J. M. и O-Yeat Chan. Uniform Bounds for the Complementary Incomplete Gamma Function // Mathematical Inequalities & Applications Volume 12, Number 1 (2009), 115–121
8. Xiao-Li Hu. Two new inequalities for Gaussian and gamma distributions // Journal of mathematical inequalities. Volume 4, Number 4 (2010), 609– 613.
9. Пекельник Н.М., Хаустова О.И., Трефилова И.А. Замечания об одном интегральном неравенстве // X международная научно-практическая конференция: «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». 2015. №3(10), часть 9, С. 72 – 74.
10. Швец Ю.В., Миллер Н.В., Пучнин Р.В. Об одном неравенстве для несобственного интеграла с переменным нижним пределом // Евразийский союз ученых. 2015. № 10– 6(19). С. 57– 59.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ (02.00.00)

02.00.15

¹А.Е. Филатова, ¹В.Ю. Долуда, ^{1,2}В.Г. Матвеева, ¹Э.М. Сульман¹Тверской государственный технический университет,
кафедра биотехнологии и химии,²Тверской государственный университет
Тверь, afilatowa@mail.ru**ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ГИДРИРОВАНИЯ НИТРОБЕНЗОЛА
ДО АНИЛИНА В ПРИСУТСТВИИ Ru-СОДЕРЖАЩЕГО КАТАЛИЗАТОРА****DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-30-32**

В данной работе представлены результаты исследования процесса каталитического гидрирования нитробензола до анилина в присутствии Ru-содержащих гетерогенных катализаторов. Подобраны оптимальные параметры процесса. Предложена адекватная кинетическая модель реакции.

Ключевые слова: нитробензол, анилин, каталитическое гидрирование, гетерогенный катализ, кинетическая модель.

Процесс каталитического гидрирования нитробензола (НБ) является важнейшим химико-технологическим процессом получения анилина (АН), который используют в качестве полупродукта в синтезе полиуретанов, резины, различных фармацевтических препаратов, пестицидов и гербицидов.

В промышленности реакция работает в газовой фазе с Cu или Ni катализаторами с использованием H_2 около или чуть выше атмосферного давления (0.1-0.5 МПа) при высоких температурах около 523 К [1-5]. Данная реакция также может быть выполнена в жидкой фазе с использованием нанесенных металлических катализаторов (Pt, Pd, и Ni) и органических растворителей с H_2 при более высоких давлениях (1 - 4 МПа) при температуре около 323 К. Тем не менее, эти катализаторы иногда показывают низкую селективность.

В настоящее время наибольший интерес представляют исследования направленные на изучение свойств сверхсшитого полистирола (СПС) в качестве носителя и стабилизатора каталитически активных наночастиц (Ru, Pd, Pt и др.) [6-9]. Авторами статей [10-13] была показана высокая эффективность использования катализаторов с нанесением Ru на СПС марки MN 270.

Для практического применения катализаторов на основе СПС необходимо более детальное исследование, а именно изучение кинетики процесса гидрирования НБ и определение оптимальных параметров процесса. В данной статье приводятся результаты исследования каталитического гидрирования нитробензола до анилина в присутствии Ru катализатора на основе СПС MN 270.

Экспериментальная часть

Методики приготовления катализатора 3 % Ru / MN 270, результаты его физико-химических исследований были ранее описаны в работах [12-14]. Каталитическое гидрирование нитробензола проводилось с использованием реакторной системы Part Series 5000 Multiple Reactor System. Стандартный эксперимент проводили следующим образом. Реактор с навесками катализатора, НБ и изопропилового спирта трижды продували азотом под давлением 2 МПа, затем нагревали до необходимой температуры в атмосфере азота, подавали газообразный водород и проводили гидрирование нитробензола.

Результаты и обсуждение

Для исследования в какой области проходит реакция каталитического гидрирования нитробензола до анилина в присутствии катализатора 3% Ru / MN270 были проведены предварительные эксперименты. Были проведены эксперименты при варьировании температуры от 160 до 190 °С и начальной концентрации НБ (C_0) от 0.12 до 0.48 моль/л, при оптимальной концентрации катализатора (C_k) $7.42 \cdot 10^{-4}$ моль Ru/л и давлении водорода 2 МПа. Полученная температурная зависимость конверсии НБ в АН представлена на рисунке 1.

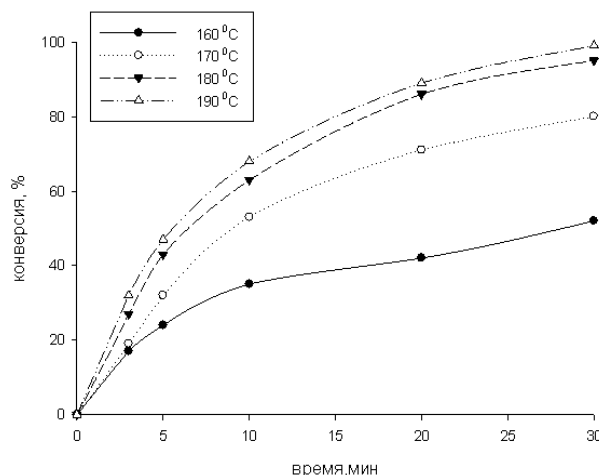


Рис. 1 - Зависимости конверсии НБ и селективности АН от времени при различных температурах (C_0 0.24 моль/л, C_k $7.42 \cdot 10^{-4}$ моль Ru/л, τ 30 мин, P_{H_2} 2 МПа)

Для исследования кинетики процесса были проведены эксперименты с варьированием начальной концентрации нитробензола (C_0) от 0.12 до 0.48 моль/л. (рис. 2). Полученные экспериментальные данные послужили базой для математического моделирования кинетики селективного гидрирования НБ.

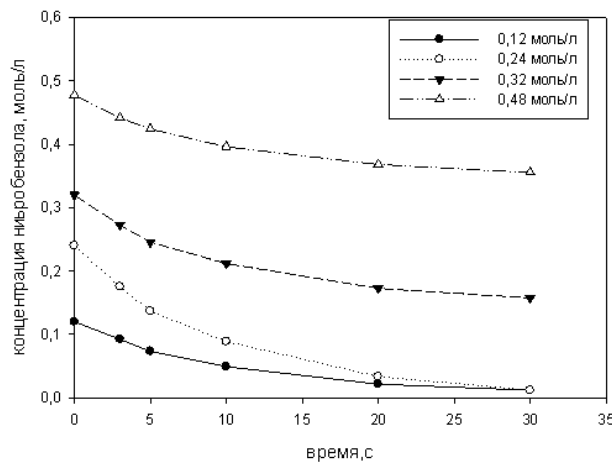


Рис. 2 - Зависимость концентрации НБ от времени реакции, при варьировании начальной концентрации нитробензола (C_k $7.42 \cdot 10^{-4}$ моль Ru/л, T 180 °C, τ 30 мин, P_{H_2} 2 МПа) (Точки – эксперимент, линия – расчет)

Анализ реакционной смеси показал наличие исходного НБ и основного продукта – АН. Поскольку гидрирование НБ протекает с высокой селективностью, то промежуточные стадии можно считать быстрыми и не лимитирующими. Маршрут реакции представлен на рисунке 3.

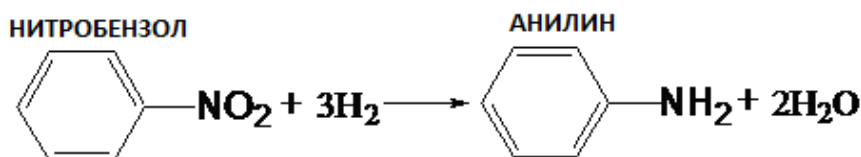


Рис. 3 - Маршрут реакции гидрирования НБ

На основании полученных данных было проведено построение математической модели с использованием явного интегрального метода. Из всех вариантов дифференциальных уравнений была выбрана следующая математическая модель:

$$\frac{dA}{d\tau} = -K_I[A]; \quad \frac{dB}{d\tau} = K_I[A]$$

где K_I – кинетический параметр; А-нитробензол; В-анилин; τ – время реакции, сек.

Такая математическая модель удовлетворительно описывает кинетику гидрирования нитробензола (экспериментальные точки совпадают с расчетной кривой, рис.2).

Заключение

В ходе проведенной работы, была исследована реакция каталитического гидрирования НБ в присутствии рутениевого катализатора на основе СПС 3% Ru/ MN270. Были подобраны оптимальные условия проведения реакции: соотношение моль Ru/моль НБ 0,03/1, растворитель изопропиловый спирт, C_0 0,24 моль/л, C_K $7.42 \cdot 10^{-4}$ мольRu/л, время реакции 30 минут, P_{H_2} 2 МПа, T 180°C, интенсивность перемешивания 1100 об/мин. При указанных условиях была получена селективность по анилину 98% и конверсия нитробензола 97%. Проведено изучение кинетики гидрирование НБ до АН и построена математическая модель, адекватно описывающая процесс. Исследуемый катализатор 3%-Ru/ MN270 показал высокую активность и стабильность, что важно для его применения в промышленных масштабах.

Благодарности

Работа была выполнена в рамках проекта RFMEFI58615X0024 финансируемого Минобрнауки РФ.

Список литературы

1. *Shinichiro Fujita, Hiroshi Yoshida, Kouki Asai, Xiangchun Meng, Masahiko Arai* // The Journal of Supercritical Fluids 60-2011- p.106-112.
2. *Gelder E.A., Jackson S.D., Lok C.M.* // Chem. Commun. 2005. p. 522–524.
3. *Полотнюк О.-В.Я.* // Катализ в промышленности. 2013. №4 с. 55-80.
4. *Verho O., Gustaffson K.P.J., Nagendiran A., Tai C.W., Backvall J.E.* // ChemCatChem 2014. 6. p. 3153–3159.
5. *Westerhaus F.A., Jagadeesh R.V., Wienhofer G., Pohl M.M., Radnik J., Surkus A.E., Rabeah J., Junge K., Junge, H., Nielsen M. et al.* // Nat. Chem. 2013. 5. p. 527–543.
6. *Sulman M., Doluda V., Grigoryev M., Manaenkov O., Filatova A., Molchanov V., Sidorov A., Bykov A., Shkileva I., Sulman A., Stein B., Matveeva V.* // Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis. 2015.10 (3). p. 313-323.
7. *Tsyurupa M.P., Tarabaeva O.G., Pastukhov A.V., Davankov V.A.* // International Journal of Polymeric Materials. 2003. V. 52. p. 403.
8. *Павлова Л.А., Даванков В.А., Лепендина Н.А.* // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. С. Вып.1. С. 75.
9. *Qingquan L.* // Macromol. Chem. Phys. 2010. V. 211. P. 1012.
10. *V.N. Sapunov, M.Ye. Grigoryev, E.M. Sulman, M.B. Konyaeva, V.G. Matveeva* // J. Phys. Chem. A. 2013. 117. p. 4073–4083.
11. *Sulman E.M., Grigorev M.E., Doluda V.Yu., Wärnå J., Matveeva V.G., Salmi T., Murzin D.Yu.* // Chemical Engineering Journal. 282. 2015. P. 37-44.
12. *Matveeva V.G., Sulman E.M., Manaenkov O.V., Filatova A.E., Kislitza O.V., Sidorov A.I., Doluda V.Y., Sulman M.G., Rebrov E.V.* // Catalysis Today. 280. 2017. p. 45-50.
13. *Ракитин М.Ю., Долуда В.Ю., Тянина А.А., Петрова А.И., Сульман Э.М., Матвеева В.Г.* // «Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика». 2016. Том 11. № 3. С. 10-16.
14. *Манаенков О.В., Макеева О.Ю., Филатова А.Е., Сульман М.Г., Сидоров А.И., Быков А.В., Матвеева В.Г., Григорьев М.Е., Сульман Э.М.* // Катализаторы на основе сверхкритического полистирола для процесса конверсии целлюлозы в полиолы/ Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 54-58.

02.00.15

В.В. Харьков, А.Н. Николаев

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

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ РЕАКЦИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-33-37

Проводится анализ факторов, таких как технологические характеристики процесса концентрирования и физико-химические свойства материалов, определяющих необратимые изменения их химического строения при изменении температуры. Рассматриваются подходы к квантово-химическому расчету свойств молекулярных систем, их реактивной активности. Предлагается проводить процесс обезвоживания термолабильных жидкостей во взвешенном слое в вихревой камере с тангенциально-лопаточным завихрителем газа.

Ключевые слова: *термолабильность, кинетическая кривая, вихревая камера.*

Некоторые химические соединения весьма чувствительны к воздействию тепла. Изменение температурных условий может повлечь за собой как обратимые, так и необратимые изменения свойств продукта. К обратимым изменениям следует, в первую очередь, отнести изменение физических свойств, например, переход низкоплавящихся, низкотвердевающих и низкокипящих веществ из одного агрегатного состояния в другое. Такие превращения легко обнаружить при внешнем осмотре, так как они приводят к частичному или полному модифицированию товарного вида, являясь причиной значительных материальных потерь. К необратимым изменениям относятся глубокие химические изменения, приводящие к образованию нового вещества, т. е. практически к порче продукта.

Вещества, способные под действием тепла изменять свои химические свойства, называются термолабильными. Как правило, они имеют органическую природу. Их условно можно условно разделить на две категории [1]:

1) непредельные органические соединения и соединения с реакционноспособными функциональными группами, у которых способность к химическим превращениям и, прежде всего, к реакциям полимеризации и поликонденсации резко возрастает с повышением температуры. К ним, в частности, относятся цис-аконитовая кислота и ее ангидрид; акролеин, β -аминопропионитрил, аргининянтарная кислота; соли ацетилфосфата и карбамилфосфата; 1,4-дивинилбензол; арахидоновая, линолевая, линоленовая, олеиновая кислоты и их эфиры; ацетоин, бензофенон, пировиноградная и щавелевоуксусная кислоты; коричный, изо-масляный, пропионовый альдегиды; 4-нитрофениловые эфиры уксусной и фосфорной кислот.

2) природные или структурно близкие к ним химические соединения, например, альбумины, глобулины, гистоны и другие белки; ферменты и коферменты; нуклеозиды, нуклеотиды, нуклеиновые кислоты; пептиды и полипептиды; сахарофосфаты и некоторые другие производные сахаров; гормоны, стероиды, антибиотики.

Факторы, определяющие изменения свойств термолабильных материалов как объектов теплового концентрирования, можно условно разделить на две категории:

1. Технологические характеристики процесса;
2. Физико-химические свойства материала.

К первой группе факторов, влияющих на изменение концентрации целевого вещества продукта, относятся температура, время и гидродинамический режим процесса термического обезвоживания.

Повышение температуры термолабильного вещества приводит к прямолинейному возрастанию скорости реакции его разложения, что подтверждает кинетический характер реакций [2].

Существенная интенсификация процесса, т.е. активный гидродинамический режим может быть реализован, например, при использовании взвешенного слоя. Различают четыре группы режимов взвешенного слоя [3]: псевдооживление (кипящий, виброкипящий), фонтанирование (фонтанирующий слой, свободное фонтанирование), пневмотранспорт (восходящий, нисходящий, горизонтальный, «дюнами» и др.) и закрученные потоки (одиночные потоки с направляющими каналами и без них, встречные и попутные закрученные потоки, вихревой слой и др.).

Для снижения термического воздействия на материал можно использовать вихревую камеру с тангенциально-лопаточным завихрителем газа [4], в которой капли жидкости движутся в виде взвешенного капельного слоя. Трудности масштабного перехода и ограниченное число ячеек, а также неодинаковое время пребывания частиц разного диаметра в аппарате не позволяет применять в вихревом аппарате модель идеального вытеснения, поэтому при активном гидродинамическом режиме применяют модель близкую к режиму идеального смешения по дисперсному материалу.

Камера работает следующим образом (рис. 1). Предварительно нагретый воздух через газораспределительное устройство поступает в рабочую камеру и проходит через тангенциально-лопаточный завихритель, образуя в рабочей зоне камеры закрученный газовый поток. Раствор вводится в камеру через отверстия в трубчатом оросителе, где моментально дробится потоком газа на капли.

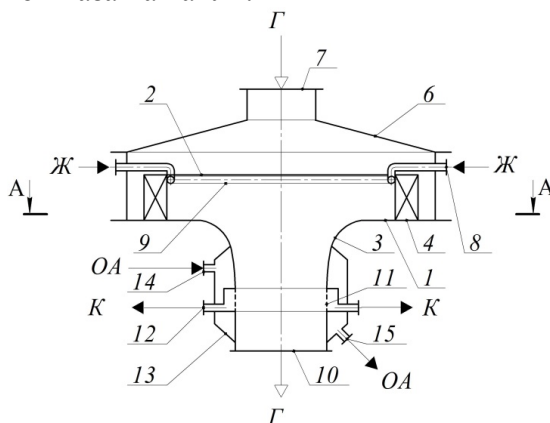


Рис. 1 — Вихревая камера:

1 — корпус; 2 — крышка; 3 — днище; 4 — тангенциальный завихритель; 5 — лопасти; 6 — газораспределительное устройство; 7 — патрубок ввода греющего газа (Г); 8 — патрубок ввода жидкости (Ж); 9 — трубчатый ороситель; 10 — патрубок выхода газа; 11 — щелевой отсекающий элемент; 12 — патрубок вывода концентрированной жидкости (К); 13 — охлаждающая рубашка; 14, 15 — патрубки ввода/вывода охлаждающего агента (ОА)

Внутренняя поверхность камеры нагревается и стремится к температуре теплоносителя, прямой контакт дисперсной жидкой фазы с этой поверхностью приводит к необратимым изменениям в ее химической структуре. Поэтому, капли, двигаясь в вихревой камере, выходят исключительно на свои теоретические равновесные радиусы, соответствующие диаметру и параметрам работы камеры, и вращаются на нем, создавая взвешенный газожидкостный слой, без контакта с нагретыми поверхностями.

Далее под действием силы тяжести капли постепенно смещаются вниз, по мере испарения уменьшаются их диаметры, и соответственно равновесные радиусы вращения; радиальное положение капельного слоя стремится к оси камеры. Радиус выходного патрубка определяется равновесным радиусом капель с диаметром, соответствующим требуемому содержанию сухих веществ. Нижняя часть обечайки днища, где происходит осаждение жидкости на стенке, непрерывно охлаждается. Сконцентрированная жидкость проходит через сепарационные щели и выводится из вихревой камеры. Газ удаляется через центральный нижний патрубок.

Ко второй группе факторов, влияющих на сохранность целевого вещества жидкого продукта, относятся дисперсность, реакционная способность целевого вещества, структурно-

механические характеристики, концентрация и состав примесей в продукте, обладающих каталитическо-ингибиторной активностью.

Размер частиц дисперсной системы является важным параметром при расчете аппарата вихревого типа, так как именно он детерминирует скоростные характеристики фаз, интенсивность массообмена и площадь межфазной поверхности. Влияние формы частиц проявляется в неравномерности профилей температуры и влагосодержания по сечению частиц, вызывая локальные зоны перегрева.

Реакционная активность или способность к химическому взаимодействию продуктов по Аррениусу описывается уравнением [5]:

$$k = Ae^{-E_A/RT} \quad \text{или} \quad \lg k = -\frac{E_A}{RT} + \lg A,$$

где k — константа равновесия реакции; A — индивидуальная константа; E_A — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура. То есть скорость реакции прямолинейно увеличивается при повышении температуры в реакционной хоне и с уменьшением энергии активации.

Энергией активации E_A называют избыток энергии по сравнению со средней энергией молекул при данной температуре, необходимый для того, чтобы химическая реакция произошла; зависит от теплоты реакции, исчисляемой как разность между энергией образования новой связи в продуктах реакции и энергией разрыва связи в исходном веществе. Обычно реакции между веществами с прочными ковалентными связями характеризуются большими значениями E_A и идут медленно. Это относится ко многим взаимодействиям между органическими веществами.

Физический смысл предэкспоненциального множителя A следует из теории двойных столкновений [6], согласно которой он отвечает общему числу активных соударений Z реагирующих веществ в единице объема за единицу времени с учетом их взаимной ориентации. Активными, т.е. приводящими к единичному акту химического взаимодействия, являются только те столкновения частиц, кинетическая энергия которых равна или превышает энергию активации реакции. Влияние такой пространственной ориентации молекул на константу скорости реакции учитывается через вероятностный (стерический) фактор P [7]: $A=PZ$.

Значения P обычно лежат в пределах от 10^{-9} до 1, причем малые величины P отвечают чаще всего реакциям между органическими соединениями комплексными по своей структуре. Именно такие химические реакции могут идти с невысокими скоростями при небольших значениях E_A , так как на их пути встречаются стерические препятствия, обусловленные неравноценностью отдельных частей молекул.

При взаимодействии многоатомных нелинейных молекул стерический фактор определяется на основе теории активированного комплекса и составляет от 10^{-6} до 10^{-10} [8]. В теории двойных столкновений не обсуждаются вопросы о том, откуда появился энергетический барьер реакции, как происходит трансформация структуры реагентов при их переходе в продукты реакции. Тогда как теория активированного комплекса исходит из того, что на вершине энергетического профиля реакции находится переходное состояние (активированный комплекс) со вполне определенной структурой, что позволяет определить природу, высоту энергетического барьера реакции и саму структуру переходного состояния, так становится возможным более точный расчет предэкспоненциального множителя.

Таким образом, количественные характеристики реакционной активности вещества — энергия активации и предэкспоненциальный множитель — не зависят от температуры и определяются строением вещества.

Квантохимические расчеты позволяют дать исчерпывающее объяснение любым экспериментальным данным о реакционной способности органических соединений и предсказать возможные направления реакций, относительный выход продуктов реакции, а также получить недоступную для эксперимента информацию о геометрии и электронной структуре переходных состояний. Для всех практически значимых химических систем решение соответствующих электронных уравнений возможно только приближенно. При этом

точность такого решения определяется не только физическими эффектами, заложенными в математическую модель, но и способом решения молекулярного уравнения Шредингера.

Среди них наиболее широкое распространение получил метод Хартри–Фока, в котором использовано полное или частичное пренебрежение дифференциальным перекрыванием. Его можно использовать для расчета индексов реакционной способности, т.е. зарядов на атомах, порядков связей, энергий граничных молекулярных орбиталей и т.д., которые и характеризуют реакционную способность молекул органического продукта [9, 10].

Для основных реакций, наблюдаемых в лабораторных и промышленных реакторах, характер влияния температуры можно представить шестью случаями (рис. 2) [11]. Для простых некаталитических реакций (рис. 2а) без участия активных частиц, т.е. реакций, в которых участвуют молекулы, наблюдается значительное влияние температуры на скорость реакции; значения энергий активации находятся в интервале от 80 до 250 кДж/моль. Следует отметить, что значение энергии активации характеризует всегда некоторый диапазон температур. За пределами этого интервала изменяется химизм процесса и как следствие может измениться как вид кинетического уравнения, так и значения параметров, в том числе энергий активации.

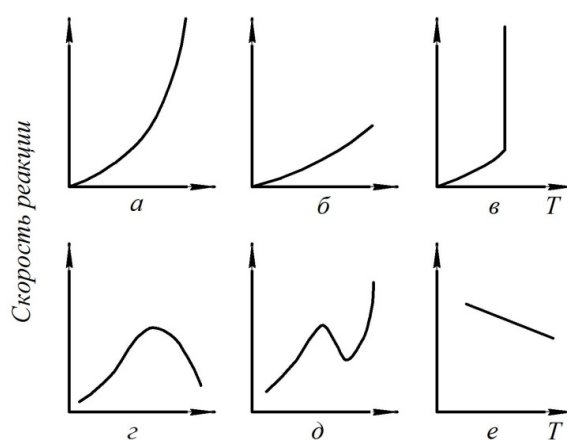


Рис. 2 — Основные типы кинетических кривых:

а — простая некаталитическая реакция; б — гетерогенные реакции; в — реакции с авто-ускорением, сопровождающиеся взрывом; г — каталитические и ферментативные реакции, когда повышение температуры приводит к разрушению и дезактивации катализатора; д — многостадийные сложные реакции; е — реакции с термодинамическими ограничениями.

Для гетерогенных и гетерогенно-каталитических реакций (рис. 2б) характерны меньшие значения энергий активации, чем для гомогенных реакций. Возможное снижение скорости гетерогенной реакции с ростом температуры вплоть до 8–10 кДж/моль обычно связывают с тормозящим действием явлений переноса вещества за счет диффузии. Зависимость со скачкообразным ростом скорости (рис. 2в) характеризует что температура реакции приводит к появлению разветвленных цепей, заканчивающихся мгновенно (взрыв).

При ферментативном катализе (рис. 2г) наличие экстремума на кривой связано с разрушением фермента с повышением температуры выше критической; реакции ферментов поэтому реализуются в узкой температурной зоне, обычно не превышающей 50 градусов. Кинетическая картина с точкой перегиба (рис. 2д) может возникнуть для процессов неглубокого окисления в присутствии катализаторов и связана с тем, что в узкой температурной области между двумя локальными экстремумами катализатор активирует побочный процесс. Приведенный на рис. 2е вид зависимости отражает случай, что при гетерогенно-каталитических реакциях может установиться адсорбционное равновесие для реагента. С ростом температуры равновесие адсорбции приведет к уменьшению суммарной доли поверхности, занятой реагентом и, соответственно, к уменьшению скорости реакции.

Реакционную способность можно определить по коэффициентам полуэмпирических уравнений, выводимых из полилинейной функции свободной энергии. Для органических соединений это корреляционные уравнения: Гаммета, Тафта, Гаммета–Тафта, Кабачника. Для некоторых ферментативных реакций (реакций субстратов) необходимо учитывать

гидрофобное взаимодействие [12]. Также следует рассмотреть уравнение Клопмана, характеризующее важнейший принцип протекания термических химических реакций, ученый назвал его правилом «соответствия»: «Для реакций, протекающих по некоторому разрешенному реакционному пути, все взаимодействующие пары орбиталей должны соответствовать друг другу» [6].

В определение реакционной активности при проведении химических превращений в растворах важную роль могут играть донорно-акцепторные межорбитальные взаимодействия между молекулами растворенного вещества и растворителя, которые влияют на энергию активации и значения стерического фактора. Термическая устойчивость органических соединений зависит от молекулярной структуры органических соединений: наличие электронодонорных заместителей в молекуле повышает её термическую устойчивость, тогда как электроноакцепторные свойства молекул растворителя, соответственно, снижает её. В сильноокислой среде происходит протонирование аминогруппы, реакция идет плохо, наблюдается изменение донорных свойств на акцепторные, что повышает термостабильность соединения; соли органических сульфокислот имеют более высокую термическую стабильность по сравнению с самими сульфокислотами.

Примеси влияют на теплофизические свойства жидкости (вязкость, теплопроводность и др.), согласно закону Рауля, в их присутствии уменьшается давление насыщенного пара над поверхностью жидкости или смоченного ею тела, что приводит к сокращению потока влаги от поверхности материала к теплоносителю. Также на термической устойчивости продуктов может влиять присутствие примесей, замедляющих процесс обезвоживания и катализирующих процесс их деструкции [5].

Таким образом, анализ указанных факторов показал, что они существенно влияют на процессы теплового концентрирования с участием термолабильных веществ, и квантохимический расчет кинетики разложения требует комплексного подхода к решению.

Список литературы

1. *Фрайштат, Д. М.* Реактивы и препараты. Хранение и перевозка / Д. М. Фрайштат. — М.: Химия, 1977. — 424 с.
2. *Леонтьева, А. И.* Моделирование и расчёт процесса сушки термолабильных материалов в виброаэрокипящем слое: монография / А. И. Леонтьева, К. В. Брянкин, А. А. Дегтярев, В. С. Орехов. — Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. — 80 с.
3. *Сажин, Б. С.* Основы техники сушки / Б. С. Сажин. — М.: Химия, 1984. — 320 с.
4. *Харьков, В. В.* Применение вихревой камеры для концентрирования термолабильных растворов / В. В. Харьков, А. Н. Николаев // Вестник технологического университета. — 2017. — Т. 20. — № 8. — С. 65–68.
5. *Кубасов, А. А.* Химическая кинетика и катализ. Часть 2. Теоретические основы химической кинетики / А. А. Кубасов. — Москва: МГУ, 2005. — 159 с.
6. *Самуилов, Я. Д.* Реакционная способность органических соединений / Я. Д. Самуилов, Е. Н. Черезова. — Казань: Казан. гос. технол. ун-т, 2010. — 419 с.
7. *Стромберг, А. Г.* Физическая химия / А. Г. Стромберг, Д. П. Семченко. — М.: Высш. школа, 1973. — 480 с.
8. *Мингулина, Э. И.* Курс общей химии / Э. И. Мингулина, Г. Н. Масленникова, Н. В. Коровин, Э. Л. Филиппов. — М.: Высш. шк., 1990. — 446 с.
9. *Игнатов, С. К.* Квантово-химическое моделирование молекулярной структуры, физико-химических свойств и реакционной способности / С. К. Игнатов. — Нижний Новгород, 2006. — 56 с.
10. *Бурштейн, К. Я.* Квантовохимические расчеты в органической химии и молекулярной спектроскопии / К. Я. Бурштейн, П. П. Шорыгин. — М.: Наука, 1989. — 104 с.
11. *Жоров, Ю. М.* Кинетика промышленных органических реакций: Справ. изд. / Ю. М. Жоров — М.: Химия, 1989. — 384 с.
12. *Пальм, В. А.* Основы количественной теории органических реакций / В. А. Пальм. — Л.: Химия, 1977. — 360 с.

02.00.15

Е.И. Шиманская, Э.М. Сульман, В.П. Молчанов

Тверской государственный технический университет,
кафедра биотехнологии и химии,
Тверь, shimanskaya-tstu@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ГИДРОГЕНОЛИЗА ЛИГНИНА С ПОЛУЧЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ БИОТОПЛИВ В ПРИСУТСТВИИ Pd И Ru-СОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИЗАТОРОВ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-38-40

В данной работе представлены результаты исследования процесса каталитического гидрогенолиза лигнина в присутствии Pd- и Ru-содержащих гетерогенных катализаторов. Подобраны оптимальные параметры процесса.

Ключевые слова: *лигнин, гидрогенолиз, сверхсшитый полистирол, биотопливо.*

В настоящее время, в связи с постепенным уменьшением общемировых запасов нефти, возрастает тенденция к поиску новых способов получения углеводородных топлив. Чтобы осуществить полный переход на альтернативные виды топлив, необходимым является изменение типов двигателей, что повлечет за собой большие затраты. Поэтому наиболее актуальным направлением является разработка добавок к существующим топливам, которые позволят уменьшить выбросы углекислого газа в атмосферу, а также использовать альтернативные источники сырья для топлива при этом, не изменяя тип двигателя [1]. Применение непищевого возобновляемого сырья, в частности, отходов целлюлозно-бумажной промышленности, позволит решить сразу две важные экологические проблемы, такие, как создание новых альтернативных видов топлив и переработка отходов с получением промышленно значимых химических веществ [2-6]. Каталитические системы, представляющие собой активные наночастицы металлов, стабилизированные в сверхсшитом полистироле, показывают высокую активность в процессах гидрирования, что обосновывает их применение в процессе гидрогенолиза с целью повышения конверсии и селективности [7-9].

Экспериментальная часть

Методика приготовления катализаторов

Катализатор синтезировали методом пропитки СПС марки MN270 (Purolite Inc., Великобритания) по влагоемкости водными растворами прекурсоров (гидроксотрихлорида рутения ($\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$) и тетрахлорпалладата натрия ($\text{Na}_2[\text{PdCl}_4]$) в комплексном растворителе: тетрагидрофуран + метанол + вода в соотношении 4:1:1 при комнатной температуре [10, 11]. Катализатор высушивали при температуре 70 °С и обрабатывали смесью едкого натра и пероксида водорода при 80 °С. Затем катализаторы промывали водой до исчезновения реакции на хлорид-анионы в промывных водах и высушивали при 85 °С. Далее катализаторы восстанавливали в токе водорода при атмосферном давлении и средней температуре около 300 °С в течение 2 часов. Таким образом были синтезированы катализаторы с содержанием металла 3%. Физико-химические характеристики катализаторов представлены в работах [12, 13].

Процесс гидрогенолиза лигнина

Процесс гидрогенолиза проводили в шестиячеечном реакторе Parr Series 5000 Multiple Reactor System в среде изопропанола [14]. Варьировали такие параметры как парциальное давление водорода (от 2 до 4 МПа), температура (от 200 до 300 °С) и соотношение субстрат/катализатор. В реактор вносили точные навески лигнина и катализаторов, затем

добавляли 50 мл растворителя, смесь три раза продували азотом, затем проводили нагрев до рабочей температуры в атмосфере азота. Затем реактор продували водородом и далее проводили реакцию при рабочих значениях давления водорода. Реакция проводилась при интенсивном перемешивании (1500 об/мин) для исключения внутридиффузионных торможений в течение 3 часов. Отбор проб проводился каждые 30 минут. Для определения степени конверсии лигнина высушивали и взвешивали сухой остаток после окончания реакции.

Анализ продуктов реакции

Анализ продуктов реакции проводится на газовом хроматографе GC-2010 снабженном масс-спектрометром при следующих условиях: температура ввода пробы - 260 °С, температура колонки (НР-1, длина 100.0 м) - 50 °С, , давление газа-носителя - 192.9 кПа, скорость потока - 20 мл/мин по программе: вначале выдерживание 8 минут при 50 °С, далее нагрев до 280 °С, общее время анализа - 45 минут.

Результаты и обсуждения

В реакции гидрогенолиза использовались два синтезированных катализатора, 3%Pd/MN270 и 3%Ru/MN270, и коммерческий Pd/C для сравнения. В качестве сырья использовался коммерческий лигнин и лигнин, выделенный в лаборатории из опилок хвойных пород. Лигнин, выделенный самостоятельно, был проанализирован методом ИК-спектроскопии. Было найдено, что большинство пиков промышленного лигнина совпадают с пиками лигнина, выделенного в лаборатории [15, 16].

Для 3%Pd/MN270 были найдены следующие оптимальные условия: температура 250 °С, парциальное давление водорода 1 МПа, объем растворителя 30 мл, соотношение субстрат/катализатор 15/1. Для 3%Ru/MN270 оптимальными условиями процесса являются: температура 300 °С, парциальное давление водорода 4 МПа, соотношение субстрат/катализатор 20:1, объем растворителя 30 мл. Результаты тестирования катализаторов в оптимальных условиях представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты тестирования катализаторов в процессе гидрогенолиза лигнина

Катализатор	Относительная скорость при 30% конверсии, с ⁻¹	Селективность*, %	Конверсия при максимальной селективности, %
3%Pd/MN270	3.40	87.0	89.6
3%Ru/MN270	3.55	92.0	90.0

* по фенолу.

Разница в селективности, вероятно, связана с различной площадью катализаторов, с различным состоянием металла на поверхности и с большим доступом субстрата к каталитически активным центрам в случае 3%Ru/MN270 (Таблица 2).

Таблица 2 – Физико-химические характеристики катализаторов

Катализатор	S _{вет} , м ² /г	S _{t-plot} , м ² /г	Энергия связи, эВ	Состояние металла
3%Pd/MN270	705.0	75.0*	335.0 (77.5%)	Pd(0)
		630.0**	337.4 (22.5%)	PdO
3%Ru/MN270	839.1	157.5*	462.6 (3.8%)	RuO ₂
		699.2 **	463.3 (96.2%)	RuO ₂ •nH ₂ O

*площадь поверхности макропор

**площадь поверхности микропор

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований было показано, что каталитическая система 3%Ru/MN270 является более активной в процессе гидрогенолиза, чем 3%Pd/MN270, однако Pd требует для проведения процесса меньшую температуру и давление. При использовании обоих катализаторов образуются в большом количестве производные фенола, которые могут быть использованы в качестве альтернативного топлива. Оптимальными условиями процесса являются: для 3%Ru/MN270 - температура 300 °С, парциальное давление водорода 4 МПа,

соотношение субстрат/катализатор 20:1, для 3%Pd/MN270 температура 250 °С, парциальное давление водорода 1 МПа, объем растворителя 30 mL, соотношение субстрат/катализатор 15/1.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта 15-08-00245 А.

Список литературы

1. Николайкин Н.И., Мельников Б.Н., Большунов Ю.А. // Научный вестник МГТУ ГА № 162. 2010. с. 12-21
2. Peiyan B., Jicong W., Yajing Z., Peiwen J., Xiaoping W., Junxu L., He X., Tiejun W., Quanxin L. // Bioresource Technology. 183. 2015. P. 10–17.
3. Jan H. // Lignin to liquids over sulfided catalysts. Catalysis Today. 179. 2012. P. 191– 198.
4. Alonso D.M., Bond J.Q., Dumesic J.A. // Catalytic conversion of biomass to biofuels. Green Chemistry. – 2010. – V. 12. – № 9. – P. 1493-1513.
5. Pooya A. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2013. - V. 21. - P. 506-523.
6. Zakzeski J. // Chemical Reviews. – 2010. – T. 110. – P. 3552-3599.
7. Tsyurupa M.P., Tarabaeva O.G., Pastukhov A.V., Davankov V.A. // International Journal of Polymeric Materials. 2003. V. 52. p. 403.
8. Павлова Л.А., Даванков В.А., Лепендина Н.А. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. С. Вып.1. С. 75.
9. Qingquan L. // Macromol. Chem. Phys. 2010. V. 211. P. 1012.
10. Sapunov, V.N. // Journal of Physical Chemistry A. 2013. V. 117. P. 4073 - 4083.
11. Manaenkov O.V. // Topics in Catalysis. - 2014. - V. 57. - P. 1476 - 1482.
12. Matveeva V.G., Manaenkov O.V., Sulman E.M., Rebrov E.V., Doluda V.Yu., Kislitza O.V., Sidorov A.I., Sulman M.G. // Catalysis Today. 2017. T. 280. P. 45-50.
13. Степачёва А.А., Никошвили Л.Ж., Григорьев М.Е., Быков А.В., Лакина Н.В., Сульман Э.М. // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 56-59.
14. Шиманская Е.И. // Бюллетень науки и практики. 2016. № 12 (13) с. 96-99.
15. Komanoya T, Kobayashi H, Hara K, Chun W-J, Fukuoka A. // Applied Catalysis A: General. - 2011. – V. 407. Issues 1-2. P. 188-194.
16. Прокишин Г.Ф. , Гусакова М.А., Афанасьев Н.И., Личутина Т.Ф. Вишнякова А.П., Фесенко А.В. // Химия растительного сырья. – 2008. - №2. - С.5-9.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ (05.02.00)

05.02.00

В.И. Ампилов, Д.А. Степанищева

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
аэрокосмический факультет, кафедра прикладной информатики,
Москва, via69@mail.ru

МЕТОД КОНСТРУИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ КАРКАСНО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ
ОБВОДОВ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-41-43

В статье предложена модификация метода аэродинамического контура, которая позволяет существенно расширить область его применения. Приводится сравнительный анализ различных методов аппроксимации параметров управления формой, даются необходимые рекомендации.

Ключевые слова: *каркас, поверхность, аппроксимация, компьютерная модель.*

Конструирование компьютерных моделей объектов, относящихся к классу граничных, представляет определенные трудности в части математического описания граней. В случае моделирования нелинейчатых поверхностей прибегают к использованию линий продольно-поперечного каркаса, которые являются носителями информации о линейных размерах и форме создаваемой оболочки геометрического объекта.

Один класс поверхностей, относящихся к кинематическим, имеет характерную форму, обусловленную взаимодействием этих поверхностей со средой, к ним относятся линейчатые и нелинейчатые поверхности типа “крыло” и “оперение”. Проблема заключается в выборе такого метода конструирования, который обеспечивал бы высокие компоновочные свойства при минимальной кусочности. Одним из таких методов является метод аэродинамического контура (МАК) [1].

В данном методе используется параметрическая форма вида:

$$\begin{cases} x = \frac{b}{2} \cdot \cos(\theta) + \frac{b}{4} \cdot \lambda \cdot (\cos(2 \cdot \theta) - 1) \\ y = \frac{b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot [(\mu + \lambda) \cdot (1 - \cos(\theta))] \end{cases}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (1)$$

где b – хорда профиля; λ , μ – параметры управления формой профиля ($\lambda \in [0,02; 0,5]$, $\mu \in [0,1; 0,8]$).

Значения параметров λ и μ подбираются таким образом, чтобы конструируемая кривая проходила через точку максимальной толщины профиля. Таким образом, кривая должна удовлетворять следующим требованиям:

- проходить через все заданные узловые точки,
- быть непрерывной и дифференцируемой до n порядка,
- иметь вертикальную касательную в точках $\pm \frac{b}{2}$.

Решение состоит в применении МАК следующего вида:

$$x = x(\theta), y = y(\mu(\theta))$$

В качестве аппроксимирующего полинома можно использовать полином Лагранжа или тригонометрический ряд. Исследования показали, что попытки улучшить точность аппроксимации приводят к увеличению числа узлов, что влечет за собой увеличение степени алгебраических многочленов или увеличению количества членов тригонометрического ряда. В пространстве параметра управления формой μ возникает негативный эффект “волнистости” (эффект Рунге-Мерей).

Уравнение первой производной:

$$\begin{cases} x'(\theta) := \frac{-b}{2} \cdot (\sin(\theta) + \lambda \cdot \sin(2 \cdot \theta)) \\ y'(\theta) := \frac{b}{4} \cdot (\mu + \lambda) \cdot (\cos(\theta) - \cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2) \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение второй производной:

$$\begin{cases} x''(\theta) := -b \cdot \left(\frac{\cos(\theta)}{2} + \lambda \cdot \cos(2 \cdot \theta)\right) \\ y''(\theta) := \frac{b}{2} \cdot (\mu + \lambda) \cdot \left(\sin(2 \cdot \theta) - \frac{\sin(\theta)}{2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

Если профиль задан таблицей, то параметр μ следует представить в виде некоторой функции $\mu(x)$ или $\mu(\theta)$, которая позволяет управлять формой полупрофиля на всем интервале конструирования. Пусть профиль задан таблицей.

Таблица 1 – Исходные координаты профиля A12%

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
x	0.00	0.02	0.05	0.07	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.95	1.00
$y_{\text{в}}$	0.00	0.32	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.03	0.020	0.01	0.00

Для построения графиков функций $\mu(x)$ и $\mu(\theta)$ необходимо вычислить λ в точке максимальной толщины полупрофиля $x = 0,3$; $y_{\text{в}} = 0,09$.

$$\lambda := \frac{4 \cdot x - 2 \cdot b \cdot \cos(\theta)}{b \cdot (\cos(2 \cdot \theta) - 1)} \quad (4)$$

$$\mu := \frac{2 \cdot y}{b \cdot \sin(\theta) \cdot (1 - \cos(\theta))} - \lambda \quad (5)$$

$$\lambda := \frac{4 \cdot (-0,2) - 2 \cdot 20 \cdot \cos(1,538)}{20 \cdot (\cos(3,076) - 1)} = \frac{-0,8 - 40 \cdot 0,033}{20 \cdot (-0,998 - 1)} = \frac{-2,12}{-39,96} = 0,053$$

Аппроксимируем функции $\mu(x)$ и $\mu(\theta)$ методом кривых Безье:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i b_{i,n}(t), 0 \leq t \leq 1,$$

где P_i – функция компонент векторов опорных вершин, а $b_{i,n}(t)$ – базисные функции, n – степень полинома, i – порядковый номер опорной вершины.

Применяем кусочно-полиномиальную аппроксимацию при $n=3$, причем номера точек выбираются следующим образом: 1,2,3,4-первый сегмент, 3,4,5,6-второй и так далее. Таким образом, нужно построить 5 полиномов.

Кубические кривые Безье для $\mu(x)$:

1 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3(-0.50) + 3t(1-t)^2(-0.47) + 3t^2(1-t)(-0.45) + t^3(-0.42)$$

$$y(t) = (1-t)^3(-0.053) + 3t(1-t)^2 0.011 + 3t^2(1-t) 0.024 + t^3 0.034$$

2 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3(-0.43) + 3t(1-t)^2(-0.40) + 3t^2(1-t)(-0.35) + t^3(-0.30)$$

$$y(t) = (1-t)^3 0.03 + 3t(1-t)^2 0.04 + 3t^2(1-t) 0.07 + t^3 0.10$$

3 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3(-0.30) + 3t(1-t)^2(-0.20) + 3t^2(1-t)(-0.10) + t^3 0.00$$

$$y(t) = (1-t)^3 0.10 + 3t(1-t)^2 0.13 + 3t^2(1-t) 0.16 + t^3 0.18$$

4 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3 0.00 + 3t(1-t)^2 0.10 + 3t^2(1-t) 0.20 + t^3 0.30$$

$$y(t) = (1-t)^3 0.18 + 3t(1-t)^2 0.19 + 3t^2(1-t) 0.21 + t^3 0.21$$

5 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3 0.30 + 3t(1-t)^2 0.40 + 3t^2(1-t) 0.45 + t^3 0.50$$

$$y(t) = (1-t)^3 0.21 + 3t(1-t)^2 0.18 + 3t^2(1-t) 0.26 + t^3(-0.05)$$

Аналогичным образом можно построить аппроксимирующие кривые функции $\mu(\theta)$:

1 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3 3.14 + 3t(1-t)^2 2.56 + 3t^2(1-t) 2.32 + t^3 2.13$$

$$y(t) = (1-t)^3(-0.05) + 3t(1-t)^2 0.01 + 3t^2(1-t) 0.02 + t^3 0.03$$

2 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3 2.13 + 3t(1-t)^2 1.962 + 3t^2(1-t) 1.81 + t^3 1.67$$

$$y(t) = (1-t)^3 0.03 + 3t(1-t)^2 0.04 + 3t^2(1-t) 0.07 + t^3 0.10$$

3 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3 1.67 + 3t(1-t)^2 1.54 + 3t^2(1-t) 1.41 + t^3 1.28$$

$$y(t) = (1-t)^3 0.10 + 3t(1-t)^2 0.13 + 3t^2(1-t) 0.16 + t^3 0.18$$

4 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3 1.28 + 3t(1-t)^2 1.14 + 3t^2(1-t) 1.00 + t^3 0.85$$

$$y(t) = (1-t)^3 0.18 + 3t(1-t)^2 0.19 + 3t^2(1-t) 0.21 + t^3 0.21$$

5 промежуток:

$$x(t) = (1-t)^3 0.85 + 3t(1-t)^2 0.69 + 3t^2(1-t) 0.48 + t^3 0.00$$

$$y(t) = (1-t)^3 0.21 + 3t(1-t)^2 0.18 + 3t^2(1-t) 0.26 + t^3 (-0.05)$$

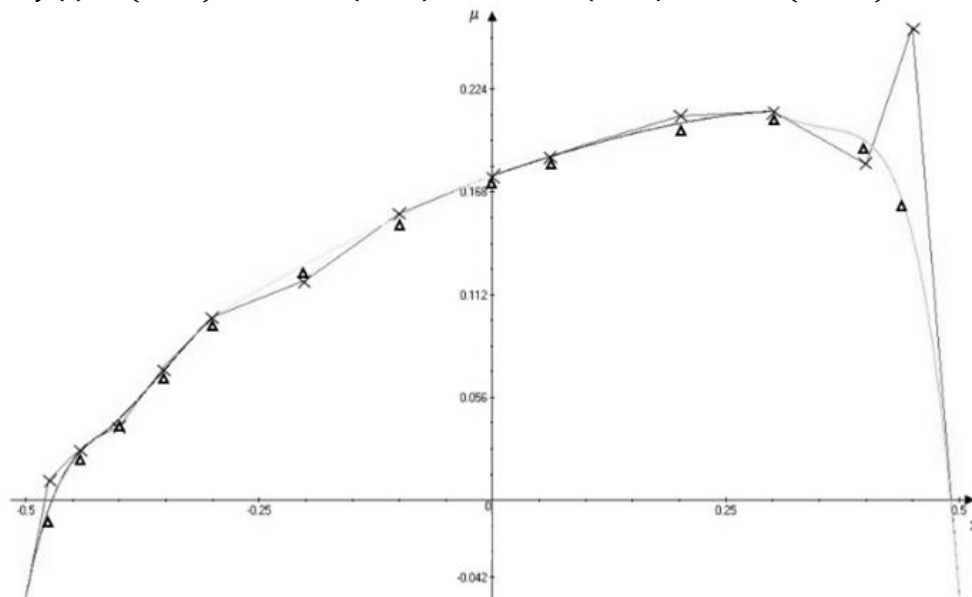


Рис. 1 - График функции $\mu(x)$

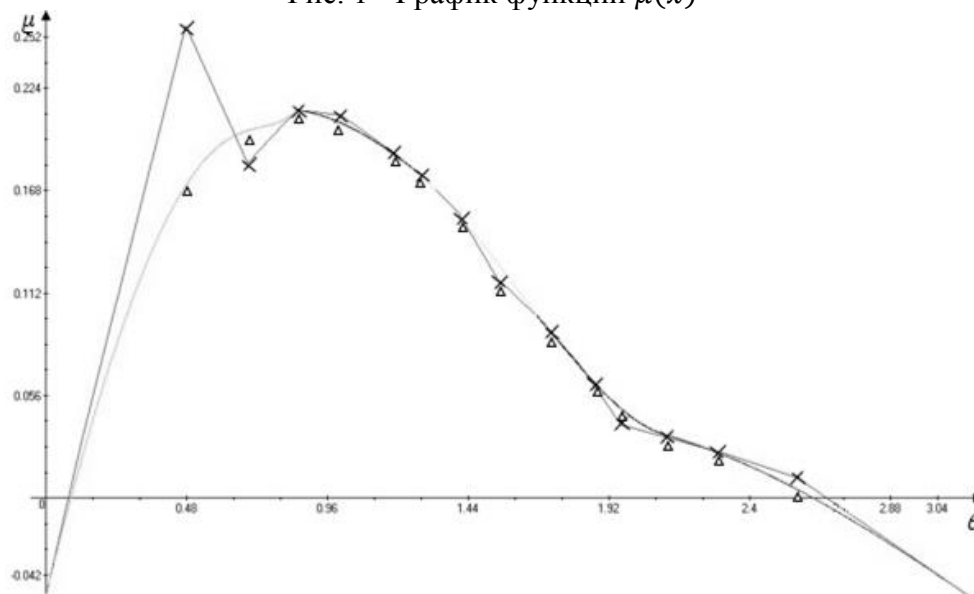


Рис. 2 - График функции $\mu(\theta)$

На рис. 1 и рис. 2 маркером $\times$ отмечены ломаные, полученные из выражений (4) и (5), а также представлены аппроксимирующие кривые, которые обозначены маркером Δ . Таким образом, получаем функцию МАК, которая удовлетворяет заданным требованиям.

Список литературы

1. Осипов В.А. Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей - М.: Машиностроение, 1979.

05.02.08

С.М. Белобородов д.т.н., М.Л. Цельмер

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
аэрокосмический факультет,
кафедра «Инновационные технологии машиностроения»,
ПАО «Научно-производственное объединение «Искра»,
Пермь, beloborodoff2011@yandex.ru, tselmerm@gmail.com, cml723@iskra.perm.ru

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИЕЙ ПРИ СБОРКЕ РОТОРОВ**DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-44-46**

В данной статье обоснована актуальность и рассматриваются условия разработки методики уравнивающей сборки роторов, с управлением векторами локальных дисбалансов и эксцентриситетов. Разработана и изложена методика уравнивающей информационно обеспеченной сборки роторов. Методика позволяет решить практические противоречия высокой точности сборки и изготовления со снижением трудоемкости и себестоимости производства.

Ключевые слова: центробежный компрессор, ротор, уравнивающая сборка, информационное сопровождение изделий, балансировка, динамическая устойчивость.

Задачи современного производства все больше концентрируются в области технологий. Это объясняется обострением противоречия между запрошенными параметрами, заданными с высокой точностью и необходимостью постоянного снижения себестоимости, продиктованной конкуренцией рынка.

Используемые в настоящее время технологические процессы сборки роторов содержат многочисленные этапы балансировки. Каждый такой цикл накапливает неуравновешенные дисбалансы элементов и эксцентриситеты поверхностей.

Применяемые на сегодняшний день технологические процессы не решают задачи информационного сопровождения изделий, моделирования процессов и применения адаптационных технологических процессов.

Дисбалансы и эксцентриситеты поверхностей образуются при изготовлении элементов ротора (погрешности изготовления), при сборке (погрешности взаимной установки). В типовых технологических процессах дисбалансы накапливаются при сборке и, следовательно, усложняется задача уравнивания ротора, появляется трудоемкая и дорогостоящая процедура поэтапной многоплоскостной балансировки ротора [1, 2].

Предложенная методика уравнивающей сборки роторов позволяет решить практические противоречия с высокой точностью сборки и изготовления снижением трудоемкости и себестоимости производства. Методика состоит из 2-х этапов.

Первый этап – подготовка элементов ротора к сборке. Блок-схема работ при подготовке элементов ротора к сборке показана на рис.1. На данном этапе проводят измерение и паспортизацию параметров вала и насадных элементов ротора, проводят расчет параметров балансировки всех элементов ротора и балансируют их. После этого проводят измерения и паспортизацию сбалансированных насадных элементов и вала ротора.

Важнейшей составляющей информационного сопровождения изделий является измерение параметров и паспортизация данных. Именно благодаря этому появляется возможность замены многоциклового технологического процесса сборки ротора на адаптационный уравнивающий.

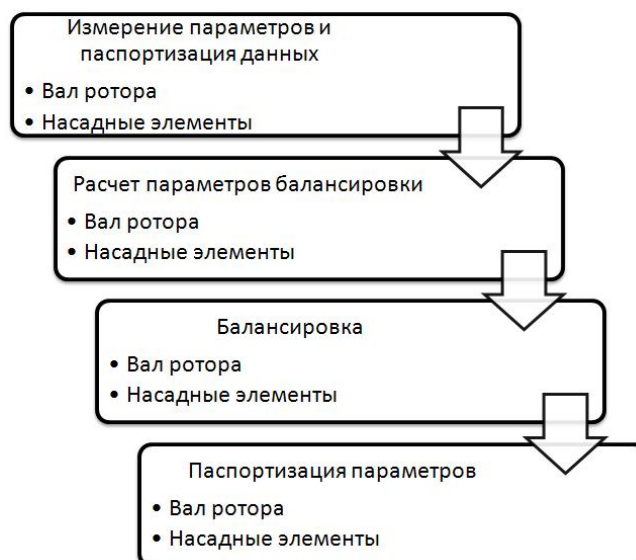


Рис.1– Блок-схема работ при подготовке элементов к сборке

При подготовке вала ротора и насадных элементов к сборке проводят измерение и запись параметров и характеристик деталей. У вала ротора определяют и маркируют максимальное радиальное биение контрольного пояска. Контрольный поясок – место максимального изгиба вала после механической обработки, необходим для параметризации сборки и распределения дисбалансов при уравнивающей сборке. Так же измеряют и маркируют точки максимального радиального биения в плоскостях установки элементов ротора на вал для последующего уравнивания дисбалансов при сборке. У насадных элементов (рабочих колес) выполняют измерение радиального биения контрольного пояска (середина контактной поверхности лабиринтного уплотнения) относительно установочной поверхности балансировочной оправки. Полученные при измерениях значения обязательно заносят в сопроводительную документацию на детали.

Для проведения адаптационной сборки проводят расчет параметров балансировки. В этом расчете учитывают паспортизованные значения измерений, массово-геометрические параметры элементов ротора, а так же задают требования по качеству балансировки и точности последующей сборки ротора. В результате получают необходимые для проведения балансировки величины и направления дисбалансов участков вала и насадных элементов ротора.

Балансировка вала заключается в поэтапных циклах двухплоскостной балансировки. Целесообразно начинать балансировку с пары плоскостей ближайших к поверхностям опор, последующие этапы балансировки с выбором плоскостей коррекции от периферии к центру вала. Остаточные дисбалансы направляют диаметрально противоположно максимальному биению контрольного пояска. При этом получившиеся дисбалансы должны соответствовать рассчитанным ранее значениям по величине и направлению.

Балансировку насадных элементов (рабочих колес) проводят на паспортизованной конической оправке по двум плоскостям коррекции при заранее заданных параметрах установки. При установке насадных элементов на балансировочную оправку радиальное биение посадочной поверхности оправки разворачивают диаметрально противоположно направлению максимального радиального биения уплотнительной поверхности рабочего колеса. При балансировке обеспечивается заданное направление и величины остаточных дисбалансов.

После проведения всех циклов балансировки элементов ротора, получившиеся параметры (значения и направления остаточных дисбалансов) записывают в сопроводительную документацию для дальнейшего использования при сборке ротора.

Второй этап уравнивающей сборки – сборка ротора с заранее заданными параметрами дисбалансов (величина и направление). Блок-схема работ по сборке ротора показана на рис.2.

Сборку ротора проводят с установкой всех элементов ротора на вал с заданной ориентацией, управлением векторами дисбалансов и эксцентриситетов. Максимальные биения контактной поверхности рабочих колес разводят диаметрально противоположно с максимальными биениями посадочных поверхностей вала, а дисбалансы насадных элементов ротора направляют диаметрально противоположно дисбалансам участков вала.

При экспериментальных сборках практически определено повышение точности сборки на 10-15%. За счет применения уравнивающей сборки объем балансировочных работ при изготовлении ротора снизился на 25-30%.



Рис.2 – Блок-схема работ при сборке ротора с заранее заданными параметрами дисбалансов

Проверку уравниваемости ротора после сборки проводят на балансировочном оборудовании. При несоответствии ротора заданным параметрам необходимо провести коррекцию дисбалансов. После завершения работ при сборке ротора с заранее заданными дисбалансами полученные параметры уравнивания заносят в сопроводительную документацию.

Таким образом, актуальность поставленных задач определяет необходимость применения предложенной методики уравнивающей сборки ротора. Реализация методов для включения в технологический процесс требует разработки алгоритма на основе предложенной методики. Для успешного применения методов уравнивающей сборки и информационного сопровождения изделий требуется организация дополнительного автоматизированного рабочего места для обеспечения выполнения задач по паспортизации и расчетам параметров сборки.

Экспериментальная проверка разработок в области уравнивающей сборки ротора и информационного сопровождения изделий позволяет внедрить разработанную методику в технологические процессы, повысить за счет этого точность сборки на 10-15%, снизить при этом себестоимость изготовления за счет исключения многоэтапной процедуры балансировки ротора (объем балансировочных работ снижается на 25-30%) и уравновесить дисбалансы элементов и эксцентриситеты поверхностей в процессе сборки ротора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект №14-19-00877.

Список литературы

1. *Непомилуев В.В.* Разработка технологических основ обеспечения качества сборки высокоточных узлов газотурбинных двигателей [Текст] / автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Рыбинск: Изд-во РГТА, 2000. – 44 с.
2. *Базров Б.М.* Технология сборки машин [Текст] / Б.М. Базров, О.В. Таратынов, В.В. Клепиков; под общ.ред. Б.М. Базрова. – М.: Спектр, 2011. – 368 с.

05.02.08

¹С.М. Белобородов д.т.н., ¹М.Л. Цельмер, ²С.Д. Дубина, ³Е.В. Мехоношина

¹ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
аэрокосмический факультет, кафедра «Инновационные технологии машиностроения»,
ПАО «Научно-производственное объединение «Искра»,
Пермь, beloborodoff2011@yandex.ru, tselmerm@gmail.com, cml723@iskra.perm.ru

²Пермский военный институт внутренних войск МВД России,
кафедра конструкций автобронетанковой техники,
Пермь, Brian_71@mail.ru

³ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, mevpstu@gmail.com

МИНИМИЗАЦИЯ ВНЕШНЕГО ДИСБАЛАНСИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИНАМИКУ ГИБКОГО РОТОРА

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-47-49

Проведен анализ результатов исследований и расчетов. Полученные результаты позволяют подтвердить заявленный уровень эксплуатационной надежности за счет минимизации влияния внешнего дисбалансирующего воздействия. На основании исследований разработан показатель виброустойчивости валопровода.

Ключевые слова: ротор, вибрация, дисбаланс, сборка.

В настоящее время расширяется область применения компрессорного и насосного оборудования. Особенно это проявляется в отраслях промышленности: добыча, переработка и транспортировка полезных ископаемых, энергетика, строительство, транспорт, агропромышленный комплекс. Важнейшие показатели любого энергетического оборудования – показатели надежности в условиях и режимах эксплуатации, которые в свою очередь напрямую зависят от отказов и аварийных ситуаций. Большое количество аварийных остановов агрегатов, потерь и простоев возникает по причине предельного (аварийного) уровня вибрации.

В энергетическом машиностроении особое внимание оказывают эксплуатационной надежности агрегата. Наиболее эффективный метод обеспечения эксплуатационной надежности – минимизация влияния внешнего дисбалансирующего воздействия на динамическую устойчивость валопровода. Этот метод включает в себя математическое моделирование динамического состояния роторов, экспериментальные исследования динамического состояния валопроводов и отстройку от критических частот [1].

Использование математического моделирования позволяет управлять суммированием погрешностей роторов, проводить поиск решений, снижающих влияние внешнего дисбаланса и, как следствие изгибов, проводить сравнение вариантов, что обеспечивает управление технологическим процессом сборки [2].

Важнейшим этапом минимизации влияния внешнего дисбалансирующего воздействия на динамическую устойчивость валопровода является экспериментальное исследование динамического состояния, включающее в себя моделирование монтажных дисбалансов (ММД). Анализ результатов моделирования обеспечивает прогноз динамического состояния валопровода на весь период эксплуатации.

Основной целью ММД является прогнозирование поведения системы валопровода при возникновении дополнительного внешнего дисбалансирующего воздействия.

В ходе моделирования монтажного дисбаланса исследовалось динамическое состояние роторов двух центробежных компрессоров на масляных подшипниках (не упругий подвес) с установкой имитирующих грузов массой 3, 6.5, 9 и 12г. Результаты ММД показаны на рис.1 - 3.

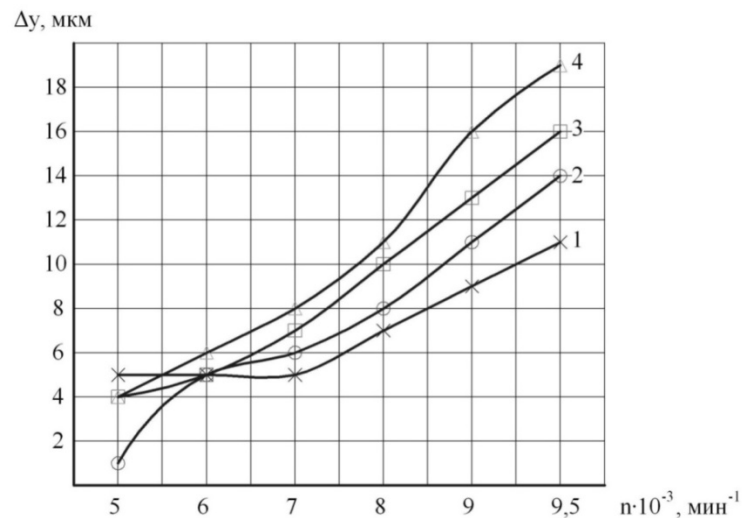


Рис. 1– График зависимости уровня виброперемещения от частоты вращения вала ротора по передней опоре для компрессора №1: 1 – с грузом массой 3г, 2 – с грузом массой 6.5г, 3 – с грузом массой 9г, 4 – с грузом массой 12г.

На рис. 1 показаны зависимости уровня виброперемещения от частоты вращения вала ротора для каждой массы груза по передней опоре для компрессора №1: при возникновении дополнительного внешнего дисбалансирующего воздействия уровень виброперемещения на передней опоре компрессора увеличивается, однако не превышает 20 мкм.

На рис.2 показаны зависимости уровня виброперемещения от частоты вращения вала ротора для каждой массы груза по передней опоре для компрессора №2 (размещение грузов на фланце компрессора), а на рис.3 – с размещением грузов на валу трансмиссии.

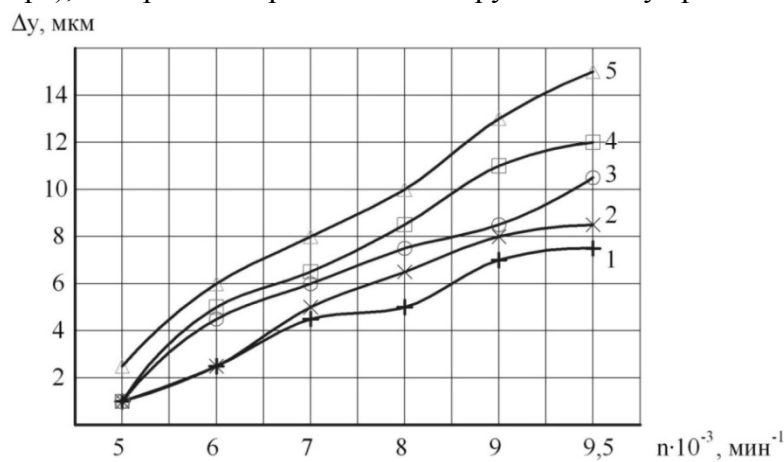


Рис. 2– График зависимости уровня виброперемещения от частоты вращения вала ротора по передней опоре для компрессора №2(груз на фланце компрессора): 1 –без груза, 2 – с грузом массой 3г, 3 – с грузом массой 6.5г, 4 – с грузом массой 9г, 5 – с грузом массой 12г.

Анализ графиков зависимости позволяет сделать вывод, что при возникновении дополнительного внешнего дисбалансирующего воздействия уровень виброперемещения на передней опоре компрессора увеличивается, при этом прирост пропорционален приросту массы грузов.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований позволяют спрогнозировать поведение валопровода при эксплуатации агрегата при возникновении внешнего дисбалансирующего воздействия. Уровень виброперемещений при этом не превышает 20мкм, что является показателем динамически устойчивой работы валопровода.

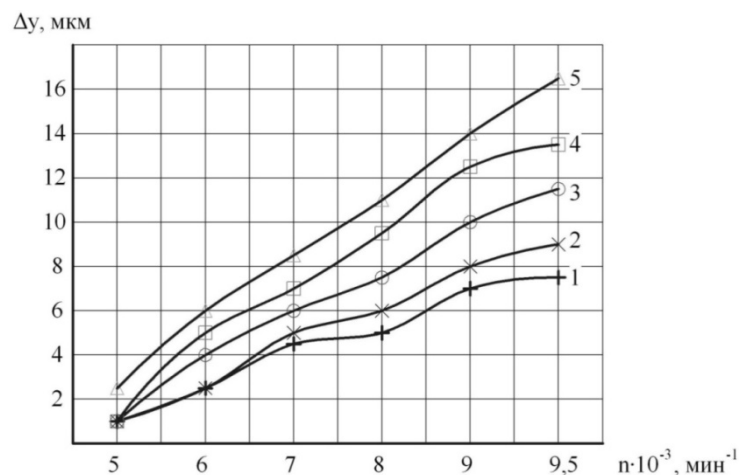


Рис. 3– График зависимости уровня виброперемещения от частоты вращения вала ротора по передней опоре для компрессора №2(груз на фланце трансмиссии): 1 –без груза, 2 – с грузом массой 3г, 3 – с грузом массой 6.5г, 4 – с грузом массой 9г, 5 – с грузом массой 12г.

Полученные результаты позволяют не только оценить динамическую устойчивость роторов, но и разработать комплекс мер по обеспечению динамической устойчивости валопроводов при эксплуатации компрессорных станций. В частности, на основании блока исследований проведенных в 2010-2016 гг.разработан показатель виброустойчивости валопровода K_y :

$$K_y = \frac{\sqrt{\frac{D_m}{D}}}{\sqrt{\frac{W_m}{W}}}$$

где D , D_m – дисбалансы после монтажа и моделирования монтажных дисбалансов соответственно, W , W_m – уровень вибрации после монтажа и моделирования монтажных дисбалансов соответственно.

При величинах $K_y \geq 1$ виброустойчивость обеспечивается на всех режимах работы, при $1 \geq K_y \geq 0.8$ валопровод требует периодического контроля вибрации и проведения коррекции эксплуатационного дисбаланса, при $K_y \leq 0.8$ виброустойчивость валопровода неудовлетворительна.

При проведении экспериментального моделирования монтажных дисбалансов описанных выше был определен показатель виброустойчивости валопровода K_y для компрессора №2. $K_y = 2$ для случая установки имитационных грузов на фланце компрессора, $K_y = 1.8$ для случая установки имитационных грузов на фланце трансмиссии. Виброустойчивость обеспечивается на всех режимах работы агрегата.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают заявленный уровень эксплуатационной надежности за счет минимизации влияния внешнего дисбалансирующего воздействия. Показатель виброустойчивости позволяет прогнозировать динамическую устойчивость валопроводов газоперекачивающих агрегатов при эксплуатации компрессорных станций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект №14-19-00877.

Список литературы

1. Mekhonoshina E. V., Shmakov A. F., Modorsky V. Y. Numerical study of stress-strain state of the model of three-stage compressor gas distributed unit taking into account thermal and gas-dynamic loads // 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies, PCT 2016 / Ed. by Starodubov I., Sokolinsky L. Vol. 1576 – CEUR-WS, 2016. pp. 607-614.
2. Белобородов С.М., Ковалев А.Ю. Методы минимизации локальных монтажных дисбалансов сборного ротора // Вестник машиностроения. 2010. № 12. С. 16–19. S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer, S.D. Dubina, E.V. Mekhonoshina

05.02.08

¹С.М. Белобородов д.т.н., ¹М.Л. Цельмер, ²С.В. Жданов, ³Л.Н. Бутымова¹ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
аэрокосмический факультет, кафедра «Инновационные технологии машиностроения»,
ПАО «Научно-производственное объединение «Искра»,²Пермский военный институт внутренних войск МВД России,
кафедра конструкций автобронетанковой техники,³ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, beloborodoff2011@yandex.ru, tselmerm@gmail.com, cml723@iskra.perm.ru,
zdanov1911@mail.ru, liliya85@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВАЛОПРОВОДА

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-50-52

Проведено экспериментальное исследование влияния на динамическое состояние валопровода следующих факторов: монтажные дисбалансы привода, пусковой режим работы агрегата, превышение рабочего диапазона, изменение перекаса валов. Определены закономерности влияния этих факторов. Сформулированы рекомендации по минимизации их влияния на динамически устойчивую работу валопровода.

Ключевые слова: *ротор, вибрация, дисбаланс, сборка.*

Добыча, транспортировка, переработка и продажа углеводородов являются основой экономики современной России. Для поддержания стабильного экономического роста необходима бесперебойная работа газодобывающих, газотранспортных и газоперерабатывающих предприятий, что, в свою очередь, обеспечивается стабильной работой агрегатов.

Самой нагруженной частью газоперекачивающего агрегата является валопровод, состоящий из ротора привода (ГТУ), трансмиссии, передающей крутящий момент, и ротора компрессора сжимающего газ. Долговременная и эффективная работа агрегата зависит от динамического состояния этой сложной составной системы [1].

Однако практика показала, что в большинстве динамических расчетов используют только проектную информацию и не учитывают реальных данных о погрешностях изготовления и допущенных отступлениях, параметрах сборки и монтажа.

Влияние всего комплекса параметров можно оценить только при экспериментальных исследованиях валопроводов реальных агрегатов, например, на испытательном стенде при предъявительских и приемо-сдаточных испытаниях [2].

Измерения вибрации в ходе исследования проводились с использованием комплекта контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающего измерения виброперемещений с использованием датчиков, конструкционно включенных в состав компрессора. Допустимость уровней виброскорости опор компрессоров контролировалась переносной измерительной аппаратурой. Величины радиальных биений установленных элементов валопроводов контролировались с использованием растровой системы и индикаторов часового типа с точностью измерения (ценой деления) 1 мкм.

Статья написана по результатам экспериментальных исследований компрессора с масляными подшипниками, изготовленного и смонтированного по технологическому процессу с использованием адаптационных методов. При этом испытания динамического состояния валопровода при условии увеличения перекаса осей: вал ротора мультипликатора – вал трансмиссии – вал ротора компрессора при обеспеченном ступенчатом перекасе осей валов от 0 до 3 мрад в каждом соединении при изменении частот вращения от 1000 до 6825 об/мин.

Вибрация имеет достаточно сложную и разнообразную картину изменения, как в рабочем диапазоне частот, так и вне его. В ходе исследования были зарегистрированы уровни размаха виброперемещений ротора обеих опор по оси Y на фиксированных частотах, после чего была выполнена аппроксимация. Проведенное обобщение результатов испытаний позволило выявить явные закономерности.

При анализе результатов испытаний выяснено, что кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6 графика (рис.1), описывающие изменение уровня вибрации по оси Y при изменении частоты вращения $n = 1000 - 6825$ об/мин, свидетельствуют о значительной зависимости уровня вибрации ротора от увеличения частоты вращения. При этом состояние трансмиссии в области передней опоры следует оценить как достаточно стабильное. Общее изменение вибрации, описанное этими кривыми графика, достигает 10 мкм, а суммарное значение – 20 мкм.

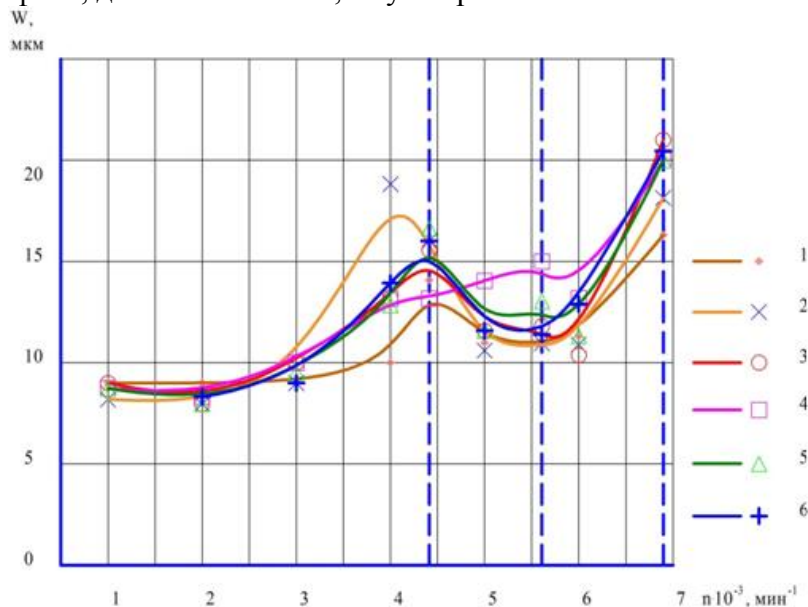


Рис. 1 – График размаха виброперемещений передней опоры ротора по оси Y : 1 – без перекоса, 2 – перекос 0.6 мрад, 3 – перекос 1.2 мрад, 4 – перекос 1.8 мрад, 5 – перекос 2.4 мрад, 6 – перекос 3 мрад

Характер кривой 1, описывающей изменение уровня вибрации опоры ротора, свидетельствует о выраженном повышении вибрации при входе в рабочий диапазон (4450 об/мин) с последующим снижением. При этом явно просматривается пиковая критическая частота. Общая величина вибрации невелика и не превышает 17 мкм. Кривая 2 характеризует изменения вибрации при перекосе валов в 0,6 мрад как явно выраженное пиковое повышение при подходе к рабочему диапазону. Последующее снижение до 12 мкм сменяется повышением до 18 мкм на максимальной частоте вращения. Кривая 3 графика свидетельствует о появлении второго повышения величины виброперемещений на частоте 5600 об/мин при сохранении общего их уровня. Кривые 4, 5, 6 графика, по сути, образуют пучок со стабильно устойчивыми закономерностями изменения и величинами.

В целом приведенная диаграмма характеризует выраженный прирост вибрации на частотах около 4550 об/мин, устойчиво низкую вибрацию в середине рабочего диапазона с последующим повышением вибрации на максимальных рабочих частотах 6825 об/мин.

При анализе динамического состояния ротора, проведенного исходя из полученных результатов измерения вибрации задней опоры вала (рис.2), выявлены устойчивые закономерности. Анализировались кривые графика, описывающие изменение уровня вибрации по оси Y при изменении частоты вращения $n = 1000 \dots 6825$ об/мин.

В частности, определено, что кривая 1, описывающая изменение уровня вибрации опоры вала, установленного без перекоса осей валов трансмиссии, свидетельствует о некотором превышении фона виброперемещений в середине пускового режима, в середине рабочего диапазона и снижении вибрации на максимальной частоте вращения. Анализ результатов испытаний позволил выявить, что кривые 2, 3, 4, 5, 6 графика свидетельствуют о

незначительной зависимости уровня вибрации ротора от увеличения частоты и величины перекоса осей валов. Все изменения связаны с местным повышением вибрации в середине пускового режима и местным снижением – в середине рабочего.

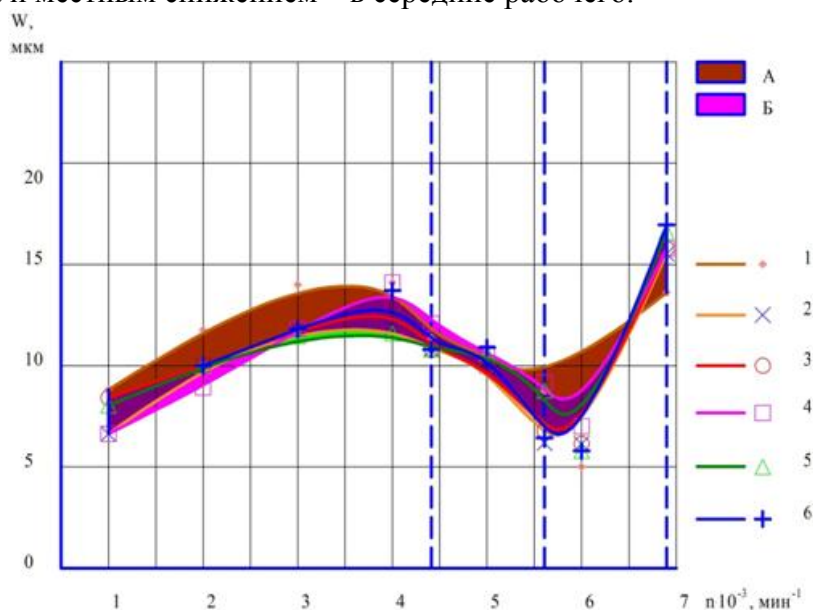


Рис. 2– График размаха виброперемещений задней опоры ротора по оси Y: 1 – без перекоса, 2 – перекос 0,6 мрад, 3 – перекос 1,2 мрад, 4 – перекос 1,8 мрад, 5 – перекос 2,4 мрад, 6 – перекос 3 мрад

При этом состояние ротора в области задней опоры вала следует оценить как динамически устойчивое и стабильное. Общее изменение вибрации, описанное этими кривыми графика, достигает 11 мкм, а суммарное значение – 17 мкм. За исключением описанных особенностей все шесть кривых, по сути, образуют пучок со стабильно устойчивыми закономерностями изменения и величинами, А – зона отклонений, Б – зона устойчивого жгута.

В целом приведенная диаграмма характеризует выраженный прирост вибрации на частотах около 3500 об/мин, устойчиво низкую вибрацию в середине рабочего диапазона с последующим повышением вибрации на максимальных рабочих частотах 6825 об/мин. Динамическое состояние ротора следует считать устойчивым.

При этом состояние ротора в области задней опоры вала следует оценить как динамически устойчивое и стабильное. Общее изменение вибрации, описанное этими кривыми графика, достигает 7 мкм, а суммарное значение – 14 мкм. За исключением описанных особенностей, все шесть кривых, по сути, образуют пучок со стабильно устойчивыми закономерностями изменения и величинами, А – зона отклонений, Б – зона устойчивого жгута.

В целом приведенная диаграмма характеризует выраженный прирост вибрации на частотах около 3500 об/мин, устойчиво низкую вибрацию в середине рабочего диапазона с последующим повышением вибрации на максимальных рабочих частотах 6825 об/мин. Динамическое состояние ротора следует считать полностью устойчивым.

Таким образом, динамическое состояние ротора очень несущественно зависит от перекоса осей валопровода, но очень существенно – от величины остаточного монтажного дисбаланса. Применение метода коррекции монтажных дисбалансов позволяет адаптировать к условиям испытаний и эксплуатации любые квазижесткие роторы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект №14-19-00877.

Список литературы

1. СТО Газпром 2-3.5-138-2007 Типовые технические требования к газотурбинным ГПА и их системам. – Москва, 2007. – 70с.
2. Ковалев А.Ю. Экспериментальное исследование эффективности метода компенсационной сборки высокоскоростных роторов с магнитными подшипниками // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 4. – С. 26–30.

05.02.08

¹С.М. Белобородов д.т.н., ¹М.Л. Цельмер, ²В.Я. Модорский

¹ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
аэрокосмический факультет,
кафедра «Инновационные технологии машиностроения»,
ПАО «Научно-производственное объединение «Искра»,

²ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
аэрокосмический факультет,
Пермь, beloborodoff2011@yandex.ru, tselmerm@gmail.com, cml723@iskra.perm.ru,
modorsky@mail.ru

АНАЛИЗ И МИНИМИЗАЦИЯ АВАРИЙНОЙ ВИБРОАКТИВНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РОТОРОВ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-53-55

Проведен анализ аварийной виброактивности ротора. Определены причины виброактивности высокоскоростных роторов. Сформулированы рекомендации по минимизации ее влияния на устойчивую работу за счет резерва динамической устойчивости валопровода.

Ключевые слова: *ротор, вибрация, дисбаланс, сборка.*

Современные турбоагрегаты должны обладать высоким уровнем динамической устойчивости. Их работоспособность в первую очередь зависит от уровня виброактивности валопроводов. Большое влияние на динамическую устойчивость валопроводов турбоагрегатов оказывают динамически неуравновешенные роторы, провоцирующие повышение уровня вибрации.

В предложенной статье рассматриваются причины аварийного вывода высокоскоростных компрессоров из эксплуатации. Эти причины стали, к сожалению, достаточно типичными для современного российского энергетического машиностроения.

Исследуемый компрессор выведен из эксплуатации по превышению аварийной уставки виброперемещения ротора. Превышение было пиковым без постепенного нарастания уровня.

Виброактивность ротора, работающего с нарушением условий эксплуатации всегда возрастает, однако компрессор при этом может находиться во вполне работоспособном состоянии. Условием такой работоспособности является высокая обеспеченная динамическая устойчивость ротора компрессора и валопровода агрегата в целом [1].

Балансировка вала исследуемого ротора была проведена относительно поверхностей А, Б по двум плоскостям В, Г (см. рис.1). Такая балансировка вполне применима к роторам, хорошо сохраняющим жесткость во всем рабочем диапазоне. Однако применение подобных схем к гибким роторам является изначально ошибочным решением. Кроме того, примитивность принятого конструкторского решения существенно сузило возможности современного технологического оборудования, обеспечивающего балансировку ротора с использованием трех плоскостей коррекции. Эксцентриситеты участков вала и образованных ими посадочных поверхностей $\Delta_1 - \Delta_8$ были направлены практически в одну сторону, что существенно упростило бы коррекцию локальных дисбалансов, однако и эта возможность не была использована.

Масса вала в составе ротора превышает половину его полной массы. Локальные дисбалансы, расположенные в зоне максимального изгиба вала (участки с радиальным биением $\Delta_4 - \Delta_6$), по первой форме не устранялись. Коррекция локальных дисбалансов, находящихся на консольных частях и уравновешенных локальными дисбалансами прилежащих участков пролетной части, не рассматривалась вообще, хотя во время эксплуатационного рабочего изгиба они создают ощутимый изгибающий момент сил.

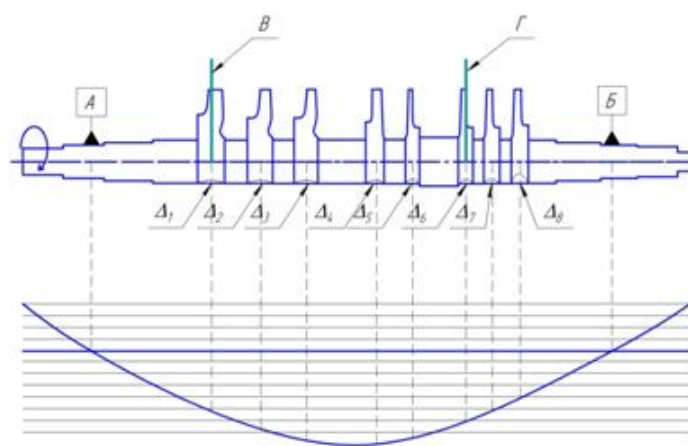


Рис.1– Схема уравнивания ротора по типовому технологическому процессу

Такие условия балансировки создают ситуацию, в которой воздействие любого внешнего дисбаланса приведет к резкому повышению его виброактивности.

Установка трансмиссии с эксцентриситетом ее оси относительно ротора компрессора в 30 – 50 мкм – достаточно частое явление. Доля массы трансмиссии в 50 – 70 кг, приходящаяся на опору компрессора, сообщает ему дополнительный дисбаланс в 1500 – 3500 г·мм даже при условии идеальной жесткости ее вала. Суммарное увеличение дисбаланса, обусловленное эксцентриситетом установки и динамическим прогибом вала трансмиссии, нередко достигает 5000 – 7500 г·мм [2].

Измерения радиальных биений посадочных поверхностей вала выявили достаточно высокую сходимость с результатами, полученными при первичной сборке ротора. Следовательно, общепринятая двойная термообработка валов при их изготовлении обеспечивает необходимую стабильность формы.

Двухплоскостная проверка дисбалансов, выполненная на балансировочном станке, показала их некоторое увеличение, которое не выходило за пределы требований точности, соответствующей G 2,5.

Таким образом, проведенный анализ показал, что уравнированность ротора, выведенного в аварийный останов, не имела исключительного влияния на его виброактивность.

Роторы, работающие в условиях ненормированного количества твердых примесей в газе и других экстремальных условиях, должны обладать высокой динамической устойчивостью, которая позволила бы сохранять работоспособность агрегатов и в условиях увеличения дисбалансов в 15 – 60 раз. По имеющемуся опыту такое состояние может быть обеспечено только многоплоскостной балансировкой, отвечающей условию:

$$I_{\text{сум}} = \sum |I_i| \rightarrow \min$$

- где $I_{\text{сум}}$ – суммарный остаточный дисбаланс ротора, I_i - дисбаланс i -го участка ротора.

Целесообразное положение плоскостей балансировки вала определяется в ходе анализа кривых его динамического прогиба. Интенсивность динамического изгиба вала существенно снижается при коррекции локальных дисбалансов в области экстремумов этих изгибов. Однако следует сразу оговорить применимость такого подхода. Попытка устранения всего дисбаланса в области экстремумов приведет только к появлению новых локальных дисбалансов и значительному затруднению задачи последующего уравнивания вала. Коррекция локальных дисбалансов вблизи опор может проводиться для устранения остаточных дисбалансов, выходящих за пределы требований точности балансировки. При достаточно развитых консолях коррекция дисбалансов должна проводиться с учетом образующихся пар сил, способных увеличивать изгиб ротора. Пример положения плоскостей коррекции приведен на рис.2.

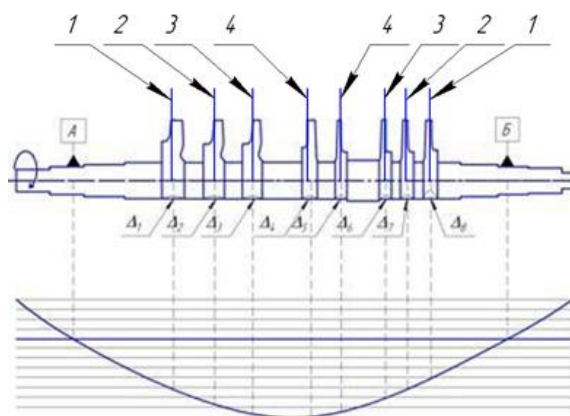


Рис.2– Рекомендуемая схема уравнивания ротора

При уравнивании ротора наиболее целесообразным технологическим решением является проведение ступенчатой балансировки, обеспечивающей коррекцию локальных дисбалансов в плоскостях, соответствующих приведенным локальным дисбалансам. При этом доли устраняемых локальных дисбалансов должны соответствовать зависимости:

$$I_i = \frac{\bar{e}_{mi} M_i}{\sum |I_n|}$$

- где I_i - дисбаланс i -го участка ротора, $\bar{e}_{mi}$ - допустимый остаточный локальный дисбаланс i -го участка ротора, M_i - масса i -го участка ротора, I_n - теоретический технологический дисбаланс ротора.

Балансировку целесообразно начинать с пары плоскостей ближайших к опорам, далее двигаться от периферии к центру ротора (вала).

Необходимым условием достижения высокой динамической устойчивости валопровода газоперекачивающего агрегата является проведение четырехплоскостной коррекции монтажных дисбалансов установленной трансмиссии.

Коррекцию монтажного дисбаланса трансмиссии, в состав которой входят фланцы для установки на валы двигателя и компрессора, предпочтительно проводить в следующей последовательности: произвести измерения радиального биения контрольных поясков, определить массы корректирующих грузов для коррекции локальных монтажных дисбалансов и установить корректирующие грузы в местах минимального биения для каждой муфты трансмиссии в плоскостях коррекции.

Таким образом, аварийная ситуация, обусловленная эпизодическим или систематическим внешним дисбалансирующим воздействием, вполне может быть преодолена за счет резерва динамической устойчивости валопровода.

Резерв динамической устойчивости валопровода может быть создан проведением многоплоскостной балансировкой роторов и проведением четырехплоскостной коррекции монтажных дисбалансов трансмиссии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект №14-19-00877.

Список литературы

1. Мехоношина Е. В., Шмаков А. Ф., Модорский В.Я. Численное исследование напряженно-деформированного состояния трехступенчатого модельного компрессора ГПА с учетом тепловых и газодинамических нагрузок // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016): труды международной научной конференции (28 марта – 1 апреля 2016 г., г. Архангельск) / Под ред. Л.Б. Соколинского, И.И. Стародубова, – Т. 1576 CEUR-WS, 2016. – С. 607-614.
2. Ковалев А.Ю. Технологическое обеспечение уравниваемости высокоскоростных роторов с магнитными подшипниками на основе компенсационного метода сборки [Текст] / автореферат дис. ... кандидата технических наук. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2013. - 34 с.

05.02.02

Л.В. Беляев к.т.н., А.В. Жданов к.т.н.

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых,
Владимир

ПОРИСТОСТЬ ОБЪЕМНЫХ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-56-59

В статье приводятся экспериментальные данные о параметрах качества объемных деталей из нержавеющей стали, полученных методом селективного лазерного спекания. Даны результаты измерения твердости пористости, плотности для различных значений положения фокальной точки при технологическом процессе спекания объемных деталей. Определено оптимальное значение фокусного расстояния равное +2 мкм.

Ключевые слова: *селективное лазерное спекание, твердость, пористость, плотность, нержавеющая сталь.*

Процесс селективного лазерного спекания является одним из наиболее востребованных при производстве готовых объемных деталей в сжатые сроки [1-4]. Однако большинство готовых деталей для обеспечения требуемых параметров прочности и долговечности должно обладать постоянством распределения твердости по объему, и иметь минимальную пористость [5,6]. В данной работе проводятся экспериментальные исследования параметров качества на примере готовых объемных деталей правильной формы.

Синтез образцов размером 30×30×6 мм в количестве 10 штук выполняли на установке Concept Laser M2 (Германия) в защитной атмосфере азота. Система оснащена Yb:YAG оптоволоконным лазером с диодной накачкой, мощностью 400 Вт производства фирмы IPG (Россия). Длина волны лазерного излучения 1070 нм. Опытные образцы получали на режимах: мощность 200 Вт, скорость сканирования 800 мм/с. Положение фокальной точки лазерного излучения изменяли от -4 до +5 мм. За нулевую отметку принимали верхний уровень насыпанного порошка. При этом диаметр пятна в фокусе был 50 мкм.

Использовали порошок марки CL20ES, по химическому составу близкий к хромоникельмолибденовой стали марки 03X17H14M3 (ГОСТ 5632-2014) и стали AISI 316L. Данный порошок широко используется для аддитивного производства кислото- и коррозионностойких прототипов, единичных или мелкосерийных изделий в машиностроении, элементов пресс-форм и автомобильной промышленности [7].

Исследования структуры проводили методами оптической (NTEGRA Aura) и растровой электронной микроскопии (Quanta 3D-200). Для проведения рентгеноспектрального микрохиманализа использовали спектрометр последовательного анализа ARL ADVANTX. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 25281-82 (ASTM B962-08). Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазного индентора в виде пирамиды согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002).

На рис. 1 представлено изображение гранул стали CL20ES, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (а) и распределение гранул по размерам (б). На поверхности частиц встречаются сателлиты, что может снижать текучесть и стабильность насыпной плотности. Исследуемые гранулы представляют собой поликристаллы со средним диаметром около 30 мкм и микротвердостью $HV_{50} = 2345 \pm 202$ МПа.

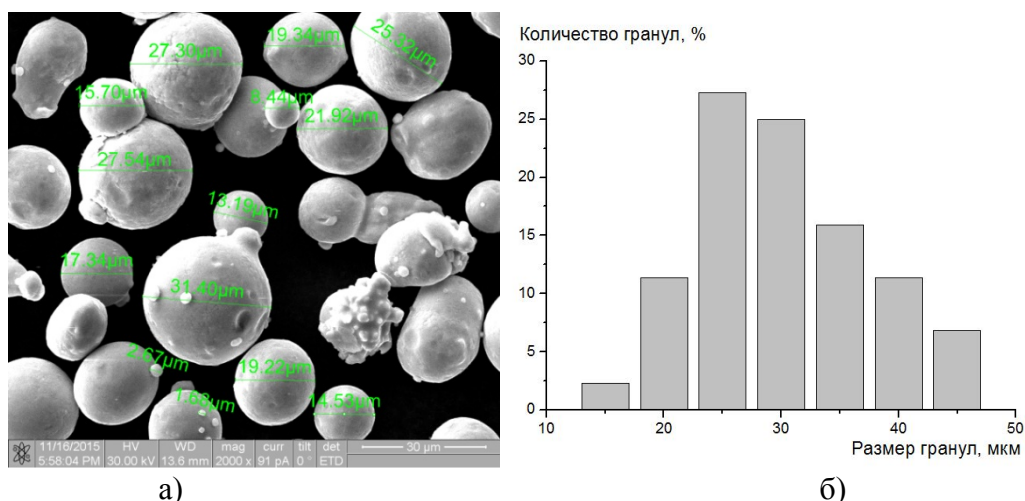


Рис. 1 – Гранулы коррозионностойкой стали CL20ES (а) и распределение их по размерам (б)

Результаты сравнительного рентгеноспектрального микрохиманализа отдельных гранул и химический состав порошка по данным производителя представлены в табл.1. Как показали исследования, содержание легирующих компонентов в отдельных гранулах отличается незначительно и соответствует заявленному производителем составу.

Таблица 1 – Химический состав порошка стали CL20ES

	Концентрация элементов, масс. %				
	Si	Cr	Mn	Ni	Mo
Микрохиманализ	$0,68 \pm 0,12$	$18,53 \pm 0,19$	$1,65 \pm 0,12$	$12,17 \pm 0,30$	$2,30 \pm 0,88$
Данные производителя	0...1,0	16,5...18,5	0...2,0	10,0...13,0	2,0...2,5

Во время послойного лазерного синтеза сформировалась пористая структура с низкой плотностью $7,15 \text{ г/см}^3$ (рис. 2, а). Поры в виде полостей неправильной формы протяженностью до 600 мкм. При измерении микротвердости размер пор значительно превосходит диаметр отпечатка индентора. Поэтому микротвердость замеряли на участках металла между порами.

Снижение положения фокальной точки приводит к уменьшению диаметра пятна, повышению плотности мощности лазерного излучения и формированию сплава с более высокой плотностью (рис. 2, б).

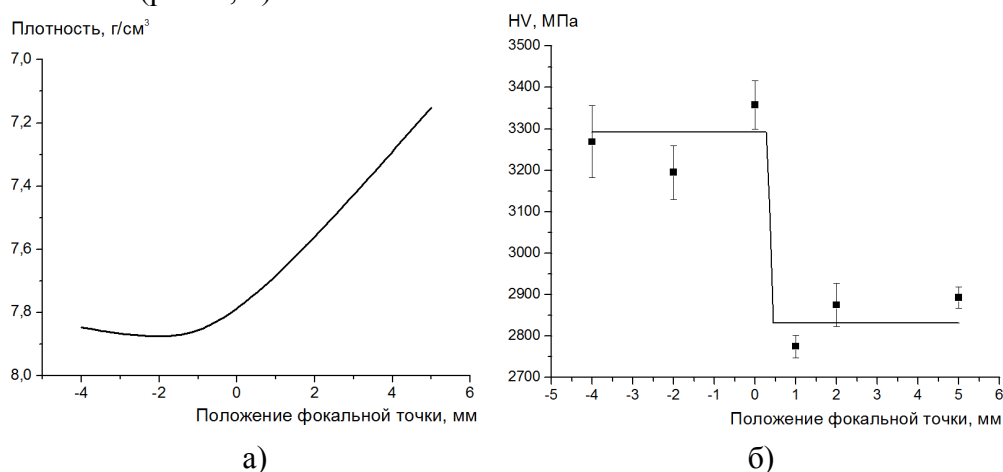


Рис. 2 – Влияние положения фокальной точки на:
а) - плотности образцов б) - микротвердости образцов

На рис. 2, б показана зависимость микротвердости образцов от положения фокуса. Точками отмечены измеренные значения микротвердости образцов, линия – аппроксимация экспериментальных данных по функции Больцмана с использованием компьютерной

программы Origin. Наблюдается скачкообразное изменение микротвердости при смене схемы лазерной обработки. При плавлении гранул сходящимся лазерным пучком формируется структура с высокой плотностью и микротвердостью на 400...500 МПа выше, чем при плавлении гранул расходящимся пучком.

При фокусировании лазерного излучения над обрабатываемой поверхностью или под ней, происходят разные механизмы формирования перекристаллизованного слоя. В случае обработки поверхности сходящимся пучком излучения в верхних частях гранул плотность мощности меньше, чем в нижних. В результате происходит последовательная кристаллизация расплава. Создаются условия для формирования плотной беспористой структуры с высокой твердостью. Обратная ситуация наблюдается в случае обработки поверхности расходящимся пучком. Изображения структуры образцов при разном положении фокальной точки приведены на рисунке 3. Размеры пор представлены в таблице 2.

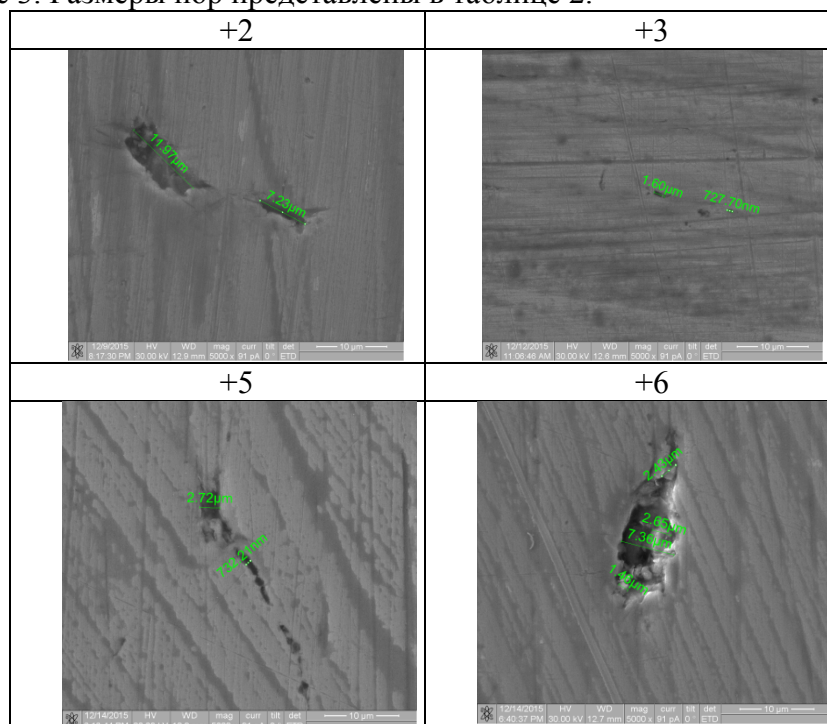


Рис. 3 – Оптические изображения среза объемного образца, синтезированного из порошка CL 20ES при разном положении фокальной точки

Таблица 2 – Размеры пор в образцах, полученных при разном положении фокальной точки

Положение фокальной точки	Размер пор, мкм	
	минимальный	максимальный
+2	7,23	11,97
+3	0,72	1,6
+5	0,73	2,72
+6	1,46	7,36

Плотность мощности на выступающих частях гранул больше, чем на впадинах. Верхняя часть слоя порошка начинает плавиться и кристаллизоваться раньше, чем нижняя часть. В результате формируется пористый материал с низкой твердостью. Технологические параметры селективного лазерного плавления имеют важное значение для получения качественных изделий с высокой плотностью, низкой пористостью и твердостью. При изготовлении образцов из коррозионностойкой стали CL20ES наилучшие значения плотности, пористости и микротвердости получены при перекристаллизации слоя порошка сходящимся пучком лазерного излучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации владимирской области в рамках научного проекта 16-48-330031 р_а.

Список литературы

1. *E. C. Hussam, C. Bruno, S. Branchu, H. Xiaowei, J. Y. Hasco, R. Guille* Direct Laser Fabrication process with coaxial powder projection of 316L steel. Geometrical characteristics and microstructure characterization of wall structures. Optics and Lasers in Engineering, 2012, (50), 1779 – 1784.
2. *K. Guan, Z. Wang, M. Gao, X. Li, X. Zeng* Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel // Materials & Design. 2013. (50). 581-586.
3. *C. Hauser* Selective laser sintering of a stainless steel powder: diss. University of Leeds, 2003. 279 p.
4. *K. Kempen, L. Thijs, B. Vrancken, S. Bols, J. Van Humbeeck, J.-P. Kruth*. Producing crack-free, high density M2 HSS parts by selective laser melting: pre-heating the baseplate // Proceedings of the 24th international solid freeform fabrication symposium. Laboratory for freeform fabrication, Austin. 2013. 131-139.
5. *E. Bashkirov, K. Khorkov, D. Kochuev, A. Zhdanov, S. Arakelyan*, Fundamental Research, 3(2017)
6. *F. Xie, X. He, S. Cao, X. Qu*, (2013). Structural and mechanical characteristics of porous 316L stainless steel fabricated by indirect selective laser sintering. Journal of Materials Processing Technology. 213. 838–843.

05.02.02

М.Г. Маликов, Л.В. Беляев к.т.н., А.В. Жданов к.т.н.

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых,
Владимир

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-60-63

В статье рассмотрены конструкции существующих электроприводов стрелочных переводов, приведена их классификация. Проанализированы их преимущества и недостатки. Предложена конструкция электромеханического привода стрелочного перевода для высокоскоростных железнодорожных магистралей на базе асинхронного электродвигателя и роliko-винтового механизма.

Ключевые слова: стрелочный перевод, электромеханический привод, роliko-винтовой механизм.

В настоящее время на железных дорогах ОАО «РЖД» эксплуатируется примерно 165000 комплектов стрелочных переводов (СП) различных типов и марок. Для перевода стрелок из одного положения в другое на СП устанавливаются различные электроприводы (рис. 1). Количество приводов на одном конкретном СП может варьироваться исходя из собственных характеристик, а также в зависимости от назначения, классификации СП и условий его эксплуатации.

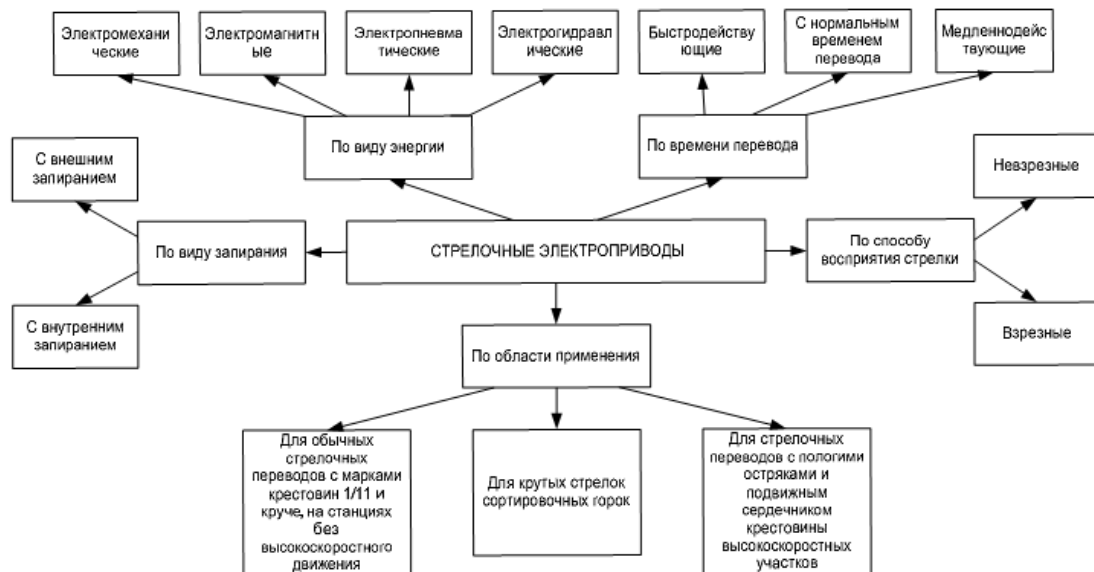


Рис. 1 – Классификация стрелочных электроприводов

Номенклатура электромеханических СП насчитывает более 100 видов. Несмотря на это многообразие конструкций электромеханических СП их структурные схемы идентичны. Это объясняется тем, что любое устройство, осуществляющее перевод стрелочных острий, должно соответствовать требованиям «Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» [1]. Типовая структурная схема стрелочного электропривода (рис.2) содержит реверсивный электродвигатель Д; фрикционный механизм Ф, обеспечивающий ограничение вращательного момента на валу электродвигателя Д во избежание отжима рамного рельса острием при попадании между ними постороннего предмета и перегрузки двигателя, а также компенсацию инерции движения связанных с электродвигателем Д

элементов редуктора в момент перевода стрелки; редуктор Р, являющийся преобразователем вращательного движения электродвигателя Д в поступательное движение рабочих тяг гарнитуры, связанных с острьями стрелки; главный вал Г, передающий переводное усилие от редуктора Р к последующим каскадам силовой передачи; взрезное устройство В, предотвращающее поломку стрелочных электроприводов при взрезе стрелки; запирающий механизм З, обеспечивающий запираение острьяков в их крайнем положении; контрольное устройство К (автопереключатель), осуществляющее электрический контроль работы стрелочных электроприводов во всех режимах; рабочие шиберы Ш, перемещающие остряки стрелки из одного крайнего положения в другое; контрольные линейки Л, связанные с острьяками для управления контактами автопереключателя.

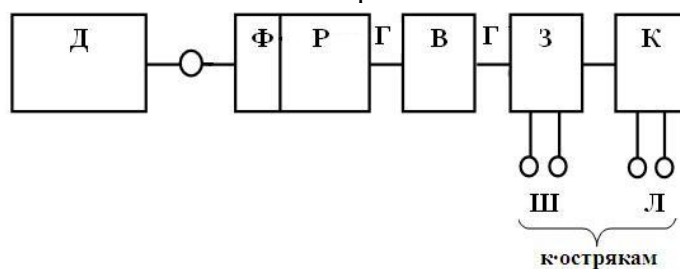


Рис. 2 – Типовая структурная схема стрелочного электропривода

Наиболее распространенными типами электроприводов, осуществляющими перемещение подвижных элементов СП являются устаревшие СП6 и СП12 различных модификаций. Для стрелочных переводов подгорочных путей используются электроприводы СПГ [2] аналогичного устройства.

Стрелочные электропривода, построенные по типовой структурной схеме имеют следующие недостатки: конструкции отличаются сложной механической частью; крупные габаритные размеры – неудобность монтажа/демонтажа привода; наличие фрикционного элемента; редуктора с большим передаточным числом и малая точность позиционирования; устройство внутреннего замыкания и сложная конструкция защиты от взреза; размещение привода сбоку от пути и недостаточная надёжность электрической системы управления.

Указанные типы приводов, применяемые в настоящее время, из-за их недостатков не могут быть использованы для движения высокоскоростных поездов на безопасном уровне. Усовершенствовать серийные технические средства стрелочных переводов практически не удастся, так как запас совершенствования их конструктивных возможностей практически исчерпан [3]. Поэтому возникла необходимость создания нового поколения электромеханических приводов для осуществления перевода стрелок высокоскоростных железнодорожных магистралей. Разработанная конструкция электромеханического привода СП на базе роliko-винтового механизма (РВМ) [4] (рис. 3) содержит: корпус (1), электродвигатель (2), шестерни (3 и 6), винт РВМ (4), гайку РВМ (5), рабочий орган (7), датчик Холла (8), блок управления (9), и силовой блок (10).

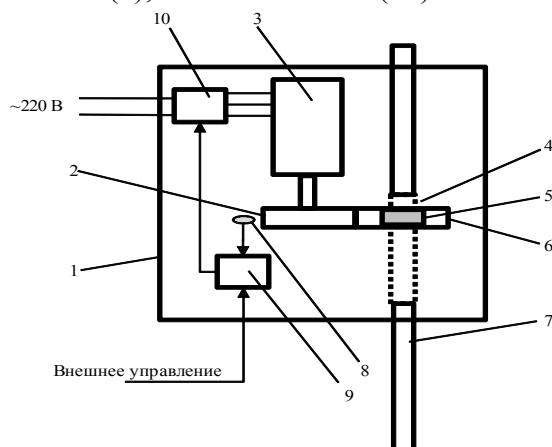


Рис. 3 – Принципиальная схема, разработанного электромеханического привода стрелочного перевода на базе асинхронного двигателя и РВМ

Система управления электродвигателем имеет два замкнутых контура: один по скорости вращения, другой по перемещению рабочего органа (рис. 4). В обоих контурах используется один датчик Холла, расположенный напротив зубьев первой шестерни. Частота импульсов, снимаемых с датчика пропорциональна частоте вращения ротора электродвигателя, а число импульсов – пропорционально перемещению рабочего органа.

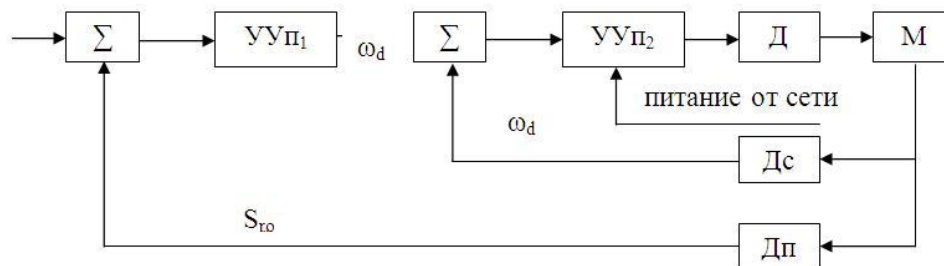


Рис. 4 – Схема системы управления электродвигателем привода: УУП₁ – усилитель; УУП₂ – преобразователь; Д – двигатель; М – механизм привода; Дс – датчик скорости; Дп – датчик положения рабочего органа

Использование асинхронного двигателя позволяет исключить из конструкции фрикционный элемент. Управление приводом осуществляется с помощью инвертора с частотным регулированием и микропроцессорным управлением, и позволяет использовать двухпроводную систему питания. Также инвертор можно настроить на любое питающее напряжение, в результате чего появляется возможность использования ранее заложенной системы подвода электрического питания. Заложенная в приводе система управления позволяет программным путём обеспечивать любое заданное перемещение рабочего органа, за счёт чего привод может устанавливаться в любой точке по всей длине стрелочного перевода. Для контроля перемещения рабочего органа используется датчик Холла, установленный в корпусе редуктора напротив первой шестерни.

Установка привода в междурельсовом пространстве обеспечивается возможностью перемещения рабочего органа в обоих направлениях. Такое перемещение рабочего органа стало возможным за счёт компоновки привода, в котором вращательные движения главного вала привода, на конце которого установлено цилиндрическое зубчатое колесо, передаётся на второе зубчатое колесо, внутри которого установлена роliko-винтовая пара. Механическое внутреннее запираение привода осуществляется за счёт использования роliko-винтовой пары с определённым углом подъёма витков резьбы.

Для предотвращения смещения механизма винтовой пары в осевом направлении относительно его начального положения, по краям внутреннего диаметра второй шестерни растачивается канавка, внутрь которой устанавливаются разрезные стопорные кольца, которые в свою очередь закрываются резьбовыми втулками, контактирующими со стопорными кольцами, сточенными под определённым углом поверхностью, что одновременно является защитным механизмом от взреза. Плотное прилегание прижатого острья к рамному рельсу обеспечивается установкой по длине стрелочного перевода двух или более приводов, с последующей синхронизацией их перемещений.

Текущий контроль прижатия осуществляется при помощи датчиков линейных перемещений, установленных между каждым острым и рамным рельсом. Сигнал с датчиков передаётся к микроконтроллеру и программно в нём обрабатывается, после чего передаётся на пульт диспетчера, в виде сообщения о готовности или неготовности участка пути к прохождению состава.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта № 17 17-20-03084.

Список литературы

1. «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» Приказ Минтранса РФ от 21 декабря 2010 г. N 286. – URL: <http://base.garant.ru/55170488/> (дата обращения: 02.10.2017).
2. Матвеева О.Л. электроприводы для железнодорожных стрелочных переводов // Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: сб. ст. по мат. VII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 7. URL: <http://sibac.info/archive/technic/7.pdf> (дата обращения: 02.10.2017).
3. Меньшиков И.А. Повышение безопасности движения поездов с помощью эффективных методов контроля СП // Мат.3-й научно-практической конф. «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство» 4-6.03.2010 г., М.: ВНИИЖТ. – С. 168-174.
4. Морозов В.В. РВМ. Кинематические характеристики: монография / В.В.Морозов; Владим. гос. ун-т – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. – 78 с.

05.02.11

В.И. Митряйкин, И.Н. Сидоров, Е.В. Кротова, Т.А. Зайцева

Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева,
Казань, vmitryakin@bk.ru, Sidorovin@mail.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛОПАСТИ ВИНТА ВЕРТОЛЕТА С УДАРНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-64-67

В статье представлены результаты исследования на рентгеновском компьютерном томографе повреждений возникающих в лопасти несущего винта вертолета “Ансат” при ударных воздействиях. Анализ полученных томограмм позволил определить размеры повреждений. Приведены результаты расчета напряженно-деформированного и предельного состояния лопасти при различных режимах полета с учетом повреждения лопасти в комлевом сечении.

Ключевые слова: композитная лопасть несущего винта вертолета, рентгеновский компьютерный томограф, ударные повреждения, теория предельного равновесия, метод вариации упругих постоянных.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются в современной авиационно-космической технике. Из таких материалов изготовлены лопасти несущего винта (НВ) и рулевого винта (РВ) вертолета «Ансат». Конструкции из ПКМ чувствительны к ударным повреждениям [1]. При взлете и посадке вертолета на неподготовленных площадках воздушный поток, генерируемый винтами, сообщает кинетическую энергию твердым предметам (камням, гравию, щебенке и т.п.), которые могут нанести удар по элементам конструкции вертолета. Ударные повреждения запускают процесс расслоения ПКМ, что приводит к снижению несущей способности конструкций. В зависимости от условий работы, размеров и расположения повреждений, они могут быть допустимыми или недопустимыми. Проблема браковки таких конструкций весьма сложна, для ее оптимального решения необходимы современные средства неразрушающего контроля, сложные расчеты и натурные испытания изделий с различными дефектами.

В работе для оценки размеров ударных повреждений используется рентгеновская компьютерная томография [2],[3]. Для оценки прочности конструкций с повреждениями используется метод вариации упругих постоянных, основанный на теории предельного равновесия, позволяющий получить одновременно верхнюю и нижнюю границу предельной нагрузки. В качестве объекта исследования выбрана лопасть НВ вертолета «Ансат». Исследуемая лопасть НВ крепится к торсиону (рис.1.а), и в комлевом сечении (рис.1.б) состоит из двух основных элементов: лонжерона и хвостового отсека, наружные обводы которых соответствуют аэродинамическому профилю NASA-23012. Материал лопасти – многослойный стеклопластик Т-25(ВМ). Лонжерон в поперечном сечении представляет собой многослойную профилированную трубу. Наружная поверхность носовой части лонжерона покрыта слоем резины, поверх которого установлена защитная стальная оковка. Хвостовой отсек состоит из верхней и нижней многослойных обшивок, сотового заполнителя, подкрепляющего обшивки и хвостового стрингера. Соединение всех элементов выполнено склеиванием.

Авторами были проведены исследования по оценке повреждений, возникающих в хвостовом отсеке лопасти при ударных воздействиях. Целью таких экспериментов было изучение характера повреждений, определение взаимосвязи между их размером и энергией удара, установление границ надежного обнаружения размеров повреждений при визуальном и неразрушающем контроле.

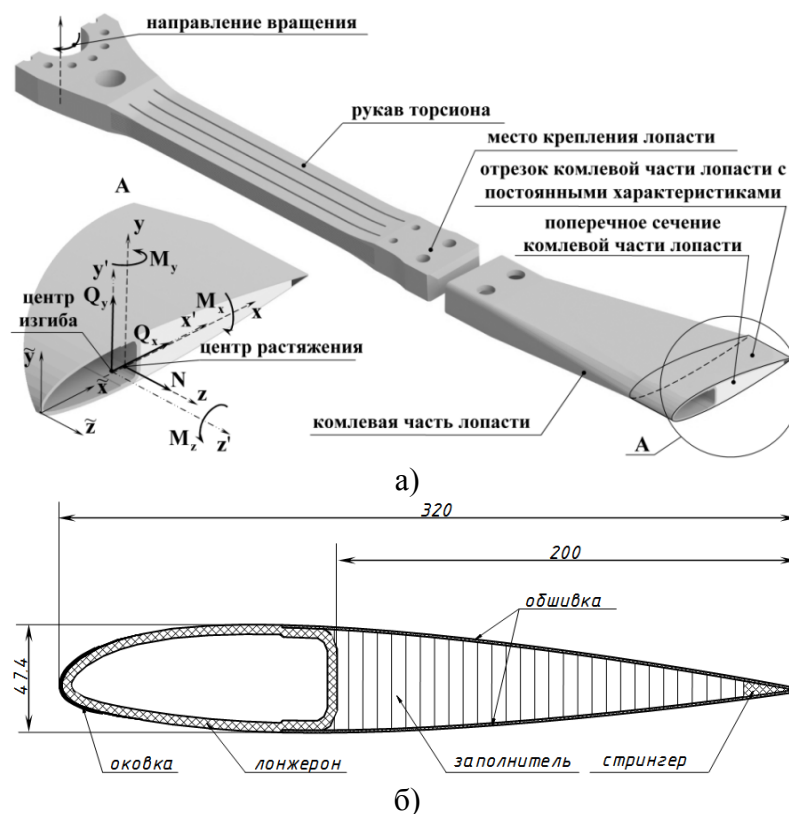


Рис.1–Схема лопасти НВ

Эксперименты проводились на маятниковом копре марки “МК-30А”. Нагружение проводилось ступенчато, путем сбрасывания маятника с различной высоты, при этом воспроизводились удары с энергией $4 \div 30$ Дж. Удары наносились под прямым углом к поверхности лопасти. Ударник представлял собой боек со сферической головкой диаметром 32мм. При энергии удара < 5 Дж, повреждения образца были незначительными, при увеличении энергии удара наблюдался их рост. Характер повреждения лопасти при энергии удара 30 Дж показан на рис.2.



Рис.2- Характер повреждений при ударе

Визуально наблюдается вмятина глубиной 4,3 мм. Имеются участки посветления стеклопластика, что говорит о его расслоении. Кроме того, происходил разрыв волокон в направлении от центра удара.

Для внутренней диагностики поврежденных образцов использовался медицинский рентгеновский томограф фирмы “Siemens”. Эти томографы за несколько секунд обнаруживают послойную визуализацию значительной области исследуемой конструкции. Длина поля сканирования составляет 700мм, а время сканирования 60-100 с. В зависимости от размеров дефекта можно задавать различные интервалы между сечениями от 0,5 до 10 мм. Томограммы сечений лопасти в зоне наибольшего повреждения показаны на рис.3.

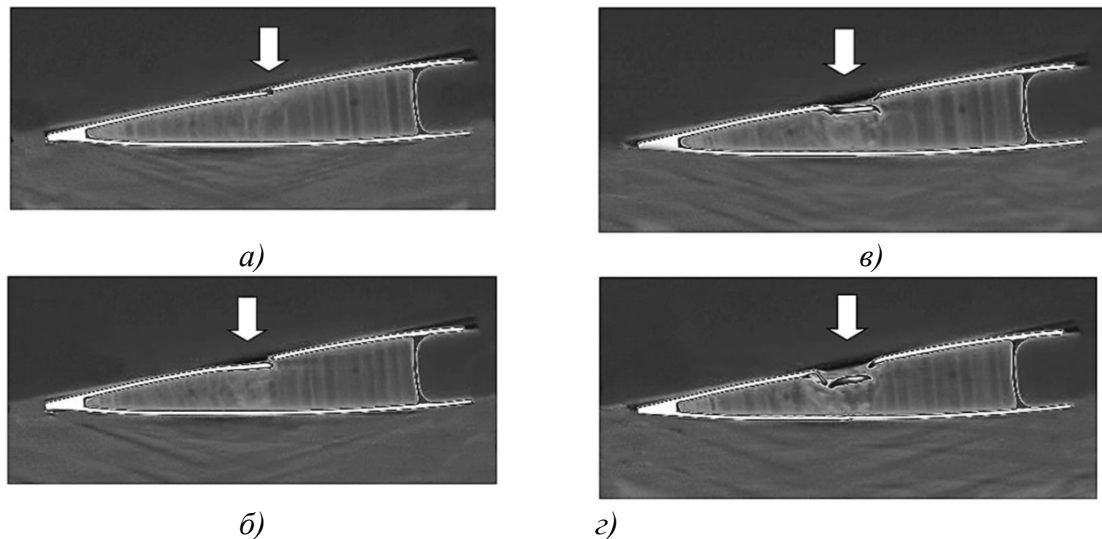


Рис.3-Томограмма исследуемого сечения в зоне ударного повреждения (шаг 4 мм)

Цвет на томограммах соответствует определенным значениям коэффициента ослабления рентгеновского излучения. В первом сечении виден разрыв верхнего слоя стеклопластика. В последующем этот разрыв увеличивается и край стеклоткани сдавливает соты. Затем наблюдается участок, оторванный с двух сторон. Максимальное повреждение показано на рис.3.г. Верхний участок стеклопластика в зоне удара разрушился и сдавил сотовый наполнитель, в результате получено повреждение нижнего слоя стеклопластика. Эти результаты можно использовать для отработки методики ремонта таких конструкций и расчетах для оценки несущей способности лопасти с таким повреждением.

Согласно алгоритму, предложенному в работе [4], в расчетах реальная лопасть заменялась аналогом, состоящим из участков. На рис. 4 точками показаны границы участков, цифрами – номера участков.

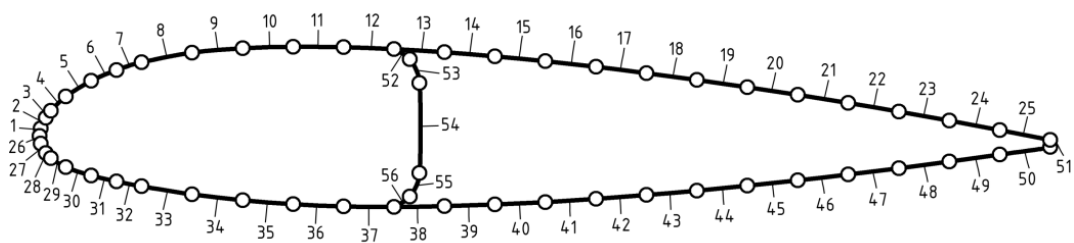


Рис.4-Границы и номера исследуемых участков лопасти НВ

Повреждения моделировались отверстиями в виде полос по всей длине участка поперечного сечения комлевой части лопасти с постоянными характеристиками (см. рис. 1.а). При этом в сечении лопасти

(рис.1.б) на участке, соответствующем этой полосе, пределы прочности слоев пакета уменьшались на шесть порядков по сравнению с соответствующими параметрами неповрежденных участков.

В алгоритме, предложенном в работе [4], предельный вектор напряжений в слоях пакета определяется согласно закону деформирования, ассоциированному предельной поверхности текучести этих слоев. При этом вектор напряжений выражается через шестимерный вектор обобщенных усилий и анализ предельного состояния по напряжениям, сводится к анализу предельного состояния в пространстве обобщенных усилий.

В таблице 1 представлено распределение запаса статической прочности лопасти $t_{\text{ст}}^P$ в комлевом сечении без повреждения в зависимости от азимута Ψ на основе данных о нагрузках для крейсерской скорости полета. Положительные направления нагрузок и точки их приложения показаны на рис.1).

Таблица 1

Скорость полета, км/ч	Ψ , град	Q_x , Н	Q_y , Н	N , Н	M_x , Н·м	M_y , Н·м	M_z , Н·м	t^p
220	0	2183,63	-2596,48	157603,00	152,26	1164,03	-4,72	6,76
	30	2632,10	-2069,31	157637,00	145,17	1281,46	4,12	6,80
	60	3182,58	-714,42	158618,00	88,39	1405,61	27,85	6,77
	90	3109,33	770,88	159182,00	1,04	1492,71	49,33	6,74
	120	2979,02	2147,53	158734,00	-116,36	1406,63	40,97	6,74
	150	2503,44	3140,15	157371,00	-210,28	1215,18	36,42	6,32
	180	1296,45	3421,19	155711,00	-261,28	982,56	48,02	6,00
	210	690,17	2970,70	154642,00	-242,02	684,93	84,26	6,65
	240	268,27	1901,54	154872,00	-177,21	499,54	103,21	6,91
	270	-35,56	378,22	156354,00	-68,22	581,38	80,43	6,88
	300	886,74	-1020,64	158058,00	42,41	773,04	45,24	6,80
	330	1877,55	-2130,26	158427,00	115,29	989,98	-5,74	6,76

Анализ результатов расчетов показывает, что наличие повреждения в хвостовой части лопасти на участках (18,19) снижает прочность лопасти в комлевом сечении на 16,7 % на скорости 220 км/ч. В целом запас прочности значительно снижается (более чем на 35%) при наличии повреждений одновременно в лонжероне и хвостовой части. Кроме этого изменяются опасные положения лопасти по азимуту в зависимости от места повреждения.

Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ, проекта № 108-00416.

Список литературы

1. Фегенбаум Ю., Дубинский С. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2013. – С.83 – 90.
2. Митряйкин В.И., Павлова Н.В., Лустин А.Д. Диагностика ударных повреждений лопастей вертолета на компьютерном томографе // Инновационные подходы в современной науке. – 2017. – № 2(2). – С.33–40.
3. Митряйкин В.И., Зайцева Т.А., Е.В. Кротова Диагностика состояния композитных элементов конструкций на спиральном компьютерном томографе // Материалы докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 13 – 15 сентября 2016 г. – Казань: КазНЦ РАН, 2016. – 393с. с.272-273.
4. А.В.Горелов., Е.И.Николаев., И.Н.Сидоров. Расчет коэффициента запаса статической прочности по теории предельного равновесия композитной лопасти несущего винта вертолета, имеющей повреждения. // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2016. – № 3. – С.13–199.

05.02.00

¹Е.В. Пояркова д.т.н., ²Л.С. Диньмухаметова к.т.н., ³А.А. Грехов¹Оренбургский государственный университет,
кафедра машиноведения,²Самарский государственный университет путей сообщения (филиал в г. Орске),³Оренбургский институт путей сообщения – филиал Самарского государственного
университета путей сообщения,

Оренбург, yarko.e@mail.ru, michmen08@yandex.ru, aa.grexov@mail.ru

**АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ
МАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ****DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-68-70**

В работе представлены результаты анализа изменения показателей напряженности магнитного поля в различных точках комбинированных сварных соединений сталей 09Г2ФБ и 17Г1СУ в зависимости от степени накопления малоциклового усталостной повреждаемости. Показано, что при диагностике разнородных сварных соединений недопустимо использование известных ранее закономерностей для оценки напряженно-деформированного состояния и степени усталости материала по изменению магнитных свойств. Обоснована возможность идентификации зоны предразрушения в конкретных линейных областях разнородных сварных элементов по результатам анализа изменения анизотропии напряженности магнитного поля с увеличением уровня накопления повреждений.

Ключевые слова: магнитный неразрушающий контроль, напряженность магнитного поля, малоцикловая усталость, диагностика, комбинированные сварные элементы.

При проведении ремонтно-восстановительных работ на крупно-габаритных стальных оболочковых конструкциях, выявленный дефектный участок или отказавший элемент, как правило, заменяют или усиливают фрагментом из стали аналогичной марки, но имеющей вместе с тем отличные физико-механические свойства. В дальнейшем при диагностике технического состояния подобных комбинированных сварных соединений магнитными методами контроля встает вопрос об адекватности её результатов. Это связано с изменением магнитных характеристик вблизи границы сплавления неоднородных материалов, что затрудняет идентификацию состояния материала с использованием общепринятых ранее научно-обоснованных зависимостей.

Целью настоящей работы является анализ информативности изменения магнитных характеристик комбинированных сварных элементов в условиях малоциклового усталости как диагностических параметров при оценке текущего состояния сварной металлоконструкции.

Интерпретации результатов измерений магнитных величин для оценки состояния различных ферромагнитных материалов и их комбинаций посвящено большое число научных работ. К примеру, в работе [1, 2] обоснована возможность анализа характера структурно-механической неоднородности сварных соединений по результатам замеров магнитных и микромагнитных величин. Авторами [3–6] обнаружена корреляционная связь между анизотропией магнитных характеристик и анизотропией прочностных свойств трубных сталей повышенных классов прочности (в том числе и в сварных соединениях). Выявленная корреляция позволяет устанавливать величины внутренних микронапряжений и упругих действующих напряжений в металле при внешнем нагружении [4–6], а также давать оценку его адаптивным свойствам [3]. Однако, как отмечено ранее, распространение результатов этих работ на оценку состояния комбинированных сварных элементов

конструкций вызывает затруднение. Научной новизной настоящей работы является обоснование объективной возможности идентификации текущего состояния комбинированных сварных элементов в условиях малоциклового усталости по результатам анализа изменения характеристик напряженности магнитного поля.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе исследован характер изменения нормальной H_n и тангенциальной H_t составляющих напряженности магнитного поля в различных точках сварных соединений сталей повышенной прочности 17Г1СУ и 09Г2ФБ при малоциклового усталости. В качестве контрольных образцов использованы сварные соединения с Х-образным швом посередине, изготовленные из листового проката. Замеры для достоверности проводились на 10 одинаковых образцах в соответствии с представленной на рисунке 1 схемой (точки 1-4 соответствовали стали 09Г2ФБ, 7-8 – центру шва, 11-14 – стали 17Г1СУ). Использовался прибор магнитоизмерительный феррозондовый комбинированный Ф-205.30А МКИЯ 427633.001. При измерениях H_n датчик располагался перпендикулярно сварному шву, при измерениях H_t – параллельно. Циклические испытания проводились в два этапа. На первом этапе определено число разрушающих циклов N_p (в среднем оно составило 2500), на втором – проводились собственно магнитные измерения у образцов, испытавших 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 доли N_p , в контрольных точках.

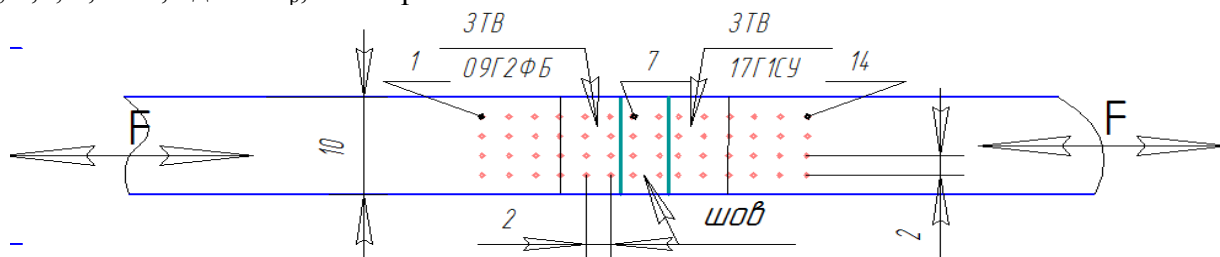


Рис. 1 – Схема замеров H_n и H_t (F – направление испытательной нагрузки)

По результатам регистрации показаний составляющих вектора напряженности магнитного поля в контрольных точках образцов с различной степенью усталостной поврежденности, представленным на рисунке 2, установлен сложный характер изменения магнитных свойств совместно деформируемых участков металла с различным исходным структурно-механическим состоянием. Так, величина H_n образцов в исходном состоянии монотонно снижается от максимума в более прочном металле (09Г2ФБ) до минимума в менее прочном (17Г1СУ). На начальном этапе циклирования характер ее изменения в направлении «основа 09Г2ФБ – основа 17Г1СУ» кардинальным образом меняется, тогда как дальнейшие нагружения возвращают H_n в состояние близкое исходному. При уровне накопленных повреждений $0,8N_i/N_p$ существенно снижается H_n в зоне термического влияния (ЗТВ) более прочного металла.

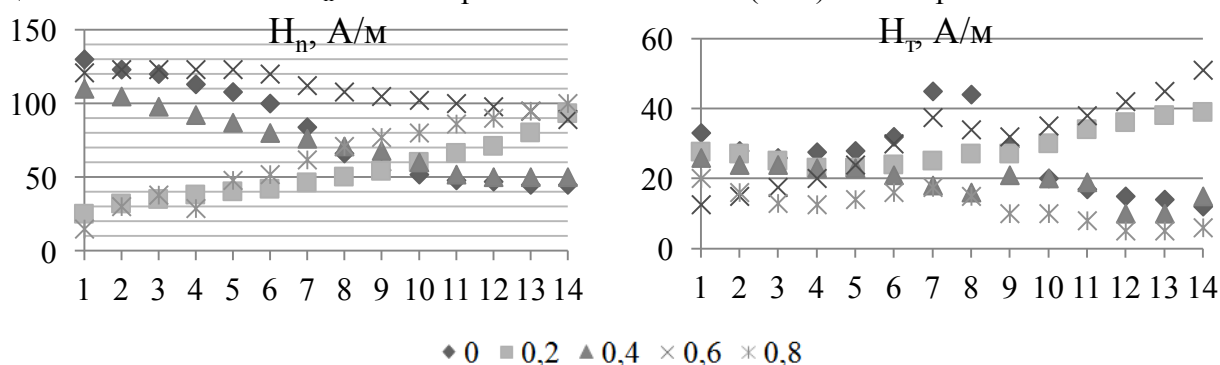


Рис. 2 – Изменение H_n и H_t в контрольных образцах в направлении «основа 09Г2ФБ – основа 17Г1СУ» при различных уровнях N_i/N_p

Аналогичным образом изменяется и скалярная величина полного вектора и анизотропии напряженности магнитного поля ($\Delta = H_n - H_t$). Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля H_t по сечению образцов в исходном состоянии имеет максимум в металле шва; вместе с тем, по мере нагружения наблюдается снижение ее градиента.

Установленный характер изменения показателей напряженности магнитного поля материала комбинированных сварных соединений опровергает приемлемость выявленных закономерностей изменения магнитных свойств, обоснованных в перечисленных ранее работах, для диагностики конструкций.

Несмотря на обнаруженную сложность поведения магнитных характеристик в различных локальных областях комбинированных элементов, удалось установить закономерность изменения показателей напряженности магнитного поля для граничной области сварных соединений «основа 17Г1СУ – ЗТВ» на стадии предразрушения материала. «Опасность» этой зоны была также выявлена ранее по результатам первого этапа циклических испытаний.

Так, представленные на рисунке 3 данные свидетельствуют, что в локальной линейной области материала, очерчиваемой точками 10, 11, 12, возможно установление линейной трендовой зависимости изменения анизотропии и нормальной составляющей напряженности магнитного поля по мере накопления усталостных повреждений с достаточной достоверностью ($R^2 = 0,83-0,86$).

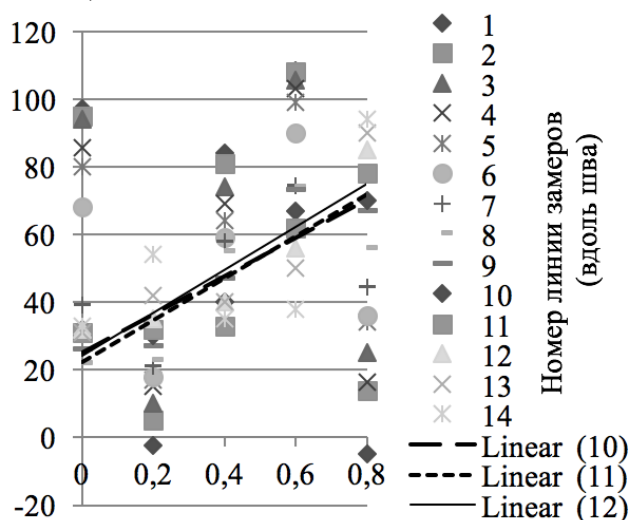


Рис. 3 – Изменение анизотропии напряженности магнитного поля (А/м) по мере накопления усталостных повреждений

Список литературы

1. Gorkunov, E.S. Determination of the magnetic properties of separate zones of welds and the width of welded joints based on magnetic measurements / E.S. Gorkunov, A.M. Povolotskaya, E.A. Tueva, L.S. Goruleva, S.M. Zadvorkin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Т. 47. – № 9. – С. 577-586.
2. Горкунов, Э.С. Влияние структурных особенностей сварных соединений низколегированных сталей на магнитные и микромагнитные свойства / Э.С. Горкунов, С.Ю. Митропольская, К.Е. Соловьев, Е.А. Туева // Дефектоскопия. – 2009. – №12. – С. 70-82.
3. Кузеев, И.Р., Оценка адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик для определения ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования / И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, О.Г. Кондрашова // Нефтегазовое дело. – Уфа. – 2006. – Т.1. – №4. – С. 124-133.
4. Горкунов, Э.С. Влияние структуры и напряженного состояния на магнитные свойства металла в различных зонах сварных труб большого диаметра / Э.С. Горкунов, С. М. Задворкин, Е. А. Путилова, Р. А. Саврай // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115. – № 10. – С. 1011–1018.
5. Пояркова, Е.В. Эволюция структурно-механической неоднородности материалов сварных элементов конструкций в рамках концепции иерархического согласования масштабов : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.16.09 / Е.В. Пояркова. – Уфа : УГНТУ. – 2015. – 392 с.
6. Агинеи, Р.В. Разработка методики оценки напряженного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла: автореф. ... дисс. канд. техн. наук : 25.00.19 / Р.В. Агинеи. – Ухта : УГТУ. – 2005. – 24 с.

05.02.00

И.М. Пышный к.т.н.

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург. igorkz45@mail.ru

ВЫБОР ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ БАНДАЖА ИСХОДЯ ИЗ КРИТЕРИЯ МАКСИМАЛЬНОГО РЕСУРСА ПО ПРОКАТУ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-71-74

В статье приводится сравнительный анализ изнашивания бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 промышленного предприятия ЗАО «Железнодорожник» на основе методов теории вероятности и математической статистики исходя из критерия максимального ресурса бандажей колесных пар до обточки.

Ключевые слова: *промышленные локомотивы, колесные пары, прокат, износ бандажей, повышение ресурса.*

Бандажи колесных пар являются наиболее ответственным узлом локомотива, износ которых представляет собой сложный процесс взаимодействия системы «колесо–рельс» определяющийся многими факторами. Оценка состояния интенсивности изнашивания в системе взаимодействия «колесо–рельс» ряда промышленных предприятий очень высока. Имеет место высокий процент обточек бандажей колесных пар по тонкому гребню. Этим диктуется актуальность работы, которая определяется большими эксплуатационными расходами, связанными с износом гребней бандажей колесных пар промышленного железнодорожного транспорта и как следствие внутренней грани поверхности рельса. Так как железнодорожным цехам промышленных предприятий выделяются малые средства финансирования, любые проекты по улучшению качества работы подвижного состава практически не финансируются. Поэтому необходимо искать способы повышения ресурса ходовых частей локомотивов, исходя из критерия минимальных вложений с высокой отдачей [1].

Срок службы бандажей при прочих равных условиях во многом зависит от формы профиля поверхности катания. В ЗАО «Железнодорожник» колесные пары тепловозов обтачивались по двум профилям поверхности катания: ДМетИ типа ЛР (локомотивный, ремонтный) и по ГОСТ 11018–2011, чер. 2.

Для определения наилучшего профиля бандажей колесных пар промышленных тепловозов в двух локомотивных депо Пермские моторы и Мотовилиха приписки ЗАО «Железнодорожник» был собран статистический материал на основе измерения контролируемых параметров (прокат и толщина гребня) колесных пар 814 тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 (из них ТГМ4 – 219 и ТГМ23 – 595) и выполнен сравнительный анализ изнашивания бандажей колесных пар.

Замеры производились на плановых осмотрах ТО-3 и ремонтах ТР-1 с помощью электронного малогабаритного переносного прибора КИП-05 [2] разработанного в УрГУПС и предназначенного для автоматического измерения параметров бандажей колесных пар локомотивов. Относительная погрешность прибора КИП-05 не превышает 2 %. По книгам ремонта и формам ТХО-5 для каждого значения был определен пробег от момента восстановления бандажа до замера.

На процесс изнашивания бандажей воздействует большое количество случайных факторов и выделить преобладающий – невозможно, каждый из них оказывает приблизительно одинаковое влияние, поэтому их контролируемые параметры при фиксированном значении пробега распределяются по нормальному закону [3].

Завышение или занижение контролируемого параметра искажают зависимость его от пробега, так как скачкообразные изменения параметра, являясь внезапными отказами, нарушают процесс естественного износа. Поэтому, чтобы избежать искажений, необходимо исключить из общего числа исходных данных значения, которые резко отличаются от основной совокупности. Чтобы не отбросить вполне закономерные значения, а исключить именно те, которые имеют случайный характер, применяется критерий «грубых ошибок» [4].

Границы, в свою очередь, выбираются так, чтобы вероятность превзойти их отвечала некоторому уровню значимости q %, т.е. вероятность того, что отброшенное число принадлежит данной совокупности, равна q %, а вероятность противоположной гипотезы о том, что отбрасываемое число случайно в данной выборке, $\beta = 1 - q$.

При $q = 0,3$ %, вероятность $\beta = 99,7$ %, что для практических расчетов обеспечивает необходимую точность.

Критические границы определяются по правилу $3 \cdot \sigma$, т.е. отрезок $m_i + 3 \cdot \sigma_i$ считается участком практически возможных значений параметра.

Среднее значение контролируемого параметра X в i -ом сечении

$$m_i = 1 / N_i \sum_{j=1}^{N_i} X_{ij}, \quad (1)$$

где N_i – число значений контролируемого параметра на замер с данным номером i (в i -ом сечении); X_i – контролируемый параметр в i -ом сечении.

Среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра

$$\sigma_i = \sqrt{D_i} = \sqrt{1 / N_i \sum_{j=1}^{N_i} (X_{ij} - m_i)^2}, \quad (2)$$

где m_i – среднее значение контролируемого параметра X в i -ом сечении.

Исследованиями было доказано, что контролируемые параметры бандажей колесных пар локомотивов хорошо описываются нормальным законом [5], плотность распределения которого

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - M_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (3)$$

где M_x – математическое ожидание контролируемого параметра; σ_x – среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра;

X – текущее значение контролируемого параметра.

Результаты расчетов числовых характеристик M_x и σ_x нормального закона распределения контролируемых параметров (по прокату) тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 в ЗАО «Железнодорожник» при всех значениях пробега L_i представлены в таблице 1, где каждому значению пробега соответствуют значения M_x и σ_x , т.е. задаются эмпирические зависимости $M_x^*(L)$ и $\sigma_x^*(L)$. Для того, чтобы осуществлять прогнозирование процесса изнашивания деталей и определить их ресурс, необходимо построить аналитические зависимости числовых характеристик среднего значения M_x и среднеквадратического отклонения σ_x от пробега.

Таблица 1 – Числовые характеристики распределения величины проката бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 депо Пермские моторы

Пробег L , тыс. км	Число данных N	Числовые характеристики	
		среднее значение M_X^* , мм	среднеквадратическое отклонение σ_X^* , мм
Профиль по ГОСТ 11018-2000, черт. 2			
0	178	0,023	0,116
8,752	96	0,429	0,451
12,835	182	0,291	0,379
23,991	228	0,664	0,585
35,414	156	0,814	0,730
45,402	128	1,200	1,886
54,958	64	0,977	0,607
72,127	48	1,197	0,774
Профиль ДМетИ типа ЛР			
0	238	0,002	0,032
6,925	260	0,145	0,305
14,212	144	0,369	0,421
23,906	86	0,493	0,469
32,710	26	0,635	0,501

По значениям числовых характеристик контролируемых параметров и закону распределения можно прогнозировать процесс их изменения при больших значениях пробега с целью определения ресурсов бандажей, для чего определены аналитические зависимости среднего значения M_x и среднеквадратического отклонения σ_x от пробега L .

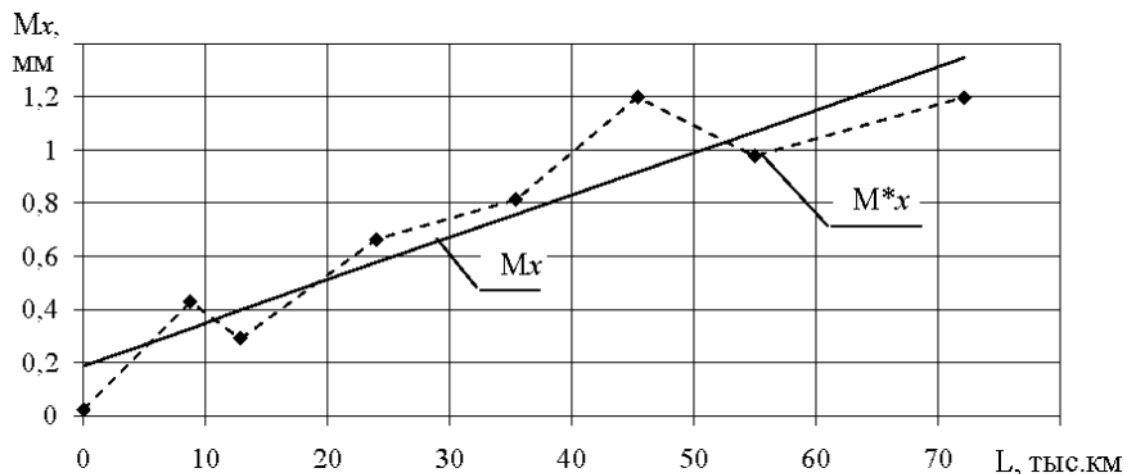


Рис. 1 – Зависимость среднего значения проката бандажей колесных пар от пробега тепловозов ТГМ4 Пермские моторы, обточенных по профилю ДМетИ типа ЛР

На основании выполненных расчетов при помощи специализированных программ STATISTICA и SPSS построены зависимости среднего значения и среднеквадратического отклонения от пробега проката бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 двух локомотивных депо Пермские моторы и Мотовилиха приписки ЗАО «Железнодорожник» представленная на рис. 1.

Таблица 2 – Коэффициенты уравнений регрессии проката бандажей колесных пар тепловозов

Локомотивное депо, серия локомотива	Объем выборки, N	Профиль	Зависимость	Коэффициенты уравнений регрессии, $y = A + BL$		Коэффициент корреляции, $R_{y/l}$	Остаточная дисперсия, S_0^2 , мм ²
				A , мм	B , мм/10 ⁴ км		
Пермские моторы ТГМ4	572	ГОСТ	$M_x(L)$	0,190	0,161	0,868	0,168
			$\sigma_x(L)$	0,384	0,003	0,786	0,068
		ДМетИ	$M_x(L)$	0,027	0,194	0,977	0,045
			$\sigma_x(L)$	0,205	0,008	0,847	0,129
Мотовилиха ТГМ23	480	ГОСТ	$M_x(L)$	0,179	0,351	0,908	0,311
			$\sigma_x(L)$	0,637	0,057	0,953	0,024
		ДМетИ	$M_x(L)$	0,973	0,129	0,796	0,162
			$\sigma_x(L)$	0,924	0,016	0,892	0,023

Значения всех коэффициентов корреляции составляют 0,827–0,982, что свидетельствует об адекватности линейной аппроксимации. Выполненный анализ полученных данных в таблице 2 показал, что интенсивность нарастания проката (естественный износ) бандажей колесных пар, обточенных по профилю ДМетИ типа ЛР в сравнении с профилем обточенных по ГОСТ 11018–2011, черт. 2:

- в депо Пермские моторы, увеличилось с 0,161 до 0,194 мм/10⁴ км,
- в депо Мотовилиха уменьшилась с 0,351 до 0,129 мм/10⁴ км.

Если производить восстановление изношенного бандажа, его замену при наработке (пробеге), не превышающей 98%-ного ресурса ($P = 0,02$), то вероятность отказа бандажа в межремонтном периоде не превысит 2 %.

Список литературы

1. *Пышный И.М.* Повышение ресурса бандажей колёсных пар локомотивов на промышленном железнодорожном транспорте: Дис. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2014. – 144 с.
2. *Пышный И.М.* Продление жизненного цикла ходовых частей локомотивов путем лубрикации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 5. – С. 109–112.
3. *Пышный И.М., Русаков А.Г.* Определение расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов при помощи энергетического паспорта железнодорожного участка пути // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 185–187.
4. *Буйносов А.П., Худояров Д.Л., Пышный И.М.* Выбор профиля поверхности катания бандажей колесных пар промышленных тепловозов // Транспорт Урала. – 2011. – № 1 (28). – С. 64–69.
5. *Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А.* Измерение диаметра бандажей колесных пар тягового подвижного состава // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 22–24.

05.02.00

И.М. Пышный к.т.н., А.Е. Саланов

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, igorkz45@mail.ru

ВЫБОР ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ БАНДАЖА ИСХОДЯ ИЗ КРИТЕРИЯ МАКСИМАЛЬНОГО РЕСУРСА ПО ИЗНОСУ ГРЕБНЯ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-75-78

В статье приводится сравнительный анализ изнашивания бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 промышленного предприятия ЗАО «Железнодорожник» на основе методов теории вероятности и математической статистики исходя из критерия максимального ресурса бандажей колесных пар до обточки.

Ключевые слова: промышленные локомотивы, колесные пары, износ гребня бандажа, повышение ресурса.

На процесс изнашивания бандажей воздействует большое количество случайных факторов: химический состав материала и физические свойства бандажа, качество его изготовления, его прочностные характеристики, климатические и метеорологические условия эксплуатации, нагрузочные режимы и частота их повторяемости (число пусков и остановок, режимы пуска и торможения, продолжительность движения с максимальной нагрузкой и т.д.), температурные условия эксплуатации, степень влажности атмосферы и ее запыленность, насыщенность поверхности трения абразивными частицами, зависящими от интенсивности пескоподдачи, состояние пути и зависящие от него динамические нагрузки, а также многие другие факторы [1]. Исходя из этого, невозможно выделить преобладающий, каждый из перечисленных факторов оказывает приблизительно одинаковое влияние на процесс изнашивания бандажей колесных пар локомотивов, поэтому их контролируемые параметры при фиксированном значении пробега распределяются по нормальному закону [2].

Среднее значение контролируемого параметра X в i -ом сечении

$$m_i = 1 / N_i \sum_{j=1}^{N_i} X_{ij}, \quad (1)$$

где N_i – число значений контролируемого параметра на замер с данным номером i (в i -ом сечении); X_i – контролируемый параметр в i -ом сечении.

Среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра

$$\sigma_i = \sqrt{D_i} = \sqrt{1 / N_i \sum_{j=1}^{N_i} (X_{ij} - m_i)^2}, \quad (2)$$

где m_i – среднее значение контролируемого параметра X в i -ом сечении.

Исследованиями было доказано, что контролируемые параметры бандажей колесных пар локомотивов хорошо описываются нормальным законом, плотность распределения которого

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - M_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (3)$$

где M_x – математическое ожидание контролируемого параметра; σ_x – среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра; X – текущее значение контролируемого параметра [3].

Результаты расчетов числовых характеристик M_x и σ_x нормального закона распределения контролируемых параметров (толщины гребня) тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 в ЗАО «Железнодорожник» при всех значениях пробегов L_i представлены в таблицах 1 и 2, где каждому значению пробега соответствуют значения M_x и σ_x , т.е. задаются эмпирические

зависимости $M_x^*(L)$ и $\sigma_x^*(L)$. Для того, чтобы осуществлять прогнозирование процесса изнашивания деталей и определить их ресурс, необходимо построить аналитические зависимости числовых характеристик среднего значения M_x и среднеквадратического отклонения σ_x от пробега [4].

Таблица 1 – Числовые характеристики распределения износа гребней колесных пар тепловозов ТГМ4 депо Пермские моторы

Пробег L , тыс. км	Число данных N	Числовые характеристики	
		среднее значение M^*_{χ} , мм	среднеквадратическое отклонение σ^*_{χ} , мм
Профиль по ГОСТ 11018-2011, черт. 2			
0	178	2,955	1,683
8,752	86	5,968	1,880
12,835	182	4,250	2,100
23,991	228	4,410	2,170
35,414	156	4,961	1,817
45,402	128	5,485	1,595
54,958	64	6,125	1,288
62,565	64	5,956	1,724
72,128	60	6,312	1,315
Профиль ДМетИ типа ЛР			
0	238	3,612	1,214
1,000	2	3,000	4,000
6,925	260	4,862	1,766
14,212	144	6,159	1,517
23,906	86	7,149	1,453

Таблица 2 – Числовые характеристики распределения величины износа гребней колесных пар тепловозов ТГМ23 депо Мотовилиха

Пробег L , тыс.км	Число данных N	Числовые характеристики	
		среднее значение M^*_x , мм	среднеквадратическое отклонение σ^*_x , мм
Профиль по ГОСТ 11018-2011, черт. 2			
0	480	1,899	1,348
7,274	240	2,058	1,264
14,003	480	2,236	1,736
24,316	264	2,388	1,539
45,354	96	2,826	1,514
54,402	36	2,608	1,300
62,165	24	2,854	1,098
76,096	12	2,833	0,378
Профиль ДМетИ типа ЛР			
0	444	1,727	1,216
5,997	540	1,940	1,352
14,873	564	2,531	1,452
24,773	264	2,541	1,307
35,299	264	2,723	1,488
42,634	288	2,948	1,562
53,884	96	3,151	1,527
63,411	36	3,000	1,889

По значениям числовых характеристик контролируемых параметров и закону распределения можно прогнозировать процесс их изменения при больших значениях пробега с целью определения ресурсов бандажей, для чего определены аналитические зависимости среднего значения M_x и среднеквадратического отклонения σ_x от пробега L .

Результаты расчета коэффициентов уравнений регрессий контролируемых параметров бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 сведены в таблицу 3, в которой профиль ДМетИ типа ЛР – ДМетИ, а ГОСТ 11018-2011, черт. 2 – ГОСТ [5].

Таблица 3 – Коэффициенты уравнений регрессии износа гребней бандажей колесных пар тепловозов

Локомотивное депо, серия локомотива	Объем выборки, N	Профиль	Зависимость	Коэффициенты уравнений регрессии, $y = A + BL$		Коэффициент корреляции, $R_{y/l}$	Остаточная дисперсия, S_0^2 , мм^2
				A , мм	B , $\text{мм}/10^4 \text{ км}$		
Пермские моторы ТГМ4	498	ГОСТ	$M_x(L)$	3,992	0,332	0,868	0,169
			$\sigma_x(L)$	2,011	0,007	0,913	0,022
		ДМетИ	$M_x(L)$	3,764	0,490	0,982	0,256
			$\sigma_x(L)$	1,510	0,001	0,875	0,059
Мотовилиха ТГМ23	444	ГОСТ	$M_x(L)$	1,995	0,129	0,876	0,137
			$\sigma_x(L)$	1,507	0,063	0,827	0,062
		ДМетИ	$M_x(L)$	1,944	0,208	0,867	0,199
			$\sigma_x(L)$	1,239	0,078	0,930	0,106

Значения всех коэффициентов корреляции составляют 0,827–0,982, что свидетельствует об адекватности линейной аппроксимации, то есть о достаточно тесной линейной связи контролируемых параметров с величиной пробега L в двух локомотивных депо ЗАО «Железнодорожник».

Выполненный анализ полученных данных (таблица 3) показал, что интенсивность уменьшения толщины гребней бандажей колесных пар, обточенных по профилю ДМетИ типа ЛР в сравнении с профилем обточенных по ГОСТ 11018–2011, черт. 2:

- в депо Пермские моторы с 0,490 до 0,332 $\text{мм}/10^4 \text{ км}$,
- в депо Мотовилиха с 0,208 до 0,129 $\text{мм}/10^4 \text{ км}$.

На основании полученных зависимостей $M_x(L)$ и $\sigma_x(L)$ можно прогнозировать процесс изнашивания и определить ресурс бандажей колесных пар тепловозов. Выход контролируемых параметров за установленный допуск классифицируется как отказ.

Для износа гребня бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 вероятность отказа при заданном пробеге равна

$$P(L) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{y_{\text{доп}}}^{M_y + 3\sigma_y} \frac{1}{\sigma_y(L)} \cdot e^{-\frac{(x - M_y(L))^2}{2\sigma_y^2(L)}} dy. \quad (4)$$

Если производить восстановление изношенного бандажа, его замену при наработке (пробеге), не превышающей 98%-ного ресурса ($P = 0,02$), то вероятность отказа бандажа в межремонтном периоде не превысит 2 % и отклонение межремонтного пробега от установленной величины также окажется в пределах ± 2 %.

На основании выполненных расчетов строятся зависимости $P(L)$ и по ним определяется γ %-ый ресурс колесных пар, то есть такой пробег, которому соответствует вероятность безотказной работы или вероятность отказа $P = 1 - \gamma$. Результаты выполненных расчетов по прогнозированию ресурса бандажей показаны на рис. 1.

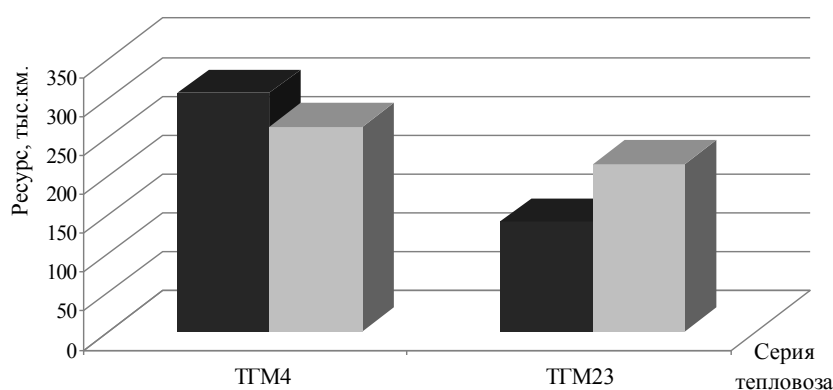


Рис. 1. Ресурс бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 до обточки
■ – профиль ДМетИ типа ЛР,
■ – профиль ГОСТ 11018–2011, черт. 2.

Прогнозируемый ресурс до обточки бандажей колесных пар (рис. 3), обточенных по профилю ДМетИ типа ЛР по сравнению с профилем по ГОСТ 11018–2011, черт. 2 увеличился в депо Мотовилиха (тепловозы ТГМ23) на 52 % (с 142 до 216 тыс.км), тогда как в локомотивном депо Пермские моторы (тепловозы ТГМ4) при переходе на профиль ДМетИ типа ЛР – уменьшился на 16 % (с 308 до 265 тыс. км).

Таким образом исходя из критерия максимального ресурса бандажей колесных пар до обточки для тепловозов ТГМ23 депо Мотовилиха эффективно применение профиля ДМетИ типа ЛР, тогда как для бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 депо Пермские моторы – по ГОСТ 11018–2011, черт. 2.

Список литературы

1. *Пышный И.М.* Повышение ресурса бандажей колёсных пар локомотивов на промышленном железнодорожном транспорте: Дис. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2014. – 144 с.
2. *Пышный И.М.* Продление жизненного цикла ходовых частей локомотивов путем лубрикации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 5. – С. 109–112.
3. *Пышный И.М., Русаков А.Г.* Определение расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов при помощи энергетического паспорта железнодорожного участка пути // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 185–187.
4. *Буйносов А.П., Худояров Д.Л., Пышный И.М.* Выбор профиля поверхности катания бандажей колесных пар промышленных тепловозов // Транспорт Урала. – 2011. – № 1 (28). – С. 64–69.
5. *Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А.* Измерение диаметра бандажей колесных пар тягового подвижного состава // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 22–24.

05.02.08

И.Н. Фролова к.т.н., А.А. Сарбаев, И.О. Пантелеев, С.К. Сахаровский

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
институт промышленных технологий машиностроения,
кафедра технологии и оборудования машиностроения,
Нижний Новгород, vano1332@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ НА ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-79-83

В работе изложено описание программного модуля выбора кортежей средств технологического оснащения для представленной технологической системы. Подробно разобрана работа алгоритма обнаружения столкновений для проверки на возможность формообразования заданных поверхностей. Продемонстрировано формирование полного и неполного множества возможных решений выбора кортежей средств технологического оснащения.

Ключевые слова: *программный модуль, САПР ТП, технологическая система, средства технологического оснащения, обнаружение столкновений, формообразование.*

Введение

В работе рассматривается возможность применения разработанного алгоритма обнаружения столкновений (АОС) для выбора на операции механической обработки кортежа средств технологического оснащения (СТО): станка, вспомогательного и режущего инструмента.

Суть разработанного АОС состоит в следующем. Для осуществления операции механической обработки в технологической системе необходимо, чтобы произошло огибание поверхности детали поверхностью инструмента в каждой их точке касания без взаимного внедрения одной поверхности в другую [1]. Если АОС прошел, значит, столкновений не выявлено и формообразование заданной обрабатываемой поверхности заданным инструментом на заданном станке возможно.

Под инструментом в данной работе будем понимать кортеж "сменная многогранная пластина - режущий инструмент - вспомогательный инструмент", собранный в базе данных САПР ТП и подлежащий проверке на возможность его использования на данной операции механической обработки.

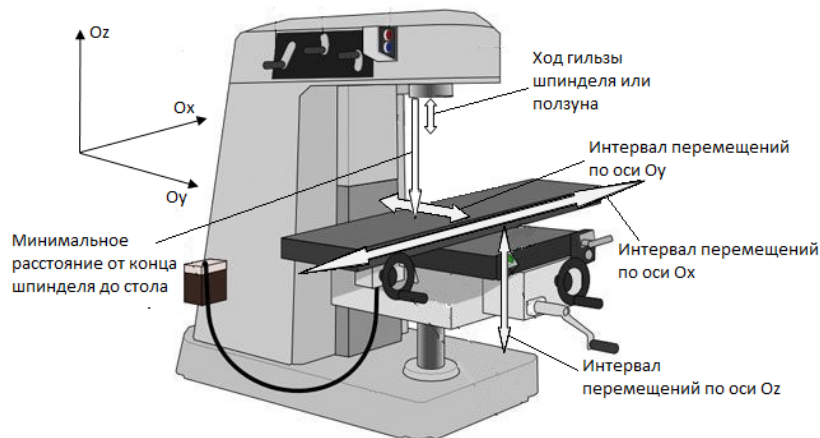
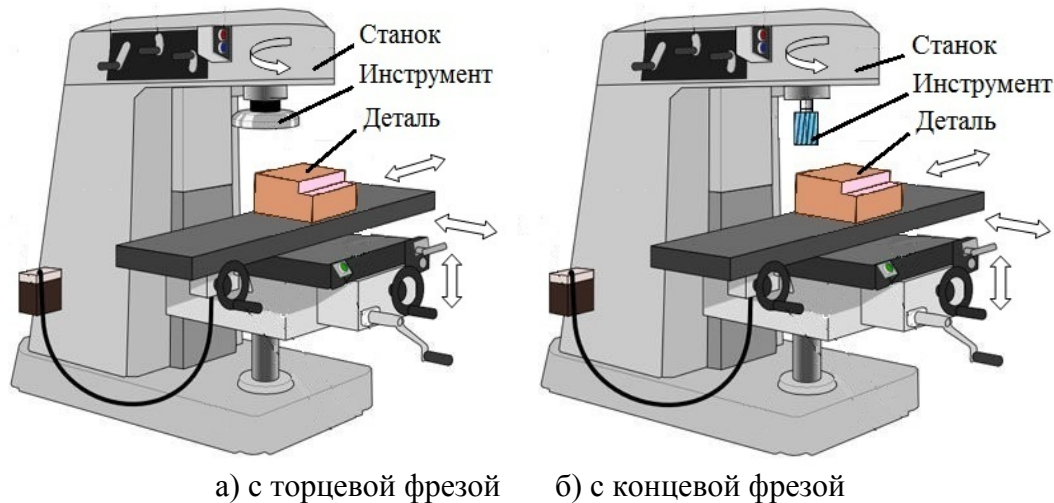
Назовем множеством КСИ множество кортежей станок-инструмент, имеющих в базе данных САПР ТП положительную мощность пересечения общих связей [2] по собираемости и формообразующим функциям [3], характеристикам режущего клина [4], другим параметрам. Модели станков и инструментов, имеющих одинаковые параметры и одинаковые общие связи в базе данных САПР ТП, должны быть помечены как полные аналоги. Из одной группы полных аналогов в множество КСИ должен входить один элемент.

Заготовка на фрезерном станке, в общем случае, может занимать различные положения. Все положения заготовки могут быть определены до начала работы АОС. Если для заданного положения заготовки не выбран ни один кортеж станок-инструмент из множества КСИ, то положение заготовки должно быть изменено. Изменения ведутся до тех пор, пока все возможные положения заготовки не окажутся использованы.

Также может измениться и положение режущего инструмента, если использовать переходник (адаптер), который меняет направление осей координат инструмента.

1. Описание математической модели технологической системы.

Технологическая система, в упрощённом виде, представляет собой фрезерный станок, инструмент и деталь (рис. 1, а, б). Необходимой информацией для моделирования процесса резания будут являться характеристики инструмента и станка (рис. 1, в).



в) иллюстрация характеристик, влияющих на формообразование

Рис.1. Примеры компоновок технологических систем и иллюстрация характеристик влияющих на формообразование.

2. Описание работы программного модуля выбора кортежей СТО

2.1. Исходные данные:

1. известно множество металлорежущих станков СТ из множества КСИ, при этом счетчик СТ принимает значения $f = \overline{1, h}$;
2. известно множество положений заготовки ПЗ на станке, при этом счетчик ПЗ принимает значения $i = \overline{1, m}$;
3. известно множество положений режущих инструментов ПРИ на станке, при этом счетчик ПРИ принимает значения $t = \overline{1, g}$;
4. известно множество инструментов РИ из множества КСИ, при этом счетчик РИ принимает значения $j = \overline{1, n}$;
5. известна конфигурация и множество обрабатываемых поверхностей ОП, при этом счетчик ОП принимает значения $k = \overline{1, p}$.

2.2. Проверка на возможность формообразования.

Проверка на возможность формообразования заданных поверхностей в разработанном программном модуле выбора кортежей СТО осуществляется по алгоритму АОС. Если АОС прошел, значит, формообразование возможно, столкновений не выявлено. В разработанном программном модуле выбора кортежей СТО реализовано следующее.

1. Создание движения станка (загрузка из файла). Задаются интервалы движения, точность позиционирования, положение шпинделя и ход гильзы (см. рис. 1, в).

2. Создание инструмента (загрузка из файла), для примера, режущей пластины (рис. 2) для торцевой фрезы. Задаются длина стороны инструмента, угол наклона, радиус кривизны скруглённой части, расстояние до оси вращения, расстояние до конца шпинделя, расстояние до стартовой точки инструмента. Стартовая точка инструмента (см. рис. 2) – условная точка, от которой рассчитываются положение и геометрия инструмента в пространстве. Стартовая точка находится на границе обрабатываемой и необрабатываемой поверхностей инструмента.

3. Создание заготовки (загрузка из файла). Задаются множества обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей по их четырём точкам и точке нормали для каждой поверхности. Форма заготовки образуется объединением всех обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей. На рис. 3 розовым цветом обозначены обрабатываемые поверхности детали, коричневым - необрабатываемые.



Рис. 2. Пластина SNUA-090304: $d=l=9.525$, $r=0.4$, $m=1.808$.

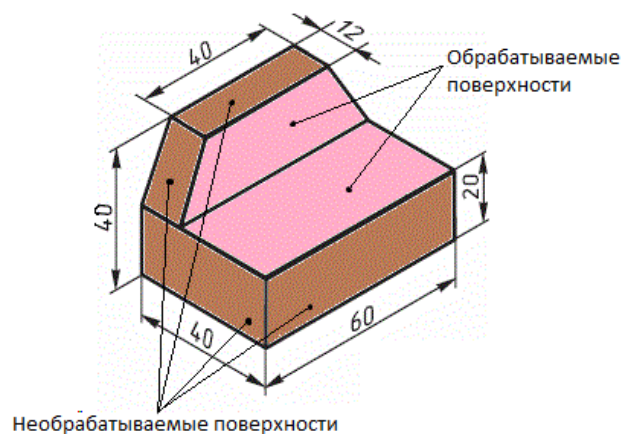


Рис.3. Деталь.

4. Расчёт обрабатываемой поверхности инструмента. Производится вычисление координат точек, лежащих на обрабатывающих и необрабатывающих поверхностях инструмента, путём составления уравнения кривой (которая при вращении образует поверхность инструмента) на основе паспортных данных.

5. Установка заготовки в начальное положение для обработки. Установка заготовки происходит таким образом, чтобы начальная точка одной из прямых, которыми ограничены обрабатываемые поверхности, совпала с нижней точкой инструмента (точка, у которой координата по оси Oz – наименьшая). Ось Oz вращения инструмента совпадает с осью вращения шпинделя станка.

Выполняется проверка соответствия габаритов заготовки рабочему пространству станка и проверка на положительность z-составляющей вектора нормали к плоскости заготовки: если z-составляющая вектора нормали к плоскости положительна, то поверхность обращена обрабатываемой стороной к инструменту. Если проверка на положительность z-составляющей вектора нормали к плоскости заготовки не пройдена, то поверхность не может быть обработана, следовательно, происходит выход из АОС и переход к следующему этапу алгоритма выбора кортежей СТО.

6. Необходимым и достаточным условием возможности обработки поверхности является возможность обработки её периметра инструментом при отсутствии контакта с необрабатываемыми поверхностями заготовки.

Осуществляется проход по периметру каждой из обрабатываемых поверхностей. В каждой точке проверяется пересечение с какой-либо необрабатываемой поверхностью. Если такое пересечение обнаружено, то деталь обработать нельзя, и происходит переход к следующему этапу алгоритма выбора кортежей СТО. Если ни для одной из обрабатываемых поверхностей такое пересечение не обнаружено, то считается, что деталь можно обработать данным кортежем станок–инструмент.

Переход от одной поверхности к другой совершается параллельным переносом детали вдоль осей координат, определенных для станка конструкцией. Устанавливается новая стартовая точка обработки и повторяется алгоритм, начиная с пункта 5.

7. Проверку возможности формообразования всех поверхностей из множества поверхностей ОП осуществляем с применением АОС в следующей последовательности (рис.4).

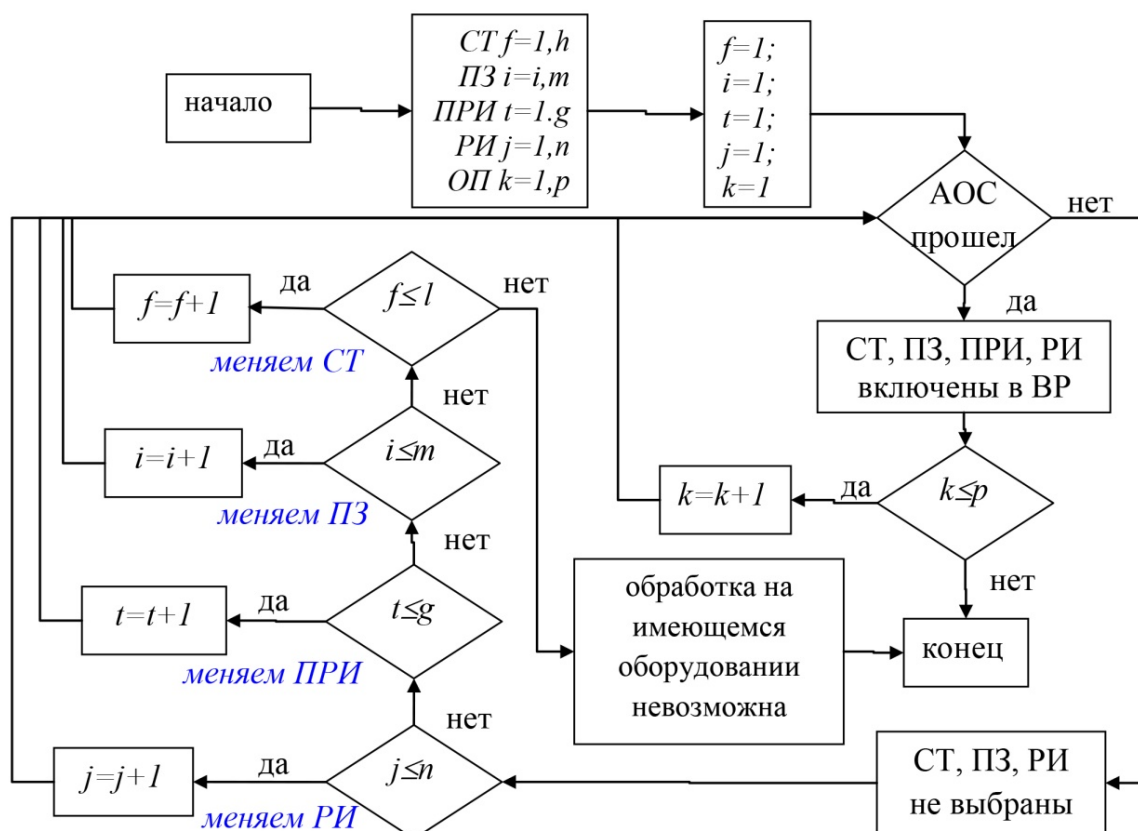


Рис.4. Алгоритм выбора СТО (СТ, ПЗ, ПРИ, РИ) при помощи АОС

- 1) Проверка формообразования начинается с первых элементов по порядку из каждого множества ОП, РИ, ПРИ, ПЗ, СТ: $f=1; i=1; t=1; j=1; k=1$;
- 2) Если формообразование любой поверхности из множества ОП любым инструментом из множества РИ невозможно (АОС не прошел), то меняем положение инструмента на следующее из множества ПРИ.
- 3) Если формообразование любой поверхности из множества ОП любым инструментом из множества РИ при любом положении инструмента из множества ПРИ невозможно (АОС не прошел), то меняем положение заготовки на следующее из множества ПЗ.
- 4) Если формообразование любой поверхности из множества ОП любым инструментом из множества РИ при любом положении инструмента из множества ПРИ и любом положении заготовки ПЗ невозможно (АОС не прошел), то меняем станок на следующий из множества СТ.
- 5) Если формообразование любой поверхности из множества ОП любым инструментом из множества РИ при любом положении инструмента из множества ПРИ и любом положении заготовки ПЗ на любом станке из множества СТ невозможно (АОС не прошел), то обработка на имеющемся оборудовании невозможна и необходимо принимать решение об изменении состава множества ОП или приобретении новых станков, инструментов.
- 6) Если формообразование всех поверхностей возможно (АОС прошел), то такое сочетание РИ, ПРИ, ПЗ, СТ и ОП заносится в множество возможных решений ВР.
- 7) Возможно получение неполного множества возможных решений НВР, если вместо проверки условия "любой поверхности из множества ОП" проверять условие "хотя бы одна поверхность из множества ОП".

Выводы

Выбор кортежа средств технологического оснащения из базы данных САПР ТП можно осуществить, если определить возможность обработки заданных поверхностей на заданном станке заданным инструментом при помощи разработанного алгоритма обнаружения столкновений.

Список литературы

1. Раздевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. Монография – К.: Растан, 2001 – 592 стр. 120стр.
2. Фролова И.Н. Связи в технологических системах механической обработки / Научно-теоретический журнал "Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова". - Белгород, № 1, 2016. - с. 82-86
3. Фролова И.Н., Пантелеев И.О., Сахаровский С.К. Структурирование параметров режущего инструмента для систем автоматизированного проектирования технологических процессов/Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева /НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2017. №1 (116) - с. 155-160
4. И.Н. Фролова, И.О. Пантелеев, С.К. Сахаровский, А.А. Сарбаев. К вопросу автоматизации выбора углов в плане режущего клина в базе данных систем автоматизированного проектирования техпроцессов/ "Научно-технический вестник Поволжья". – Казань, №4 2017г. - с. 62-64

05.02.02

И.М. Щигарцов, А.Т. Кулаков, Е.П. Барыльникова

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Набережночелнинский институт (филиал),
кафедра эксплуатации автомобильного транспорта,
Набережные Челны, 692401@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ЭНЕРГООБМЕНА

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-84-87

В работе рассматриваются проблемы эффективности термодинамических процессов расширения газов в поршневых двигателях в зависимости от кинематических характеристик механизмов и условий теплообмена рабочих газов с окружающей средой. Проведен сравнительный анализ уравнений расширения рабочих газов в цилиндрах двигателей в различных фазах процесса. Предложены критерии оценки принимаемых конструктивных решений.

Ключевые слова: поршневой двигатель, эффективные показатели работы, коэффициент преобразования энергии, показатель политропы.

Современные методы проектирования поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) предусматривают расчет рабочего цикла, как при их модернизации, так и создании новых моделей.

Расчет основных параметров рабочих процессов, энергетических и экономических показателей двигателей проводится на основании детально разработанной теории. Однако, существующие методы проектирования обеспечивают достаточную для практических целей точность только при удачном выборе большого количества коэффициентов, принимаемых по опыту эксплуатации имеющихся аналогов.

Так выбирается и значение основного показателя, определяющего качество двигателя – показателя политропы. При существенных отклонениях конструктивных параметров проектируемого двигателя от аналога, выбор этого показателя на стадии проектирования является сложной задачей. Неопределенность в выборе значений показателей политропы при разработке новых и модернизации существующих двигателей не позволяет однозначно определить возможность и перспективы их дальнейшего совершенствования.

По оценкам [1] рабочие процессы в ДВС уже довольно близки к пределам их совершенствования, а по оценкам [2] дизели имеют существенные резервы для повышения их эффективных показателей.

По расчетам [3], при значениях показателей политропы сжатия, расширения равных 1,38 термический коэффициент полезного действия (КПД) может достигать значений 0,794, что только на 9% ниже термического КПД цикла Карно и на 20...25% выше, чем у современных наиболее совершенных дизелей. Там же отмечается, что ни один из существующих двигателей не имеет эффективного механизма реализации энергии газов.

Поиски таких механизмов ведутся с момента создания первых двигателей, в большей мере на интуитивном уровне, так как комплексные требования к «идеальному» механизму до настоящего времени не сформулированы.

Противоречия в оценках существующих резервов и направлений конструктивных решений по совершенствованию ДВС является следствием применения в расчетах среднего значения показателя политропы, рассчитанного по одним уравнениям для двигателей с различными механизмами, с последующим уточнением при испытаниях. Эта методика не позволяет оценить влияние изменения величины этого показателя по фазам процессов (расширения, сжатия) на эффективность преобразования тепловой энергии в работу.

Качественная оценка изменения показателя политропы по фазам процесса проводится по соотношению тепловых потерь и количеству получаемого рабочим газам тепла [4]. Хотя известно, по определению, что величина показателя политропы определяется соотношением количества тепла, участвующего в процессе и работой [5].

Влияние кинематических характеристик механизма на работу в различных фазах процесса не исследуется, так как параметры механизмов двигателей в уравнениях рабочих процессов не входят, не определено и их влияние на значение показателя политропы, в связи с чем не определены и требования к этим механизмам.

В настоящее время проектирование ДВС с новыми механизмами маловероятно, поэтому на первом этапе необходимо установить научно-обоснованные требования к существующим механизмам, имеющие достаточные физико-математические обоснования, и разработать критерии оценки таких механизмов. Учитывая исключительную сложность проблемы, предлагается «качество» выбираемого механизма оценивать по эффективности основного термодинамического процесса – процесса расширения (рабочего такта). Существующие при этом затруднения разрешаются путем совместных аналитических исследований уравнений показателя политропы [6], кинематических характеристик (диаграмм скоростей перемещения поршня) механизмов используемых в двигателях, диаграмм расширения эталонных и проектируемых двигателей (диаграммы P-V) и закономерностей теплообмена рабочих газов с элементами конструкции.

Математическую модель эффективных показателей процесса расширения газов в двигателях можно представить в виде ряда уравнений [6].

Уравнение показателя политропы

$$n = k - \frac{\alpha(S_0 + lf(t))f(t)}{Mc_v f'(t)} \left(\frac{T_{cm}}{T} - 1 \right), \quad (1)$$

где α – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°C (Дж/сек·м²·°C); $T_{ст}$ – температура стенок цилиндра, °C; $f(t)$ – функция движения поршня, м/с; S_0 – площадь теплообмена в начальный момент расширения, м²; l – длина окружности цилиндра, м; c_v – средняя массовая изохорная теплоемкость газа (принята постоянной), Дж/кг·°C; t – время, сек; M – масса газа, кг; T – температура газа, К.

Коэффициент преобразования энергии в каждой точке процесса (КПД в каждой точке процесса) можно определить по формулам

$$\eta = \frac{k-1}{(k-1) - \frac{\alpha(S_0 + lf(t))f(t)}{Mc_v f'(t)} \left(\frac{T_{ст}}{T} - 1 \right)} \quad (2)$$

или

$$\eta = \frac{R}{c_v(n-1)}; \eta = \frac{k-1}{n-1}. \quad (3)$$

В уравнения (1) и (2) входят функции движения поршня (изменения объёма) и скорости, что позволяет оценить закономерность изменения показателя политропы во времени и, соответственно, КПД, а также сравнивать этот показатель эффективности проектируемого двигателя с эталонным или прототипом. Из приведенных уравнений следует, что скорость движения поршня в каждой фазе процесса является основным параметром, влияющим на значение показателя политропы и определяющим долю тепла преобразовываемого механизмом в работу.

В приведенных уравнениях функционал $\frac{\alpha(S_0 + lf(t))f(t)}{Mc_v f'(t)} \left(\frac{T_{cm}}{T} - 1 \right)$ можно считать критерием, определяющим эффективность механизма двигателя в каждой точке процесса расширения.

Выражение $\alpha(S_0 + lf(t))f(t) \left(\frac{T_{cm}}{T} - 1 \right)$ характеризует условия теплообмена, а знаменатель $Mc_v f'(t)$ отражает зависимость показателя политропы или КПД от массы газа (степени сжатия) и кинематических свойств механизма.

Например, для бесшатунного двигателя [7] перемещение и скорость движения поршня от верхней мертвой точки (ВМТ) описывается уравнениями $S_n = 2 R(1 - \cos\varphi)$ и $v_n = 2 R\omega \sin\varphi$, где R – радиус кривошипа, φ – угол поворота коленчатого вала, ω – угловая скорость.

Функции перемещения и скорости поршня по аргументу время описываются уравнениями

$$S_n = 2 R(1 - \cos\omega t), \quad (6)$$

$$V_n = 2 R\omega \sin\omega t. \quad (7)$$

Перемещение и скорость движения поршня центрального кривошипно-шатунного механизма от верхней мертвой точки (ВМТ) до нижней мертвой точки (НМТ) описываются уравнениями [8]

$$S_n = R \left[(1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right]; \quad (8)$$

$$V_n = R\omega \left(\sin\varphi + \frac{1}{2} \lambda \sin 2\varphi \right), \quad (9)$$

где λ – параметр механизма (отношение длины кривошипа к длине шатуна).

Уравнения по аргументу время имеют вид

$$S_n = R \left[(1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\omega t) \right]; \quad (10)$$

$$V_n = R\omega \left(\sin\varphi + \frac{1}{2} \lambda_1 \sin 2\omega t \right), \quad (11)$$

Аналогичные уравнения можно получить для любого типа механизма. Подстановка уравнений (6) - (11) или аналогичных для любого типа механизма, в уравнения (1) и (2) дает зависимости показателей эффективности процесса расширения газов в двигателе от конструктивных параметров механизма и режимов его работы в удобном для математического анализа виде.

Например, для бесшатунного механизма уравнения (1) и (2) примут вид

$$n = k - \frac{\alpha \{S_0 + l[2R(1 - \cos\omega t)]2R(1 - \cos\omega t)\}}{M c_v 2 R \omega \sin\omega t} \left(\frac{T_{ct}}{T} - 1 \right); \quad (12)$$

$$\eta = \frac{k-1}{(k-1) - \frac{\alpha \{S_0 + l[2R(1 - \cos\omega t)]2R(1 - \cos\omega t)\}}{M c_v 2 R \omega \sin\omega t} \left(\frac{T_{ct}}{T} - 1 \right)}. \quad (13)$$

На основании такого анализа можно сформулировать основные требования к механизму, обеспечивающему термодинамический цикл расширения газов с КПД близким к циклу Карно. Это подтверждается при анализе уравнений (4) и (5). Скорость перемещения поршня $f'(t)$ является характеристикой механизма, определяющей эффективность преобразования энергии. Чем меньше значение $f'(t)$, тем меньше коэффициент преобразования энергии и больше отклонение показателя политропы от показателя адиабаты.

Несмотря на то, что в фазах от 12° - 15° после ВМТ, при максимальном давлении мощность генерируемого двигателя максимальна, коэффициент преобразования энергии крайне низок, что существенно снижает КПД рабочего такта.

Совместный анализ приведенных уравнений, диаграмм скоростей перемещения поршня выбранных механизмов, графиков зависимости удельных тепловых потерь и диаграмм расширения рабочих газов показывает несоответствие применяемых в настоящее время кривошипно-шатунных механизмов (КШМ) условиям эффективной реализации энергии рабочих газов. Кинематические характеристики бесшатунных механизмов обеспечивают более оптимальное преобразование тепловой энергии во всех фазах процесса расширения газов.

Список литературы

1. Григорьев М.А., Кратко А.П. Совершенствование рабочих процессов дизелей // Автомобильная промышленность. – 2000, №1. – С. 36-39.
2. Кузнецов Е.В. Параметры дизеля и его характеристики // Автомобильная промышленность. – 2002, № 9. – С. 11-15.
3. Григорьянц Р.А. Совершенствование механизма реализации энергии газов в двигателях внутреннего сгорания // Двигателестроение. – 2006, №4 (226). – С. 15-18.
4. Артамонов М.Д., Морин М.М. Основы теории и конструирования автотракторных двигателей. - М.: «Высшая школа», 1973. – С. 125
5. Бальян С.В. Техническая термодинамика и тепловые двигатели : учеб. пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: «Машиностроение», 1973. – 304 с. – С. 39.
6. Щигарцов И.М. Математическая модель необратимых термодинамических процессов в поршневых машинах // Известия вузов. Авиационная техника. – 2005, № 1. – С. 77-80.
7. Баландин С.С. Бесшатунные двигатели внутреннего сгорания. 2-е изд., доп. – М.: «Машиностроение», 1972. – 176 с. – С.84.
8. Автомобильные двигатели / под ред. М.С. Ховаха. – М., А22: «Машиностроение». – 1977. – 591.– С. 337-338.

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

05.11.06

**Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Г.А. Боброва, В.А. Нестеров, Г.А. Титов,
Р.С. Доровских**

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова»,
Бийск, grn@bti.secna.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
МАКСИМАЛЬНО ЭФФЕКТИВНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И
МАТЕРИАЛОВ****DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-88-90**

В статье представлена феноменологическая модель формирования кавитационной области в жидких средах. Анализ модели позволил установить оптимальные интенсивности воздействия, обеспечивающие максимальную эффективность изменения свойств веществ и материалов.

Ключевые слова: *ультразвук, кавитация, вязкость, неньютоновские жидкости.*

Одним из перспективных подходов к решению различных технологических задач современных производств является ультразвуковое (УЗ) кавитационное воздействие на жидкие и жидкодисперсные среды для получения веществ и материалов с заданными свойствами, зависящими от поверхности взаимодействия дисперсной и несущей жидкой фазы, а также от молекулярной структуры жидкости [1-3]. На сегодняшний день кавитационная обработка успешно реализована на практике и распространена в промышленности только для реализации процессов в маловязких средах (с вязкостью до 30 мПа·с).

К сожалению, кавитационная ультразвуковая обработка сред более высокой вязкости на практике не реализуется в силу ряда причин:

- отсутствия научных данных о влиянии режимов УЗ воздействия на процесс формирования кавитационной области в неньютоновских средах.
- необходимости в высоких интенсивностях УЗ воздействия (более 25 Вт/см²) для создания кавитации;

Таким образом, комплексное исследование процесса формирования кавитационной области должно включать изучение поведения отдельного пузырька, изучение поведения всего ансамбля пузырьков с учетом их взаимодействия, определяющего энергетические характеристики области как единого целого, и выявление оптимальных режимов воздействия, при которых суммарная энергия схлопывания пузырьков максимальна.

Анализ динамики одиночного пузырька в зависимости от свойств жидкости заключается в определении функциональной зависимости радиуса кавитационного пузырька R от времени t , амплитуды звукового давления p и реологических свойств жидкости P .

Искомая функциональная зависимость определяется на основании анализа полученного уравнения динамики одиночного пузырька, учитывающего зависимость вязкости жидкости от скорости сдвига:

$$\rho \left(\frac{3}{2} \dot{R}^2 + R \ddot{R} \right) = p(R) - p_{\infty} + \int_R^{\infty} \left(- \frac{2R^2 \dot{R}}{r^3} \right) \frac{\partial \varphi(\sqrt{I_2})}{\partial r} dr; \quad (1)$$

где R – мгновенный радиус кавитационного пузырька, м; $p(R)$ – давление жидкости вблизи стенок кавитационного пузырька, Па; p_{∞} – мгновенное значение звукового давления, Па; $\sqrt{I_2}$ – евклидова норма тензора скоростей деформации, c^{-1} ; φ – некоторая функция, определяющая зависимость вязкости жидкости μ от скорости сдвига, Па·с, при этом $\mu = \frac{\varphi(\sqrt{I_2})}{2}$.

Функция φ определяется тремя параметрами, характеризующими реологические свойства жидкости: начальная вязкость μ (Па·с), показатели консистенции K (Па·с $^{N+1}$) и нелинейности N .

При этом в зависимости от реологических свойств жидкости подразделяются на *линейно-вязкие* (вязкость не зависит от скорости сдвига, $N=0$), *псевдопластические* (вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига, $N<0$) и *дилатантные* (вязкость увеличивается с ростом скорости сдвига, $N>0$). Полученные далее результаты приведены для всех трех типов жидкостей.

Анализ совокупности кавитационных пузырьков проводится в области с характерными размерами L , много меньшими длины УЗ волны λ , но много большими радиуса кавитационного пузырька R : $\lambda \gg L \gg R$.

Это позволяет выявить зависимости концентрации $n(m^{-3})$ и объёмного содержания δ кавитационных пузырьков (индекса кавитации) от амплитуды звукового давления, времени и реологических свойств жидкости P .

$$\delta(t, p, P) = \frac{4}{3} \pi R^3 n(t, p, P)$$

Зависимости концентрации кавитационных пузырьков выявляются на основании уравнения кинетики дробления и коалесценции пузырьков, полученного Маргулисом [4].

Найденные зависимости объёмного содержания кавитационных пузырьков от времени составляют основу для дальнейшего определения коэффициента поглощения, который пропорционален суммарной энергии ударных волн и служит мерой эффективности кавитационного воздействия [3].

При этом коэффициент поглощения в кавитирующей среде определяется на основании следующего полученного выражения:

$$K_* = - \frac{\omega}{c_0} \operatorname{Im} \frac{\rho_0 c_0^2 \overline{\delta_1}}{P_1},$$

где $\overline{p_1}$ и $\overline{\delta_1}$ – комплексные амплитуды 1-х гармоник давления (Па) и объёмного содержания пузырьков в среде соответственно; ω – частота колебаний акустического излучателя в жидкой среде, c^{-1} ; ρ_0 – равновесная плотность жидкой фазы, $кг/м^3$; c_0 – скорость звука в сплошной жидкости, м/с.

Зависимости коэффициента поглощения от интенсивности воздействия для жидкостей с различными реологическими свойствами приведены на рис. 1.

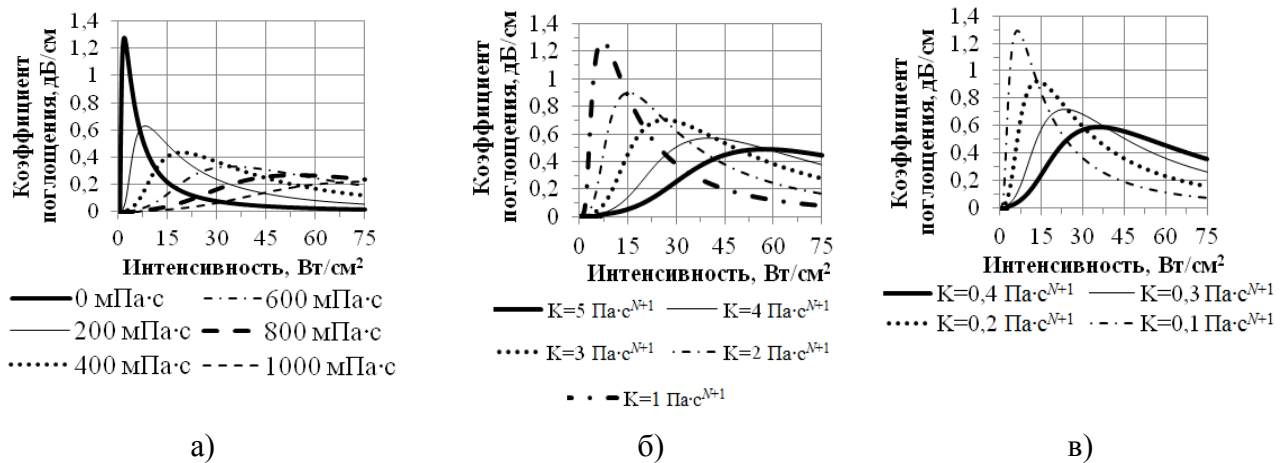


Рис. 1 – Зависимости коэффициента поглощения от реологических свойств несущих жидких фаз: линейно-вязких (а); псевдопластических ($N = -0,1$) (б); дилатантных ($N = 0,1$) (в)

Зависимость коэффициента поглощения от интенсивности воздействия имеет экстремальный характер, и положение максимума определяет оптимальную интенсивность УЗ воздействия, поскольку в данном случае достигается максимальная степень трансформации энергии первичной УЗ волны в энергию ударных волн, создаваемых кавитационными пузырьками. Таким образом, при оптимальной интенсивности достигается максимальный КПД изменения свойств веществ и материалов при УЗ кавитационного воздействия.

Для линейно-вязких сред оптимальная интенсивность составляет от 3 (для идеальных сред с вязкостью, близкой к нулю) до 70 Вт/см² (при вязкости 1000 мПа·с). Для дилатантных и псевдопластических сред оптимальная интенсивность возрастает с ростом показателя консистенции и составляет не менее 7 Вт/см² для сред, используемых на практике.

Представленные результаты могут быть в непосредственном виде использованы для выбора мощностных режимов работы ультразвукового оборудования при известных реологических свойствах обрабатываемой жидкости, чтобы обеспечить максимально эффективное изменение свойств веществ и материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 17-48-220053 p_a.

Список литературы

1. *Khmelev, V.N.* Method for Calculation of Optimum Intensity of Cavitation Influence on Viscous and Fine-dispersed Liquid Media [Текст] / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, S.S. Khmelev, R.V. Barsukov // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P.245-250.
2. *Time, R.W.* Cavitation Bubble Regimes in Polymers and Viscous Fluids [Текст] / R.W. Time, A. H. Rabenjafricanantsoa // Annual transactions of the Nordic rheology society. – 2011. – Vol. 19. – 12 p.
3. *Golykh, R.N.* Process Modeling of Cavitation Zone in Process Vessels with High-viscous and Fine-dispersed Liquid Media [Текст] / R.N. Golykh, V.N. Khmelev, S.S. Khmelev // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P.251-256.
4. *Маргулис, М.А.* Динамика ансамбля пузырьков в кавитирующей жидкости [Текст] / М.А. Маргулис, И.М. Маргулис // Журнал физической химии. – 2007. – Т. 81. – №12. – С. 2290-2295.

05.11.13

В.В. Корепанов

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, kvv@icmm.ru

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАСТИН С ДЕФЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-91-93

В работе исследуется многослойная пластина из равнопрочного углепластика, с толщиной каждого слоя 0.2 мм. Рассмотрены различные варианты статического нагружения пластины. Для каждого вида нагружения проводился численный расчет напряженно-деформированного состояния без учета и с учетом дефектов в виде расслоений. При моделировании дефекта рассматривалась модель расслоения с учетом контактного взаимодействия.

Ключевые слова: композиционные материалы, дефекты, расслоение, численное моделирование.

В работе рассматриваются варианты учета микроструктуры слоистого композита при наличии определенного типа дефектов. Причинами их возникновения могут служить: попадание антиадгезионных смазок, пленок; недостаточное содержание связующего, высокое содержание летучих элементов; нарушение режима формования (повышенная температура, высокая скорость охлаждения, ненормированное тепловое или механическое воздействие); некачественное антиадгезионное покрытие на поверхности оснастки. Самым распространенным среди них является расслоение.

Появление расслоения может привести к потере несущей способности конструкции, ее поломке и выводу из эксплуатации, что делает задачу обнаружения данного дефекта на ранней стадии развития актуальной.

Для того, чтобы рассматривать и моделировать процессы расслоения, в работе [1] слоистый материал моделируется как последовательность укладки однородных слоев и межслойных поверхностей раздела. Это моделирование используется для предсказания начала расслоения и его рост в случае статических нагрузок без потери устойчивости. В [2] приведен обзор, посвященный стандартизации методов испытаний. Представлены последние исследования, ведущие к новым стандартизированным методам испытаний, дополняя и обновляя более ранние обзоры. В работе [3] обсуждаются причины отслоения и его влияние на структурные характеристики, рассматриваются аналитические и экспериментальные методы определения расслоения. В [4] проанализировано расслоение при сжатии слоистых композитных пластин. В [5] были проведены испытания на одноосное нагружение слоистых материалов с большим количеством слоев, склонных к расслоению. Наступление расслоения определяется на основе акустической эмиссии.

При организации мониторинга механического поведения конструкции предварительно нужно получить ответы на ряд вопросов. И в первую очередь на вопрос: какие механические характеристики контролируемого объекта откликаются на появление дефекта, имеют количественные показатели, соответствующие развитию дефекта и могут быть измерены. Эффективным методом решения данной задачи является математическое моделирование. В настоящей работе поставлена цель анализа изменения напряженно-деформированного состояния при статическом нагружении моделируемого объекта при появлении и развитии дефекта типа расслоения в композиционных материалах.

При моделировании дефектов в работе рассматривается модель контактного взаимодействия смежных поверхностей многослойной композитной конструкции с вариантом закрытого контакта и с возможностью проскальзывания смежных поверхностей относительно друг друга.

В качестве объекта исследования рассматривается 15-и слойная пластина из равнопрочного углепластика ВКУ-39, с толщиной каждого слоя $h_{lc}=0.2$ мм (рис. 1,б). Каждый слой пластины моделируется в рамках трехмерной модели теории упругости с ортотропными эффективными характеристиками для каждого слоя. Эффективные характеристики для каждого слоя принимались одинаковыми и приведены в таблице 1.

Таблица 1. Эффективные характеристики композитного материала.

Материал	E_{xx} , ГПа	E_{yy} , ГПа	E_{zz} , ГПа	G_{xy} , ГПа	G_{xz} , ГПа	G_{yz} , ГПа	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}
ВКУ-39	58.0	58.0	10.0	4.5	3.0	3.0	0.05	0.3	0.18

Рассмотрен вариант двух симметрично (относительно оси Y) расположенных дефектов на границе слоев (рис. 1,а). Количество расслоений по толщине пластины задавалось от одного до шести (рис. 2,а), линейный размер дефектов L_d варьировался от 5 до 30 мм.

Для создания конечно-элементной модели пластины использовались элементы с квадратичной аппроксимацией перемещений. Построение конечно-элементной модели выполнено в пакете ANSYS.

Рассмотрены следующие варианты нагружения пластины:

- сдвиг;
- трехточечный изгиб (рис. 2,б).

Для каждой из рассмотренных схем нагружения проведем анализ изменения параметров напряженно-деформированного состояния в зависимости от числа дефектов и их размеров в многослойной пластине. В качестве таких параметров могут быть выбраны соответствующие компоненты тензоров напряжений и деформаций. Для задачи о сдвиге пластины - это сдвиговые деформации и напряжения, для задачи о трехточечном изгибе - это растягивающие деформации и напряжения. Оценку чувствительности выбранных параметров будем проводить путем сравнения результатов на однородной пластине и пластине с дефектами.

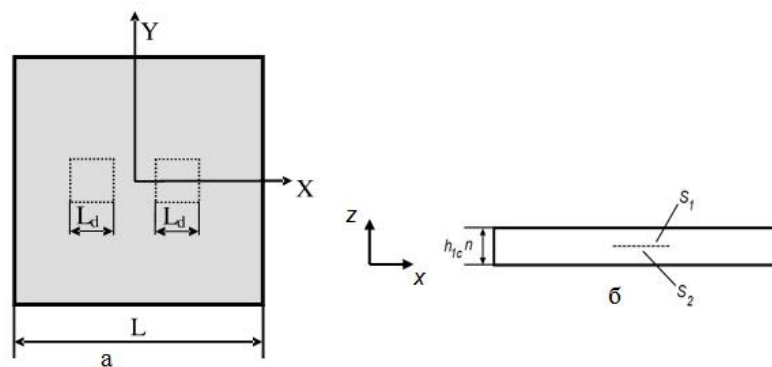


Рис. 1 – Расчетная схема пластины с дефектами



Рис. 2 – Схема расположения дефектов по толщине пластины (а); схема трехточечного изгиба (б)

Результаты расчетов показали, что картина напряженно-деформированного состояния практически не меняется для задачи о сдвиге (отличие по соответствующим компонентам деформаций и напряжений в зонах дефекта составляет не более 1 %). Наиболее интересной схемой с точки зрения отклика деформаций на наличие дефектов является схема трехточечного изгиба (рис. 2,б).

На рис. 3 представлены зависимости растягивающих деформаций ε_{xx} на поверхности и на границе слоев с дефектами вдоль линии $Y=0$ для однородной пластины и пластины с дефектами для би расслоений по толщине пластины (рис. 2,а) с двумя дефектами в слое (рис. 1,б) и при различных размерах дефекта.

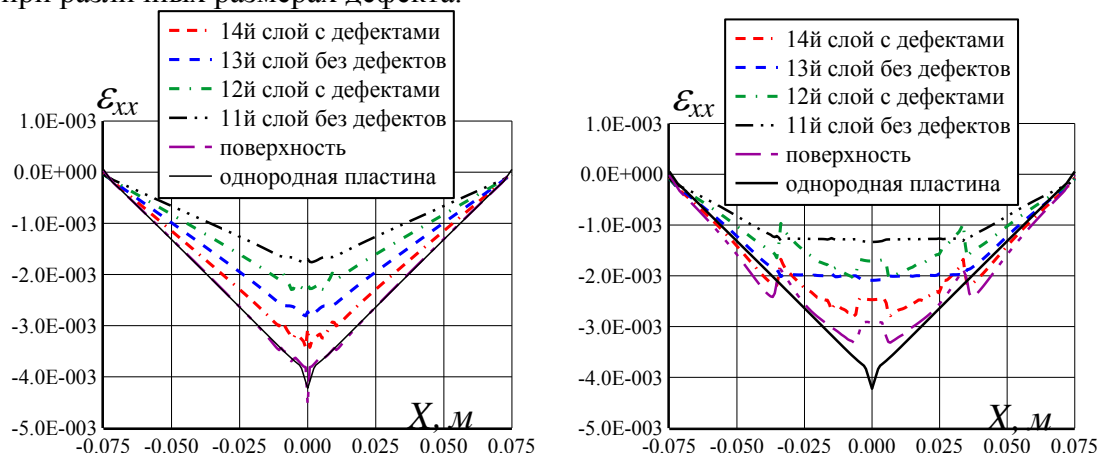


Рис. 3. – Распределение деформаций вдоль линии $Y=0$ на поверхности пластины, на границах слоев и для однородной пластины (сплошная линия) при различных размерах дефектов: $L_d=5$ мм (а), $L_d=30$ мм (б)

Анализ полученных численных результатов показал, что с точки зрения анализа чувствительности выбранных механических характеристик (растягивающие напряжения и деформации) для идентификации дефектов в рассматриваемой конструкции (рис. 1-2), начиная с линейного размера дефекта $L_d=10$ мм, появляется отклик выбранных механических характеристик на внешнее воздействие. Поэтому при измерении полей деформаций с целью регистрации и развития расслоений в композиционных материалах необходимо располагать датчики в зоне 3х-4х характерных размеров ожидаемого дефекта и в данном случае возможны два варианта:

- в первом варианте необходимо обеспечить плотное покрытие датчиками объема контролируемого дефекта;
- во втором варианте датчики располагаются в зонах концентрации напряжений, где в первую очередь должны проявиться дефекты.

Зоны концентрации напряжений могут быть определены для конкретной конструкции методами математического моделирования.

Работа выполнена при поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований УрО РАН № 10 (проект 15-10-1-18).

Список литературы

1. Zhang Z., Shankar K., Ray T., Morozov E.V., Tahtali M. Vibration-based inverse algorithms for detection of delamination in composites // Composite Structures. - 2013. - № 102. - P. 226-236.
2. Allix O., Ladeveze P. Interlaminar interface modelling for the prediction of delamination // Composite Structures. - 1992. - № 22. - P. 235-242.
3. Brunner A.J., Blackman B.R.K., Davies P. A status report on delamination resistance testing of polymer-matrix composites // Engineering Fracture Mechanics. - 2008. - № 75. - P. 2779-2794.
4. Amar C. Garg. Delamination a damage mode in composite structures // Engineering Fracture Mechanics. - 1988. - Vol. 29. - No. 5. - P. 557-584.
5. Bruno D. Delamination buckling in composite laminates with interlaminar defects // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. - 1988. - № 9. - P. 145-159.

05.11.00

И.В. Нелин к.т.н., Д.А. Охотников к.т.н.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
факультет №4 «Радиоэлектроника летательных аппаратов»,
кафедра 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиолокационное оборудование»,
Москва, kaf-44-3@yandex.ru

РАДИОСИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ**DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-94-96**

Современные радиосистемы стремительно расширяют частотную полосу своих сигналов, что позволяет создавать системы с большей разрешающей способностью, а значит, предметы для радионаблюдения могут быть достаточно небольшого размера – соизмеримыми с телом человека. Широкое распространение в медицинской области начинают приобретать сверхширокополосные (СШП) радиосистемы. В статье рассмотрены области применения современных малогабаритных медицинских радиосистем.

Ключевые слова: *сверхширокополосные радиосистемы, пульсовая волна, измерение дыхания и сердцебиения.*

Начиная с 2000-х годов СШП системы все больше проникают на коммерческий рынок. Распространение стандартов на излучение таких систем (в США, Европе и России) [1] дало возможность появления медицинских систем, так как возможности радиосистем в целях медицины представляли интерес для инженеров медицинских систем еще с начала 90-х годов [2]. Еще одним поводом для использования СШП систем в медицине стало большое затухание радиосигнала на высоких частотах, что сильно ограничило дальность действия таких систем, что не так существенно для медицинских приложений.

Основным же преимуществом СШП излучения, к примеру, над ультразвуковым излучением, является способность проведения мониторинга бесконтактно и дистанционно. Такие системы стали актуальны сегодня в связи с появлением такого направления в медицине как телемедицина [3], когда наблюдение пациента большую часть времени происходит дома, без непосредственного контакта датчиков с телом человека.

Типичным примером медицинский радиосистем является радиолокатор для мониторинга частот дыхания и сердцебиения. Диагностика на основе анализа колебательных движений тканей человека занимает одно из основных неинвазивных методов обследования человека. Ультразвуковое исследование в большинстве случаев использует именно этот источник информации.



Рис. 1 - СШП радиолокатор для дистанционной бесконтактной регистрации частоты сердцебиения и дыхания

Одним из первых объектов наблюдения с использованием радиосигналов стали голосовые связи [4]. В Научно-исследовательском центре сверхширокополосных технологий Московского авиационного института был разработан прибор для бесконтактного и дистанционного наблюдений частоты дыхания и частоты сердцебиения, один из вариантов применения которого представлен на рисунке 1.

Основные характеристики прибора: диапазон рабочих частот 5.5 - 7 ГГц; импульсная мощность 10 мВт; средняя мощность 0.08 мВт; ширина диаграммы направленности антенны 30°x30°; максимальная дальность 5 м; диапазон измерения значений сердцебиения и дыхания 0.05 - 5 Гц (3 - 300 ударов или вдохов в минуту); масса менее 1 кг; размеры 30x30x20 см.

Не менее актуальными являются радиолокаторы для измерения скорости пульсовой волны. Системы анализа пульсовой волны играют значительную роль в оценке состояния сосудов человека [5]. В качестве датчиков ее регистрации используют надувные манжеты, пьезодатчики и другие контактные методы, вносящие значительные изменения в форму пульсовой волны в результате соприкосновения с поверхностью кожи над исследуемым сосудом. Альтернативой является использование направленных радиодатчиков, способных уловить движения поверхности кожи человека с амплитудой сравнимой с долями миллиметра без непосредственного контакта с поверхностью кожи и даже через одежду. Такие преимущества существенно облегчают процедуру обследования в виду отсутствия необходимости пациенту снимать с себя одежду перед обследованием. Внешний вид разработанной в МАИ системы для регистрации скорости пульсовой волны представлен на рис.2.



Рис. 2 - Измеритель скорости пульсовой волны

Прибор оснащен двумя радиодатчиками, способными одновременно фиксировать пульсовую волну в двух разных точках тела человека. Программное обеспечение фиксирует временную задержку между сигналами, пришедшими с каждого датчика, и после введения расстояния между ними вычисляет скорость прохождения импульса крови между двумя точками – скорость пульсовой волны (СПВ). Современная медицина имеет четкие критерии оценки качества сосудов на основании скорости пульсовой волны [5]. Если скорость импульса, прошедшего между точками сонной и бедренной артерий, превышает скорость 10 м/с, то у пациента есть проблемы с сосудами и необходимо тщательное обследование. В случае если СПВ не превышает заданной границы, сосуды пациента в не зоны риска.

Актуальность контроля самочувствия водителя транспортного средства сегодня не вызывает сомнений. Ежедневно происходят аварийные случаи с участием автотранспорта связанные с человеческим фактором. Большие автоконцерны предлагают широкий перечень систем контроля физического и психоэмоционального состояния водителя. В них контролируются косвенные параметра, такие как траектория движения глазного зрачка или частота переключения радиочастоты. Как известно наибольшей достоверностью обладают системы электроэнцефалография, контролирующие деятельность головного мозга, но требующие непосредственного контакта с головой водителя. Однако опыт показывает, что все контактные системы отвлекают внимание водителя и в конечном итоге не находят своего места на рынке. Бесконтактные же системы на сегодняшний день не позволяют фиксировать сигналы головного мозга, но дают возможность наблюдать за деятельностью сердечно-сосудистой системы. Такие устройства могут быть основаны на принципах биорадиолокации [6] и дают

возможность анализа траектории движения поверхности кожи человека, вызванной его дыханием и сердцебиением на дистанциях от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Подобный датчик (рис. 3) был разработан в Научно-исследовательском центре сверхширокополосных технологий Московского авиационного института и представляет собой беспроводной и бесконтактный сенсор, который крепится на ремень безопасности водителя и следит за частотой его сердечного ритма и дыхания. Всякий раз, когда уровень показателей физической активности водителя падает ниже заданных значений (в соответствии с заложенными алгоритмами), датчик подает тревожный звуковой сигнал.

Еще одной возможной областью применения радаров являются системы охраны медикаментов. Способность радиолокаторов регистрировать малейшие изменения в окружающей обстановке оказывается незаменимой в таких задачах как охрана медикаментов. Прибор способен зафиксировать радиолокационное отражение от хранилища препаратов, которое будет уникальным для каждого состояния всего хранилища. Если после визита в комнату с препаратами, например, кого-нибудь из обслуживающего персонала, радиолокационное отражение не совпадает с эталонным, это может быть свидетельством исчезновения из хранилища даже небольшой коробочки с дорогостоящим препаратом (рис. 4).



Рис. 3 - Радар для наблюдения за водителем



Рис. 4 - Радар для охраны медикаментов

На сегодняшний день в медицинской практике не так часто можно встретить радиосистемы, возможно, это связано с необоснованной боязнью перед электромагнитным излучением, которое на самом деле на порядки меньше излучения от обычного сотового телефона. Бесконтактность и дистанционность таких систем, безусловно, в ближайшее время привет радиосистемы на медицинский рынок, как в виде систем потокового обследования, так и систем домашнего мониторинга здоровья.

Список литературы

1. B. Allen, T. Brown, K. Schwieger, E. Zimmermann, W. Q. Malik, D. J. Edwards, L. Ouvry, and I. Oppermann, Ultra wideband: applications, technology and future perspectives, in Proc. Int. Workshop Convergent Tech. Oulu, Finland, June 2005.
2. MIT educational project for the Radar Stethoscope, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, March 1995.
3. А.А. Баранов, Е.А. Вишнева, Л.С. Намазова-Баранова. Телемедицина — перспективы и трудности перед новым этапом развития. Педиатрическая фармакология. 2013; 10 (3): 6–11.
4. Enrico M. Staderini, "UWB radars in medicine," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 17, Issue 1, Page: 13-18, 2002.
5. Ian B. Wilkinson, Carmel M. McEniery. ARTERY Society guidelines for validation of non-invasive haemodynamic measurement devices: Part 1, arterial pulse wave velocity. Artery Research (2010) 4, 34-40.
6. «Биорадиолокация» Под редакцией А.С. Бугаева, С.И. Ивашова, И.Я. Иммогеева.

05.11.07

А.А. Талипов, К.С. Мельник

Казанский квантовый центр “КАИ-Квант”,
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева,
Казань, talipov.anvar@gmail.com

СПЕЦИФИКА ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ОДНО- И ДВУХФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-97-102

Фотонно-кристаллические волокна являются перспективной средой для генерации сигнального и холостого фотонов с низкими спектральными корреляциями. В работе рассмотрены и проанализированы особенности таких микроструктурированных волокон, а также определены основные условия генерации однофотонных состояний в источниках с использованием нелинейных волокон.

Ключевые слова: *фотонно-кристаллическое волокно, фотон, специальные условия синхронизма.*

Введение

В процессе спонтанного четырехволнового смешения (СЧВС) два фотона накачки рассеиваются и происходит генерация пары фотонов – сигнального и холостого. При СЧВС формируются смешанные однофотонные состояния, т.е. фотонные пары обладают пространственной, поляризационной и спектральной корреляциями [1]. Для формирования чистого однофотонного состояния необходимо устранение корреляций. Применение спектрально-ограниченных лазерных импульсов позволяет оптимизировать генерацию СЧВС с помощью перестройки длины волны и изменения ширины полосы частот импульсов. Способы устранения пространственных корреляций основаны на использовании нелинейных волноводов [2]. Применение микроструктурированных волокон позволяет сформировать пару фотонов с низкими спектральными корреляциями [3]. Фотонно-кристаллическое волокно (ФКВ) представляет собой оптическое волокно с оболочкой, состоящей из отверстий, заполненных воздухом, симметрично расположенных относительно сердцевины волокна [4]. Материалом сердцевины обычно является кварц. ФКВ позволяют активно формировать сложные частотные профили дисперсии. Геометрия волокна определяет нелинейные свойства и режим генерации СЧВС. Таким образом, для формирования одно- и двухфотонных состояний с различными характеристиками необходимо изучение особенностей ФКВ, используемых в качестве среды генерации пар фотонов.

1. Анализ ФКВ, используемых при генерации неклассических световых полей

ФКВ с высокой нелинейностью характеризуются относительно малым диаметром сердцевины и большими отверстиями. Данный тип оптических световодов позволяет получать нелинейные эффекты в волокнах даже небольшой длины. Оптические свойства сердцевины аналогичны свойствам стержня из стекла, окруженного воздухом. Это способствует сильному ограничению света и получению высокого коэффициента нелинейности. Подобрав размер сердцевины, нулевая дисперсия может быть выбрана в широком диапазоне видимого и ближнего ИК спектра. По сравнению со стандартными оптическими волокнами микроструктурированные волокна обладают следующими преимуществами при эффективной генерации нелинейных процессов: изменение свойств ДГС, сохранение поляризации, высокий коэффициент нелинейности в волокнах с небольшой сердцевиной, поддержка одиночной поперечной моды в широком диапазоне.

Коммерческое волокно NL-1.8-750 для формирования однофотонных состояний рассматривается в [5]. В ФКВ подавалась накачка с $\Delta\lambda_p = 4$ нм. и мощностью 1 мВт. от титан-

сапфирового лазера с импульсами 50 фс. при частоте повторения 76 МГц. В процессе перестройки накачки в диапазоне 765 – 795 нм. были зафиксированы сигнальная и холостая длины волн. Установить тип запутанности от коррелированного состояния до анти-коррелированного в пределах частоты лазера возможно с помощью рассчитанной кривой фазового синхронизма. Значение чистоты предвещающих фотонов, найденное с помощью теоретически рассчитанной совместной спектральной амплитуды, составило 86 %. Измеренное значение чистоты однофотонных состояний ограничено длиной ФКВ. Аналогичное нелинейное волокно наряду с NL-2.4-800 используется при генерации коррелированных фотонных боковых составляющих [6]. Лазерное излучение с центральной длиной волны накачки от 760 до 840 нм., шириной импульсов от 50 фс. до 5 пс. при частоте повторения 92 МГц., средней мощности до 600 мВт. фемтосекундного лазера от источника заводится в фотонно-кристаллическое волокно. Поляризационное состояние на выходе оптического волокна определяется измерением спектра прошедшего через ФКВ излучения в зависимости от угла размещенного за волокном поляризационного анализатора.

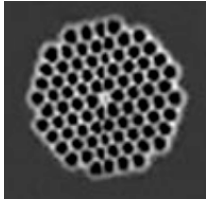
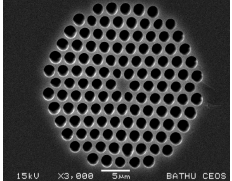
Специфическое микроструктурированное волокно с необходимыми для моделирования параметрами позволило в [3] рассчитать функции фазового синхронизма и огибающей накачки. Факторизуемое состояние определялось из пересечения контура фазового синхронизма с контуром согласования групповых скоростей. В работе [8] путем выбора размеров отверстий изготовлено несколько волокон с $\lambda_{\text{ZD}} \approx 800$ нм. и различным двулучепреломлением для генерации фотонов без фильтрации от отдельных волоконных источников. Общая эффективность детектирования равна 21% на фотон. Подбрав соответствующие значения сердцевины и отверстий осуществим контроль абсолютного и относительного показателей двух осей оптического волокна, что позволяет сделать оптимальное ФКВ для данного приложения. Благодаря отсутствию потерь фильтрации возможно разработать двухфотонный источник с высокой эффективностью одномодового соединения. Нелинейное волокно с сохранением поляризации находит применение в двухфотонном источнике, генерирующем пару на 684/807 нм. при накачке 742 нм. [9]. Разработанный источник характеризуется высокой яркостью, широким спектральным диапазоном и низким уровнем шума при комнатной температуре.

Фотоны, сгенерированные на телекоммуникационных длинах волн 1550 нм., эффективно могут передаваться по оптическим волокнам в квантовых системах передачи данных [10]. Фотоны, сгенерированные в области 800 нм., подходят для квантовой памяти [11]. Способы генерации значительно разделенных по длине волны сигнального и холостого фотонов позволяют сформировать такую фотонную пару. Отличительной чертой ФКВ используемых в данных способах является большой диаметр сердцевины, а также низкая доля заполнения воздуха, что позволяет поддерживать “бесконечный” одномодовый режим и достаточно легко сращивать с обычными SMF волокнами. Однофотонный источник с разделением фотонов и узкополосной фильтрацией в самом волокне показан в [12]. Скорость предвещения одиночных фотонов на выходе составила 9.2×10^4 в секунду при отношении совпадений $\text{CAR}=10.4$ и точности предвещения 52 %. Для генерации пары фотонов на длинах волн 800 нм. и 1570 нм. при накачке 1064 нм. было спроектировано ФКВ с длиной волны нулевой дисперсии 1087 нм., сердцевиной диаметром 5 мкм. и отношением диаметра отверстий к расстоянию между ними d/Λ 0.33. В работе [13] генерация значительно разделенных по длине волны фотонов осуществляется в микроструктурированном волокне с длиной волны нулевой дисперсии 1092 нм. Лазерный источник генерирует 300 пс. импульсы на длине волны 1064 нм. с частотой повторения 100 МГц. Излучение передается в микроструктурированное волокно длиной 10 м. Сгенерированные фотоны на длинах волн 810 нм. и 1548 нм. разделяются с помощью дихроичного зеркала. Неклассический характер источника фотонов подтверждается результатами измерений автокорреляционной функции второго порядка $g^{(2)}(0)$. В [14] нами в программной среде Comsol Multiphysics смоделировано ФКВ гексагональной структуры с диаметром сердцевины 2.4 ± 0.1 мкм., расстоянием между отверстиями 2.9 ± 0.1 мкм., диаметром полой области 27 ± 0.5 мкм., что соответствует коммерческим волок-

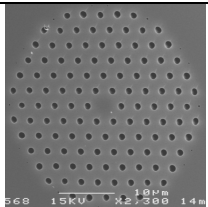
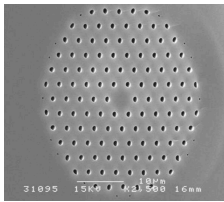
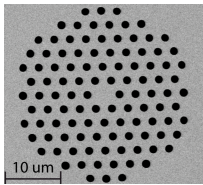
нам с нулевой дисперсией на 800 нм. Полученные значения позволили рассчитать условия синхронизма и совместную спектральную амплитуду для сигнального и холостого фотонов. Найден перспективный режим с накачкой 734 нм. на длинах волн фотонов 1550 нм. и 480 нм., с числом Шмидта 1.0451, показывающим крайне низкую спектральную корреляцию.

Для приготовления широкополосных однофотонных состояний эффективным подходом может стать применение нелинейных световодов с “плоской” нулевой дисперсией в диапазоне 1.2 – 1.7 мкм. [15]. Данный эффект достигается путем внесения дефекта в сердцевину волокна. В последнее время появился альтернативный подход к генерации пар фотонов: ФКВ с поллой сердцевиной, заполненной жидкостью или газом. В [16] в ФКВ с $\lambda_{ZD} \approx 770$ нм., с поллой сердцевиной диаметром 18,5 мкм. и толщиной стенки 240 нм., заполненной аргоном, заводится излучение от фемтосекундного лазера. Сигнальный и холостой спектры детектируются на выходе с помощью спектрометра. Посредством изменения давления газа возможно получить необходимый фазовый синхронизм. Генерация фотонной пары на длинах волн телекоммуникационной полосы в ФКВ с поллой сердцевиной, заполненной фтороуглеродной жидкостью, показана в [17]. Рассмотрев различные комбинации полых волокон (HC2300, HC2000, HC1550PM) и фтороуглеродной жидкости (FC3283, FC75, FC72) удалось найти оптимальный вариант (HC2300- FC3283) при котором коэффициент преломления жидкости равен 1,28 и нулевая дисперсия близка к области 1550 нм. Рассчитав кривую фазового синхронизма найдены свободные от воздействия Рамановского шума зоны, где происходит наиболее эффективная генерация сигнального и холостого фотонов.

Таблица 1 – Различные типы ФКВ, применяемых при генерации неклассических состояний света

ФКВ	Параметры	Особенности	Вид поперечного сечения ОВ	Длина волны фотонной пары, нм.	Литература
1	2	3	4	5	6
Микростр.	$r=0.616$ мкм. $d/p=0.6$ $L=30$ см. $\gamma = 70$ [Вт. км.] ⁻¹	параметрическая генерация в диапазоне $\lambda z d_{1,2}$ 0.668 - 1.132 мкм.	—	464/1551 (736/960)	[3]
NL-1.8-750	ДГС=750 нм., 1110 нм. $\gamma = 99$ [Вт.км.] ⁻¹ $L=40$ см.	- небольшая площадь модового поля - высокий нелинейный коэффициент - λ_{ZD} в видимом диапазоне		720/860	[5]
Микростр.	$r=1.7$ мкм. $L=5.8$ м. $\gamma = 97.5$ [Вт.км.] ⁻¹ - нулевая дисперсия ~ 750 нм.	- потери 86 дБ/км - длина волны отсечки < 530 нм.	—	~ 737/761	[7]
Микростр.	$d \sim 2.2$ мкм. $L=40$ см - нулевая дисперсия ~ 800 нм.	- гексагональная структура - высокое отношение d/p		597/860	[8]

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6
Нелинейное волокно с поддержанием поляризации	L=1.8 м. - нулевая дисперсия ~ 750 нм.	- сохранение поляризации	—	684/807 (704/ 780)	[9]
ФКВ с одномодовым режимом	d=1.16 мкм. p=2.97 d/p=0.39 - нулевая диспер- сия на 1065 нм.	- одномодовое во всем рабочем диапазоне - потери < 5 дБ/км на 1500 нм		839/1392	[10]
ФКВ с большим диаметром сердцевины	r=5 мкм. d/p=0.33 - нулевая диспер- сия на 1087 нм. $\gamma \sim 7[\text{Вт.км.}]^{-1}$	- “бесконечно” одномодовый режим распространения		800/ 1570	[12]
ФКВ с низким отношением d/p	D=1092 нм. L = 10 м.	- гексагональная структура - низкая доля заполнения воздуха		810/1548	[13]

2. Определение основных условий генерации однофотонных состояний в источниках с ФКВ

Однофотонный волновой пакет описывается выражением 1 [18]:

$$|\psi\rangle = \sum_q \int dk F_q(k) a_{kq}^+ |0\rangle, \quad \sum_q \int dk |F_q(k)|^2 = 1 \quad (1)$$

где a_{kq}^+ – оператор рождения фотона в моде плоской волны, k – волновой вектор, q – индекс задающий поляризацию, F – амплитуда однофотонного состояния.

Качество однофотонного источника определяется соответствием состояния на выходе состоянию, которое необходимо сформировать. F равняется 1 при полном соответствии, и 0 при максимальном расхождении. В практических экспериментах измеряется значение автокорреляционной функции поля при нулевой задержке $g^{(2)}(0)$.

$$F = \langle \psi | \rho | \psi \rangle \quad (2)$$

где F – качество источника, ρ – оператор плотности, описывающий состояние на выходе; $|\psi\rangle$ – вектор, задающий целевое состояние.

Эффективный однофотонный источник характеризуется большой скоростью генерации фотонов, чистотой формируемого состояния, высокой детерминированностью, возможностью перестройки длины волны. Применение узкополосной спектральной фильтрации позволяет уменьшить корреляции между длинами волн дочерних фотонов, но вместе с тем возрастают потери, вытекающие в ослаблении яркости однофотонного источника и понижении эффективности предвещения фотонов.

Генерация сигнального и холостого фотонов происходит в соответствии с условиями фазового синхронизма и законом сохранения энергии [19,20]:

$$2w_p = w_s + w_i \quad (3)$$

$$\Delta k = 2k(w_p) - k(w_s) - k(w_i) - 2\gamma P_p \quad (4)$$

где $w_{p,s,i}$ и $k_{p,s,i}$ – частота и волновой вектор сигнального, холостого фотонов, и фотона накачки соответственно, Δk – коэффициент, определяющий расстройку волнового вектора, γ – нелинейный коэффициент волокна, P – пиковая мощность накачки.

При равенстве фазового рассогласования нулю вероятность генерации фотонной пары достигает оптимального уровня и увеличивается по всей длине волокна. Для области аномальной дисперсии $2k_p > k_s + k_i$, а слагаемое $2\gamma P_p$ может быть использовано для компенсации фазового рассогласования. Тогда разделение боковых составляющих зависит от мощности накачки. Для области нормальной дисперсии $2k_p < k_s + k_i$, а сигнальная и холостая длины волны согласованы по фазе и строго не зависят от мощности накачки, но подвержены влиянию изменений длины волны накачки.

Функция совместной спектральной амплитуды, описывающая спектральные и корреляционные свойства фотонной пары, может быть выражена как произведение огибающей накачки и функции фазового синхронизма

$$f(w_s, w_i) = a(w_s, w_i) \times \phi(w_s, w_i) \quad (5)$$

Тогда совместная спектральная интенсивность, которая пропорциональна вероятности рождения фотона в паре на соответствующей частоте, запишется как

$$F(w_s, w_i) = |f(w_s, w_i)|^2 \quad (6)$$

При фазовой самомодуляции спектральное уширение накачки незначительно. Функции огибающей накачки и фазового синхронизма возможно представить в виде

$$a(w_s, w_i) = \exp \left[-\frac{(w_s + w_i - 2w_{pc})^2}{4\sigma_p^2} \right] \quad (7)$$

$$\phi(w_s, w_i) = L \sin c \left(\frac{\Delta k L}{2} \right) \exp \left(\frac{\Delta k L}{2} \right) \quad (8)$$

где w_{pc} – центральная частота накачки, σ_p – ширина полосы накачки, L – длина ФКВ.

Факторизуемое состояние, а также различные режимы генерации сигнального и холостого фотонов с низкими спектральными корреляциями, определяются из рассчитанной совместной спектральной амплитуды, как перекрытие функций волокна и накачки.

Заключение

В данной статье выявлены и проанализированы ключевые особенности фотонно-кристаллических волокон, используемых при генерации неклассических состояний света. В одно- и двухфотонных источниках наряду с коммерческими нелинейными волокнами применяются специально изготовленные микроструктурированные волокна с подобранными к конкретному способу генерации параметрами. Дальнейшее развитие эффективных подходов к генерации неклассических световых полей связано с использованием новых типов фотонно-кристаллических волокон. Определены основные условия приготовления однофотонных состояний с применением в качестве среды генерации фотонов нелинейного волокна.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60054 мол_а_дк.

Список литературы

1. *Migdall A.* Single-Photon Generation and detection. Experimental Methods in the Physical Sciences / A. Migdall, S.V. Polyakov, J. Fan, J.C. Bienfang // Elsevier, Oxford, 2013. – 624 p.
2. *Krapick S.* An Efficient Integrated Two-Color Source for Heralded Single Photons / S. Krapick, H. Herrmann, V. Quiring, B. Brecht, H. Suche, and C. Silberhorn // New J. Phys. – 2013, V.15, 033010
3. *Garay-Palmett K.* Photon pair-state preparation with tailored spectral properties by spontaneous four-wave mixing in photonic-crystal fiber / K. Garay-Palmett, H. J. McGuinness, O. Cohen, J. S. Lundeen et. al. // Opt. Express. – 2007, Vol. 15, P. 14870-14886.
4. *Желтиков А.М.* Микроструктурированные световоды для нового поколения волоконно-оптических источников и преобразователей световых импульсов / А. М. Желтиков // Успехи физических наук. – 2007, Т. 177, № 7, С.738-762.
5. *Cohen O.* Tailored photon-pair generation in optical fibers / O. Cohen, R. Erdmann, M. De la Cruz, I. A. Walmsley // Phys. Rev. Lett. – 2009, 102, 123603.
6. *Petrov N.L.* Polarization map of correlated sideband generation in vectorial four-wave mixing / N.L. Petrov, A.A. Voronin, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov // Applied Physics Letters – 2017, V. 110, № 18, doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4982209>.
7. *Sharping J.E.* Quantum-correlated twin photons from microstructure fiber / J.E. Sharping, J. Chen, X. Li, P. Kumar // Opt. Express. – 2004, Vol. 12, P. 3086-3094.
8. *Halder M.* Nonclassical 2-photon interference with separate intrinsically narrowband fibre sources / M. Halder, J. Fulconis, B. Cerny, A. Clark, C. Xiong, W. J. Wadsworth, J. G. Rarity // Opt. Express. – 2009, Vol. 17, P. 4670-4676.
9. *Fan J.* A broadband high spectral brightness fiber-based two-photon source / J. Fan, A. Migdall // Opt. Express. – 2007, Vol. 15, № 6, P. 2915-2920.
10. *Rarity J.* Photonic crystal fiber source of correlated photon pairs / J. G. Rarity, J. Fulconis, J. Duligall, W. J. Wadsworth, and P. St. J. Russell // Opt. Express. – 2005, Vol. 13, № 2, P. 534-544.
11. *Brennen G.* Focus on Quantum Memory / G. Brennen, E. Giacobino, C. Simon // New J. Phys. – 2015, V. 17, P. 050201 (4).
12. *McMillan A.R.* Narrowband High-Fidelity All-Fibre Source of Heralded Single Photons at 1570 nm. / McMillan A.R., Fulconis J., Halder M., Xiong C., Rarity J.G., Wadsworth W.J. // Opt. Express. – 2009, Vol. 17, № 8, P. 6156–6165.
13. *Slater J.A.* A microstructured fiber source of photon pairs at widely separated wavelengths / J.A. Slater, J.-S. Corbeil, S. Virally, F. Bussieres et. al. // Opt. Lett. – 2010, Vol. 35, № 4, P. 499-501.
14. *Talipov A.A.* Generation of pure single-photon states in commercial photonic-crystal fibers on telecommunication frequencies / A.A. Talipov, A.G. Shmelev, A.A. Shukhin, I.Z. Latypov // Nanosystems: Physics, chemistry, mathematics. – 2017, 8(3), P. 347-350.
15. *Haque A.T.* Study and analysis of dispersion, effective area and nonlinear properties of photonic crystal fibers at different doping concentration / A.T. Haque, Md. Al-Mamun Sabuz, M.H. Shimanto, Md. Afzal Hossain // 2014, thesis for degree of bachelor of science.
16. *Finger M.A.* Characterization and shaping of the time-frequency Schmidt mode spectrum of bright twin beams / M. A. Finger, N. Y. Joly, P. St. J. Russell, M. V. Chekhova // Physical Review A – 2017, V. 95, № 5, 053814.
17. *Cordier M.* Raman tailored photonic-crystal-fiber for telecom band photon-pair generation / M. Cordier, A. Orieux, R. Gabet, T. Harle, N. Dubreuil, E. Diamanti, P. Delaye, I. Zaquine // Optics Letters – 2017, V. 42, № 13, P. 2583-2586.
18. *Калачев А.А.* Спонтанное параметрическое рассеяние и задачи квантовой информатики: учеб.-метод. пос. / Казань: Казанский. ун-т, 2012. – 45 с.: ил.
19. *Alibart O.* Photon pair generation using four-wave mixing in a microstructured fibre: theory versus experiment / O. Alibart, J. Fulconis, G.K.L. Wong, S.G. Murdoch, W.J. Wadsworth and J.G. Rarity // New Journal of Physics. – 2006, V. 8, P. (21).
20. *Cui L.* Spectral properties of photon pairs generated by spontaneous four wave mixing in inhomogeneous photonic crystal fibers / L.Cui, X.Li, N.Zhao//Proceedings of the International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim – 2011, I1021.

05.11.06

В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, В.В. Педдер, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Г.А. Боброва,
Р.С. Доровских, В.А. Шакура

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»,
Бийск, grn@bti.secna.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСТРАКЦИИ РАНЕВОГО СОДЕРЖИМОГО НА БАЗЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-103-105

В работе представлены результаты теоретических исследований обратного ультразвукового капиллярного эффекта, предназначенного для экстракции раневого содержимого из послеоперационных ран. Проведённые исследования позволили установить, что для обеспечения наибольшей скорости экстракции и безопасности для человека амплитуда ультразвуковых колебаний не должна превышать 90 мкм.

Ключевые слова: ультразвук, раневая инфекция, расклинивающее давление, капиллярный эффект.

В 35-45 % случаев у пациентов хирургических стационаров и больных онкологического профиля проявляется раневая инфекция, что в последующем приводит к послеоперационным раневым осложнениям, которые сопровождаются синдромом эндогенной интоксикации [1]. Одним из перспективных подходов к местному удалению раневого содержимого, включающего ЭТ, является возможность использования энергии ультразвука (УЗ). УЗ колебания инициируют «обратный» ультразвуковой капиллярный эффект (ОУзКЭ) [2], который в свою очередь вызывает массоперенос содержимого пор и капилляров биоткани на поверхность раны. Для выявления оптимальных режимов и условий УЗ воздействия необходимо провести теоретический анализ процесса УЗ экстракции раневого содержимого.

Теоретически рассматриваемый массообменный процесс в биоткани – капиллярно-пористой системе «жидкость-твёрдое тело» – может быть схематично представлен следующим образом (рис. 1).

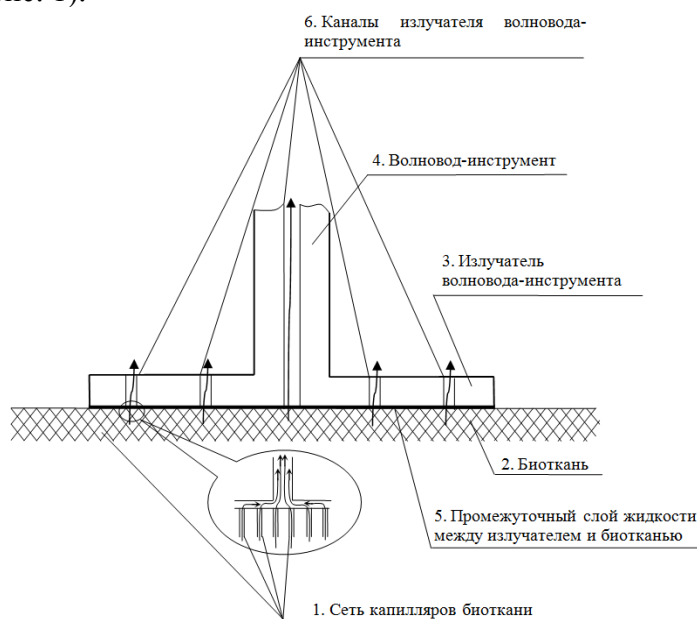


Рис. 1 – Схематичное изображение массообменного процесса в биоткани при контактном УЗ воздействии.

Для определения оптимальных режимов и условий воздействия, обеспечивающих реализацию данного процесса с максимальной эффективностью, течение раневого содержимого описывается уравнениями Навье-Стокса с граничными условиями равенства расходов и давлений раневого содержимого (на сторонах промежуточного слоя и биоткани) на поверхности биоткани. Решение данной системы уравнений позволяет рассчитать совокупную скорость экстракции в зависимости от режимов и условий воздействия на основании выражения (1):

$$G = N \frac{\pi d^2}{4} \langle V \rangle \rho; \quad (1)$$

где N – количество дренажных каналов в излучателе волновода-инструмента; d – диаметр отдельного канала, м; $\langle V \rangle$ – усредненная скорость экстракции патологического содержимого по сечению отдельного дренажного канала, м/с; ρ – плотность раневого содержимого, кг/м³.

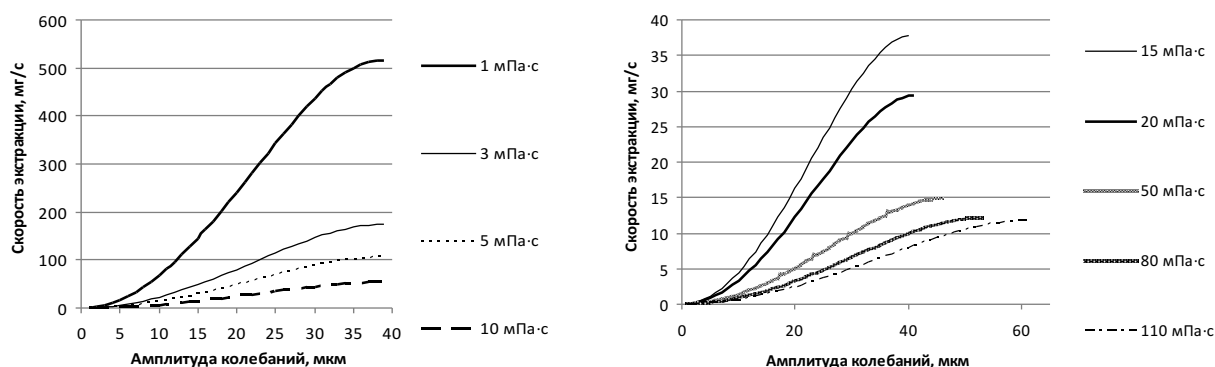
Далее представлено выражение (2) для силы, действующей на жидкость в единичном капилляре и учитываемой в уравнениях Навье-Стокса течения раневого содержимого, которое выглядит следующим образом:

$$F = \left[\left(\frac{\partial h}{\partial \Pi} \left[\frac{1}{\varepsilon_{10}^2} - \frac{\ln \varepsilon_{10}}{\varepsilon_{10}^2} \right] \frac{A_0}{A_1 + p_0} \right)^2 \times (6\pi k q_e n_0^2 N_A h^2 z \rho_2)^2 \times \right. \\ \left. \times \frac{\pi d^2 c_2^2 V_0^2}{2} \times \left(\frac{\rho_2 (\omega z_0)^2}{4R^2} + \frac{\sigma \cos \theta}{R^3} \right) + \frac{\sigma \cos \theta}{R} \left(\frac{4\nu}{\omega^2} \right)^2 \right]; \quad (2)$$

где z – валентность ионов в полимолекулярной плёнке; F – число Фарадея, равное 96485,33(85) Кл/моль; k – электростатическая постоянная, равная $9 \cdot 10^9$ Дж·м/Кл²; q_e – заряд иона, $1,6 \cdot 10^{19}$ Кл; ε_{10} – диэлектрическая проницаемость жидкости в капилляре; N_A – число Авогадро, равное $6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; n_0 – концентрация ионов на границе между полимолекулярной плёнкой жидкости и внутренней полостью капилляра, моль/м³; h – толщина полимолекулярной плёнки, м; Π – расклинивающее давление в плёнке, Па; d – диаметр капилляра, м; c_2 – скорость звука в раневом содержимом, м/с; V_0 – амплитуда колебательной скорости раневого содержимого, м/с; ρ_2 – плотность раневого содержимого, кг/м³; A_0 (безразмерный) и A_1 (Па) – постоянные коэффициенты, определяющие зависимость диэлектрической проницаемости жидкой фазы от давления; σ – поверхностное натяжение раневого содержимого, Н/м; θ – угол смачивания между границей мениска и стенкой капилляра; ω – круговая частота УЗ колебаний, с⁻¹; z_0 – длина капилляра, м; ν – коэффициент Пуассона биоткани.

Проведённый расчёт скорости экстракции в зависимости от условий воздействия с помощью предложенной модели позволил установить, что наиболее целесообразным является воздействие с помощью волновода-инструмента, содержащего не менее 12 каналов на излучающей поверхности площадью 20 см². Это обусловлено тем, что в данном случае скорость экстракции превышает 95% от максимально возможной.

Далее представлены зависимости совокупной скорости экстракции от амплитуды колебаний излучателя волновода-инструмента при частоте $f = 23,85$ кГц, выполненного в виде диска площадью 20 см² (диаметр 50 мм), содержащего 12 дренажных каналов при разных вязкостях и поверхностных натяжениях экстрагируемой жидкости (рис. 2).



а) для диапазона вязкостей 1...10 мПа·с

б) для диапазона вязкостей 15...110 мПа·с

Рис. 2 – Зависимости скорости экстракции от амплитуды колебаний излучателя волновода-инструмента при различных вязкостях раневого содержимого (поверхностное натяжение 72 Н/м).

В частности, раневого содержимого, близкого по физическим свойствам к воде, обладающей малой вязкостью (1 мПа·с) и поверхностным натяжением 72 Н/м, скорость экстракции достигает 500 мг/с при амплитуде не более 35 мкм. А при амплитуде 12 мкм скорость экстракции составляет 100 мг/с. В то время как для раневого содержимого, по вязкости близкого к детриту (110 мПа·с), скорость экстракции достигает 60 мг/с.

Кроме того, представленные зависимости свидетельствуют о квадратичном росте скорости экстракции с увеличением амплитуды колебаний излучателя волновода-инструмента. Однако, начиная с некоторого порогового значения амплитуды, составляющего 39 мкм для жидкой среды вязкостью 1 мПа·с и поверхностным натяжением 72 Н/м, рост скорости экстракции прекращается из-за реализации кавитационного режима [3]. Это обусловлено действием сил Бьеркнеса на кавитационное облако вблизи поверхности озвучиваемой биоткани, препятствующих экстракции. Поэтому исходя из полученных зависимостей, для озвучивания биотканей с раневым содержимым, имеющим вязкость в диапазоне 1...110 мПа·с, амплитуда не должна превышать 90 мкм.

Полученные результаты служат основой для выбора оптимальных режимов и условий УЗ воздействия, необходимых для обеспечения требуемой производительности экстракции в составе специализированных медицинских аппаратов для хирургии и консервативной терапии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 17-08-00227 А.

Список литературы

1. Косёнок, В.К. Новые подходы в паллиативном лечении больных злокачественными новообразованиями [Текст] / В.К. Косёнок, В.В. Педдер, В.Н. Мироненко, М.В. Набока, Н.В. Румянцев, Г.З. Рот, С.П. Попова, И.В. Сургутскова // Паллиативная медицина и реабилитация. – М.: Паллиативная медицина и реабилитация больных, 2008. – С. 5-11.
2. Педдер, В.В. «Обратный» ультразвуковой капиллярный эффект и его использование в хирургии [Текст] / В.В. Педдер и др. // «Проблемы техники в медицине». Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции – Тбилиси, 1986. – С. 90-91.
3. Хмелёв, В.Н. Выявление оптимальных режимов и условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких жидкостей [Текст] / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, С.С. Хмелёв, К.А. Карзакова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – №2. – С.249-251.

05.11.06

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Р.С. Доровских, Р.Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»,
Бийск, grn@bti.secna.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВТОРОСТЕПЕННЫХ МОД КОЛЕБАНИЙ НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-106-108

Статья посвящена исследованию влияния второстепенных мод колебаний на равномерность распределения рабочей кольцевой моды ультразвуковых дисковых излучателей. В статье рассматриваются методы, позволяющих уменьшить количество вторичных мод колебаний в исследуемом диапазоне частот, которые могут оказать влияние на равномерность распределения колебаний кольцевой моды при наложении их друг на друга.

Ключевые слова: ультразвуковой дисковый излучатель, коагуляция, пеногашение, мода колебаний, равномерность распределения.

В настоящее время применение ультразвуковых колебаний для интенсификации различных технологических процессов, протекающих в газовых средах, является одним из перспективных способов повышения их эффективности. Наиболее распространенными процессами на данный момент являются процессы коагуляции, сушки, пеногашения и распылений жидкостей [1-2]. Для повышения эффективности перечисленных процессов необходимо увеличивать интенсивность ультразвукового воздействия на среды, при этом для достижения высокой эффективности интенсифицируемого технологического процесса необходимо обеспечивать определенный вид излучаемой ультразвуковой волны в газовую среду. Поэтому необходимо создание ультразвуковых излучателей обеспечивающих требуемое распределение УЗ поля в газовой среде [3]. Излучатели в виде дисков являются наиболее оптимальными для создания ультразвукового воздействия с заданными характеристиками. Однако существующие на данный момент конструкции не отвечают заданным требованиям и не позволяют интенсифицировать технологические процессы в промышленных масштабах из-за небольшой поверхности излучения и недостаточного уровня звукового давления. Поэтому исследования в области разработки дисковых излучателей больших диаметров (более 350 мм) не теряют своей актуальности.

При разработке конструкций дисковых излучателей большого диаметра особое внимание необходимо уделять обеспечению равномерности распределения амплитуд колебаний. С увеличением диаметра дискового излучателя распределение становится неравномерным, что может привести к разрушению конструкции, а также снижению эффективности воздействия. Для нахождения и расчета форм колебаний дисковых излучателей в основном используются современные программные средства, реализующие метод конечных элементов, которые позволяют быстро и точно рассчитать полученные модели. Это позволяет уменьшить время и материальные затраты при проектировании излучателей. Вследствие появления дополнительных резонансных явлений на практике возможно формирование второстепенных соседних мод колебаний, наложение которых может повлиять на эффективность излучения дисковых излучателей, что в свою очередь может привести к снижению равномерности колебаний и увеличению максимальных напряжений. Таким образом, для учета указанных факторов производится модальный конечно-элементный

анализ при этом рассматривается трехмерная неосесимметричная задача. По результатам каждого из расчетов анализируется найденная кольцевая мода колебаний, при этом проводится анализ соседних второстепенных мод. В общем виде схематичное изображение конструкции дискового излучателя показано на рис. 1.

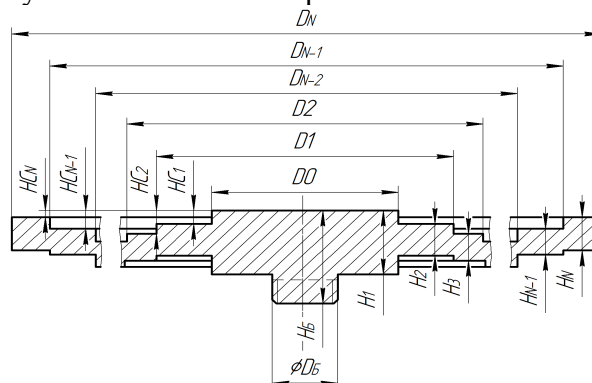


Рис. 1 – Эскиз изгибно-колеблющегося дискового излучателя с обозначением его геометрических параметров

Конструктивно ультразвуковой дисковый излучатель имеет фронтальную сторону, которая рассчитывается под определенный вид излучения (распределение уровня звукового в среде должно обеспечивать высокую эффективность интенсификации определенного процесса) и тыльную сторону, конструкция которой обеспечивает корректировку амплитуд колебаний соответствующих участков. Конструкция профиля фронтальной стороны зависит от диаметров кольцевых элементов (D_0 – D_N) и соответствующих им высот (H_{C1} – H_{CN}). Конструкция профиля тыльной стороны зависит от диаметров кольцевых элементов (D_0 – D_N) и соответствующих им высот (H_1 – H_N). При расчете дисковых излучателей модальный анализ обычно показывает большое количество мод колебаний, из которых выбирается требуемая кольцевая изгибно-колеблющаяся мода.

Остальные моды считаются второстепенными, которые в определенном частотном диапазоне могут оказывать дополнительное отрицательное влияние на распределение колебаний искомой кольцевой моды. На рис. 2 показаны различные моды колебаний дискового излучателя, в том числе второстепенные. Для пояснения эффекта наложения различных мод колебаний друг на друга приведены различные распределения колебаний дискового излучателя.

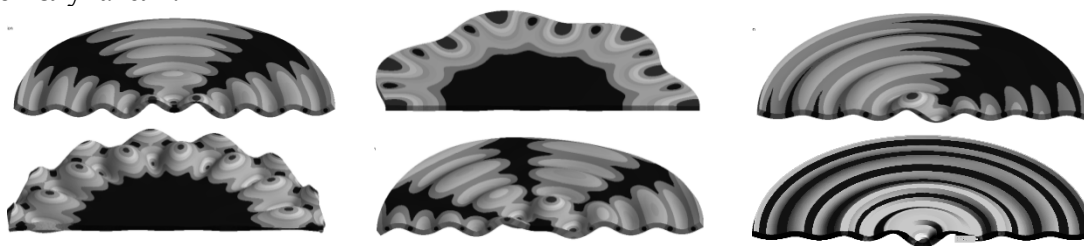


Рис. 2 – Различные виды распределений колебаний дискового излучателя

На рис. 3 а показана форма колебаний кольцевой изгибно-колеблющейся моды (частота 24056 Гц), на рис. 3 б показана форма колебаний второстепенной моды (частота 24127 Гц), рис. 3 в – результирующая форма колебаний (частота 24210).

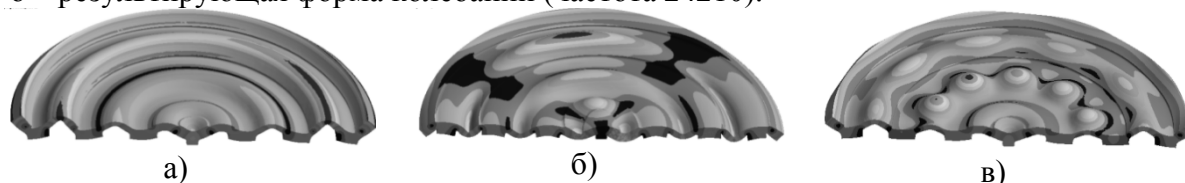


Рис. 3 – Форма колебаний дискового излучателя при наложении кольцевой изгибно-колеблющейся моды и второстепенной моды

Анализ результатов компьютерного моделирования позволяет судить о том, что близко расположенная по частоте (разница менее 100 Гц) второстепенная мода снижает равномерность распределения кольцевой моды. Как видно, на кольцевую моду (рис. 3 а) накладывается второстепенная мода (рис. 3 б), таким образом, получается результирующее распределение (рис. 3 в). Анализ результатов показал, что для обеспечения равномерности распределения амплитуды необходимо, чтобы разность частот между рабочей кольцевой изгибно-колеблющейся модой колебаний и соседними второстепенными модами должна составлять не менее 500 Гц. Иначе возможно наложение соседней второстепенной моды и рабочей кольцевой моды, что может привести к снижению равномерности распределения амплитуд колебаний. Таким образом, для увеличения разности частот искомой моды и второстепенной необходимо определить природу ее появления и способ (конструктивную особенность или геометрические размеры определенного элемента излучателя) изменения ее резонансной частоты, анализируя их. При этом резонансная частота различных второстепенных мод может существенно зависеть от геометрических размеров того или иного кольцевого участка, изменение которых несущественно повлияет на резонансную частоту рабочей кольцевой моды дискового излучателя в целом. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для изменения частоты какой либо второстепенной моды с целью увеличения разницы между ее частотой и частотой кольцевой изгибно-колеблющейся моды необходимо определить причину появления ее именно в данном частотном диапазоне. Для этого необходимо выявить элементы, от геометрических размеров которых в большей степени зависит ее частота.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60082 мол_а_дк и стипендии Президента РФ № СП-4173.2016.1.

Список литературы

1. *Khmelev V.N.* Increase of separation efficiency in the inertial gas-purifying equipment by high-intensity ultrasonic vibrations [Текст] / V.N. Khmelev, V.A. Nesterov, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, R.S. Dorovskikh // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2014. - P. 233-239.
2. *Khmelev, V.N.* The control of the ultrasonic coagulation of dispersed nanoscale particles [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, A.N. Galakhov, R.N. Golykh, M.V. Khmelev // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2013: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P. 166–170.
3. *Khmelev, V.N.* Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM – Novosibirsk: NSTU, 2015. – P 224 – 228.

05.11.13

Р.В. Цветков, В.В. Епин

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЕГМЕНТНОМ ГИДРОНИВЕЛИРЕ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-109-111

В работе представлены методика и результаты экспериментальных исследований переходных процессов в многосегментном гидронивелире. Проведено сравнение результатов экспериментов с численными расчетами на основе предложенной ранее модели. Показано, что модель позволяет удовлетворительно оценивать характер переходных процессов в многосегментных гидростатических нивелирах.

Ключевые слова: гидростатический нивелир, уровень жидкости, переходные процессы.

Приборы и измерительные системы на основе метода гидростатического нивелирования применяются для контроля вертикальных перемещений и наклонов различных объектов. Гидростатический нивелир состоит из системы сообщающихся сосудов с жидкостью находящихся в поле силы тяжести. Изменение высоты уровня жидкости в измерительных сосудах нивелира определит вертикальные перемещения сосудов относительно других. При проектировании распределенных гидростатических измерительных систем представляет интерес исследование переходных процессов движения жидкости в многосегментном гидронивелире, поскольку эти процессы определяют характеристики прибора.

В общем случае движение жидкости в нивелире в поле силы тяжести можно описать уравнением Навье-Стокса. Однако для распределенных нивелиров численная реализация этого метода потребует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому для оценок переходных процессов применяют различные упрощенные модели [1, 2, 3]. Ранее в наших работах [4, 5] была предложена гидравлическая модель поведения жидкости, обладающей вязкостью и плотностью, в нивелире с абсолютно жесткими стенками.

Натурные эксперименты на нивелирах разных конфигураций являются лучшим способом проверки адекватности разработанных ранее моделей. Поэтому проведение экспериментов на нивелирах с различной топологией представляется актуальным.

Для проведения экспериментов были использованы нивелиры нескольких конфигураций, которые представляют собой совокупность измерительных сосудов, соединенных между собой шлангами разной длины. Длины шлангов выбирались в диапазоне десятков метров, что соответствует реальным размерам нивелиров. Фрагмент нивелира, состоящий из четырех измерительных сосудов к которым подсоединены соединительные трубки показан на рис. 1. Для соединения 1 и 4 сосуда также можно использовать трубку и при этом нивелир окажется замкнутым в контур. Эксперимент проводился в несколько этапов при температуре 21-23 °С, в качестве жидкости была использована вода.

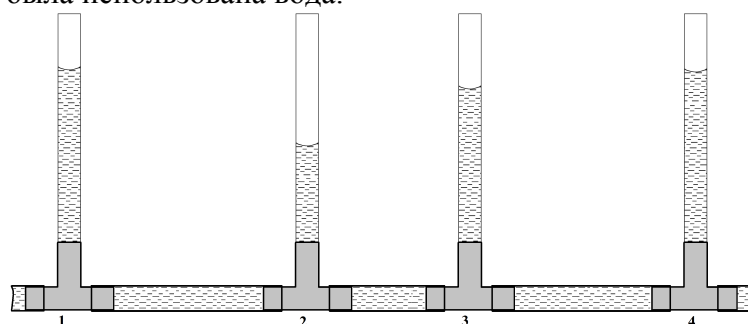


Рис. 1 – Нивелир с четырьмя измерительными сосудами

Измерительный сосуд во всех представленных экспериментах представлял собой прозрачную стеклянную трубку внутренним диаметром 10 мм. Средняя высота жидкости в сосуде составляла 150 мм. Измерение уровня воды в измерительных сосудах производилась с использованием ip-камер, которые осуществляли одновременную видео фиксацию данных. Диапазон и разрешение данного "датчика" будет определяться типом камеры и ее положением относительно трубки. Подробно с процедурой распознавания уровня жидкости и возникающих погрешностях можно ознакомиться в работе [6]. В данном эксперименте диапазон фиксируемого изменения поднятия воды в трубке составлял ± 40 мм, с разрешением 0.17 мм.

В проведенных экспериментах использовались 4 измерительных сосуда (датчика), связанных между собой шлангом ПВХ, армированным нитью. Такой шланг серии 032MT имеет стабильное по длине сечение и не подвержен перегибам. Для начального возмущения с помощью давления воздуха устанавливалась жидкость на различном уровне, а затем давление над датчиками выравнивалось. Таким образом из-за разности высот столбов жидкости в измерительных сосудах возникали затухающие колебания. Эти характерные времена и характеристики регистрирующей аппаратуры определили уровень начальных возмущений и время фиксации эксперимента. Для каждой конфигурации нивелира проводились несколько экспериментов с разными начальными условиями.

Для сравнения эксперимента с представленной в [5] моделью произведены численные расчеты со следующими начальными условиями: высоты столбов жидкости в измерительных сосудах №1-4 соответствуют наблюдаемым в экспериментах и начальные скорости жидкости во всех сегментах равны нулю. Для жидкости были взяты следующие параметры: плотность 998 кг/м^3 и вязкость $0.001 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Первая экспериментальная конфигурация представляла собой незамкнутый нивелир с соединительной трубкой, которая имеет внутренний диаметр 12.5 мм. Длины сегментов между датчиками №1, 2, 3, 4 составили, соответственно 34, 22, 28.7 м.

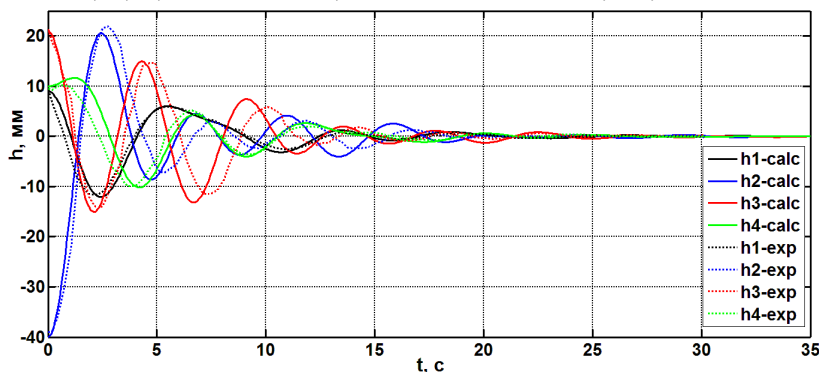


Рис. 2 – Результаты изменения уровня жидкости при эксперименте с первой конфигурацией нивелира

На рис. 2 представлены результаты одного из испытаний для первой конфигурации нивелира. Графики соответствуют изменениям уровня жидкости в нивелире: экспериментальные результаты показаны штриховой линией, а расчетные результаты – сплошной линией. Модель удовлетворительно оценивает характер переходных процессов в нивелире, однако наблюдаемые в эксперименте периоды колебаний оказываются несколько больше расчетных ($\sim 10\%$).

Вторая экспериментальная конфигурация представляла собой нивелир, с аналогичными параметрами, но замкнутый в кольцо. Длина дополнительной трубки между датчиком 1 и 4 составляла 48 м.

На рис. 3 аналогично представлены результаты одного из испытаний для второй конфигурации нивелира. Наблюдается схожая с предыдущим экспериментом картина.

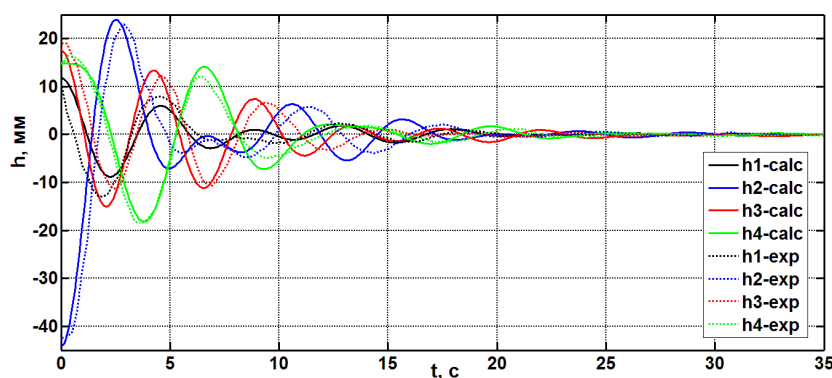


Рис. 3 – Результаты изменения уровня жидкости при эксперименте с второй конфигурацией нивелира

Третья экспериментальная конфигурация представляла собой незамкнутый в контур нивелир, в котором соединительная трубка имела внутренний диаметр 8 мм. Длины сегментов между датчиками №1, 2, 3, 4 составили соответственно 50.7, 28, 22 м.

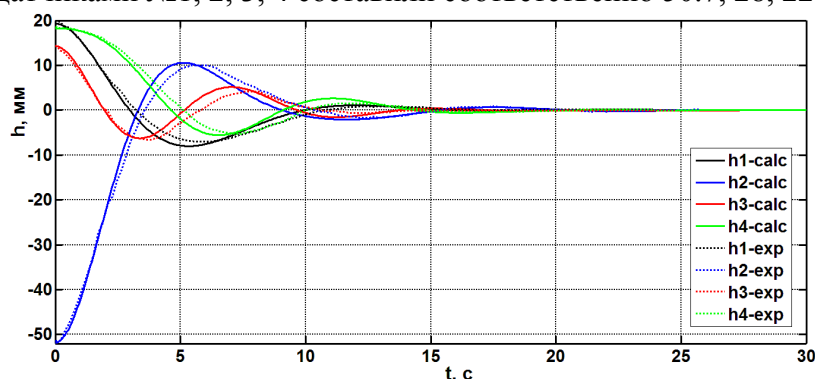


Рис. 4 – Результаты изменения уровня жидкости при эксперименте с третьей конфигурацией нивелира

На рис. 4 аналогичным образом представлены результаты для незамкнутого нивелира, соединительной трубки которого имеет диаметр 8 мм. В представленном случае наблюдаются более низкие частоты колебаний, чем при предыдущих конфигурациях нивелира.

Представленные в статье результаты показывают, что предложенная ранее гидравлическая модель [5] позволяют удовлетворительно оценивать характер переходных процессов и времена затухания в многосегментных гидростатических нивелирах. Наблюдается некоторое различие в частотах колебаний отдельных сегментов, которое можно объяснить упрощенным подходом при учете инерционных слагаемых в гидравлической модели.

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

Список литературы

1. Манукин А.Б. Длиннобазисный гидростатический нивелир // Сейсмические приборы. – 2013. – Т.49. – №4. – С.26 – 34.
2. Zhang C., Fukami K., Matsui S. Primary Hydrokinetics Study and Experiment on the Hydrostatic Leveling System // Proc. of 7-th IWAA. – 2002. – P. 297–307.
3. Singatulin S., Volk J., Shiltsev V. A High Precision Double Tubed Hydrostatic Leveling System for Accelerator Alignment Applications // Proc. of 9-th IWAA. – 2006. – 9p.
4. Цветков Р.В., Епин В.В., Лекомцев С.В., Шестаков А.П. Исследование движения жидкости в многосегментном гидронивелире // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – №6. – С.92 – 94.
5. Tsvetkov R.V., Yepin V.V., Shestakov A.P. Numerical estimation of various influence factors on a multipoint hydrostatic leveling system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – №208. – 012046.
6. Епин В.В., Цветков Р.В., Шестаков А.П. Применение метода распознавания показаний в системах гидростатического нивелирования // Измерительная техника. – 2016. – №4. – С.43–46.

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

05.13.18

¹И.А. Акимов д.т.н., ²В.Н. Абузьяров

¹«Оренбургский государственный педагогический университет»,
кафедра математического анализа и методики преподавания математики,
Оренбург, akimov_ia@mail.ru,

²Филиал Московского технологического института «МТИ» в г. Оренбурге,
кафедра «Информатика и автоматизация»,
Оренбург, it@mti_orenburg.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ТРЕТЬЕМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА
МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С
РАЗЛИЧНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ****DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-112-115**

В работе представлено математическое моделирование нестационарной теплопроводности в ограждающих конструкциях на этапе полной полимеризации.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, полимеризация, нестационарная теплопроводность, математические модели теплообмена, многослойные конструкции.

Введение. Многослойные конструкции из композиционных материалов широко востребованы в летательных аппаратах различного предназначения. Пол, двери, приборные отсеки представляют собой ограждающие конструкции, состоящие из трех слоев.

Цель работы: разработка и исследование математической модели процесса нестационарной теплопроводности в многослойных ограждающих конструкциях с различными коэффициентами теплопроводности на третьем этапе производства методом полимеризации.

Рассматриваются ограждающие конструкции в форме полого многослойного цилиндра бесконечной длины – диаметр цилиндрического изделия значительно меньше длины ($2R \ll l$) [1].

К третьему этапу производства завершается полная полимеризация многослойных ограждающих конструкций с различными коэффициентами теплопроводности. Условия сопряжения будем считать идеальными.

Постановка и решение задачи. При сделанных предположениях, задача сводится к рассмотрению нестационарной задачи теплопроводности для N – слойногo неограниченного цилиндра с граничными условиями третьего рода на внешних границах и граничными условиями четвертого рода на поверхностях контакта слоев.

Решение задачи используется для расчета нестационарных температурных полей и тепловых потоков в ограждающих конструкциях, у которых теплофизические параметры (теплопроводности) различны.

На третьем этапе производства композитов (для ограждающих конструкций) завершается процесс полимеризации, и слои с различными коэффициентами теплопроводности плотно прилегают друг к другу в результате полимеризации.

На основании изложенного применяем граничное условие четвертого рода на поверхностях контактов слоев [2].

При таких предположениях задача имеет вид

$$\frac{\partial U_i(r_i, \tau)}{\partial \tau} = a_i^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 U_i(r_i, \tau)}{\partial r_i^2} + \frac{1}{r_i} \cdot \frac{\partial U_i(r_i, \tau)}{\partial r_i} \right), \quad (1)$$

$$R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad \tau > 0, i = 1, 2, \dots, N.$$

$$\text{С НУ:} \quad U_i(r_i, 0) = f_i(r_i); \quad (2)$$

$$\text{ГУ:} \quad \lambda_1 \cdot \frac{\partial U_1(R_0, \tau)}{\partial r_1} - \alpha_1 [U_1(R_0, \tau) - U_{c1}] = 0, \quad (3)$$

$$\lambda_N \cdot \frac{\partial U_N(R_N, \tau)}{\partial r_N} + \alpha_N [U_N(R_N, \tau) - U_{cN}] = 0 \quad (4)$$

и условиями сопряжения

$$U_j(R_j, \tau) = U_{j+1}(R_j, \tau), \quad \lambda_j \cdot \frac{\partial U_j(R_j, \tau)}{\partial r_j} = \lambda_{j+1} \cdot \frac{\partial U_{j+1}(R_j, \tau)}{\partial r_{j+1}}, \quad (5)$$

где $U_j(R_j, \tau)$ – температура слоев в момент времени τ ,

λ_j – теплопроводность слоев,

α_1, α_N – коэффициенты теплоотдачи первого и N – го слоев,

U_{c1} – температура вне первого слоя,

U_{cN} – температура вне N – го слоя,

a_i – температуропроводность слоев.

Решение задачи (1)–(15) представим в виде суммы стационарной и нестационарной составляющих

$$U(r_i, \tau) = Q_i(r_i) + P_i(r_i, \tau), i = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где $Q_i(r_i)$ – решение стационарной задачи с неоднородными граничными условиями

$$\frac{d^2 Q_i(r_i)}{dr_i^2} + \frac{1}{r_i} \cdot \frac{dQ_i(r_i)}{dr_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad R_{i-1} \leq r_i < h_i; \quad (7)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{dQ_1(R_0)}{dR_1} - \alpha_1 [Q_1(R_0) - U_{c1}] = 0 \quad (8)$$

$$\lambda_N \cdot \frac{dQ_N(R_N)}{dr_N} + \alpha_N [Q_N(R_N) - U_{cN}] = 0 \quad (9)$$

$$Q_j(R_i) = Q_{j+1}(R_j) \quad (10)$$

$$\lambda_j \frac{dQ_j(r_j)}{dr_j} = \lambda_{j+1} \frac{dQ_{j+1}(R_j)}{dr_{j+1}}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1. \quad (11)$$

Решение задачи используется для расчета нестационарных температурных полей и тепловых потоков в ограждающих конструкциях, у которых теплофизические параметры теплопроводности различны.

На третьем этапе производства композитов завершается процесс полимеризации и слои с различными коэффициентами теплопроводности плотно прилегают друг к другу. Поэтому применяем граничное условие четвертого рода на поверхностях контакта слоев.

$$\text{где } B_1 = \frac{U_{c1} - U_{cN}}{\ln(R_0) - \frac{\lambda_1}{R_0 \alpha_1} - \frac{\lambda_1}{\lambda_N} \left[\ln(R_N) + \frac{\lambda_N}{R_N \alpha_N} \right] + \lambda_1 \sum_{k=1}^{N-1} \ln(R_k) \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{k+1}} - \frac{1}{\lambda_k} \right)}; \quad (12)$$

$$A_1 = U_{c1} - B_1 \left[\ln(R_0) - \frac{\lambda_1}{\alpha_1 R_0} \right]; \quad (13)$$

$$B_{j+1} = \frac{\lambda_j}{\lambda_{j+1}} B_j, \quad j = 1, 2, \dots, N-1; \quad (14)$$

$$A_{j+1} = A_j + B_j \ln(R_j) \cdot \left(1 - \frac{\lambda_j}{\lambda_{j+1}}\right). \quad (15)$$

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

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

$$\text{С НУ:} \quad P_i(r_i, 0) = f_i(r_i) - Q_i(r_i), \quad (17)$$

$$\text{ГУ:} \quad \lambda_1 \cdot \frac{\partial P_1(R_0, \tau)}{\partial r_1} - \alpha_1 P_1(R_0, \tau) = 0 \quad (18)$$

$$\lambda_N \cdot \frac{\partial P_N(R_N, \tau)}{\partial r_N} + \alpha_N P_N(R_N, \tau) = 0 \quad (19)$$

и с условиями сопряжения

$$P_j(R_j, \tau) = P_{j+1}(R_j, \tau), \quad \lambda_j \cdot \frac{\partial P_j(r_j, \tau)}{\partial r_j} = \lambda_{j+1} \cdot \frac{\partial P_{j+1}(r_j, \tau)}{\partial r_{j+1}}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1. \quad (20)$$

Решение задачи (16)–(20) получено методом конечных интегральных преобразований Ханкеля. Прямое преобразование Ханкеля имеет вид

$$U(\mu, \tau) = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \cdot \int_{R_{m-1}}^{R_m} \rho(r_m) \cdot P_m(r_m, \tau) \cdot W_m(r_m, \mu) dr_m, \quad (21)$$

где $\rho(r_m)$ – весовая функция

Обратное преобразование Ханкеля имеет вид

$$P_i(r_i, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U(\mu_n, \tau) \cdot W_i(r_i, \mu_n)}{Z_n}, \quad (22)$$

$$\text{где } Z_n = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m W_m^2(r_m, \mu_n) dr_m$$

$W_m(r_m, \mu)$ – ядро интегрального преобразования

μ – параметр.

$$W_m(r_m, \tau) = C_{m,n} J_0 \left(\frac{\mu_n r_m}{a_m} \right) + D_{m,n} \cdot Y_0 \left(\frac{\mu_n r_m}{a_m} \right),$$

$$\text{где } D_{1,n} = \frac{\frac{\lambda_1 \mu_n}{a_1} \cdot J_1 \left(\frac{\mu_n}{a_1} \cdot R_0 \right) - \alpha_1 J_0 \left(\frac{\mu_n}{a_1} R_0 \right)}{\alpha_1 Y_0 \left(\frac{\mu_n}{a_1} \cdot R_0 \right) - \frac{\lambda_1 \mu_n}{a_1} \cdot Y_1 \left(\frac{\mu_n}{a_1} R_0 \right)}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1;$$

$$C_{j+1,n} = \frac{C_{j,n} J_0 \left(\frac{\mu_n}{a_j} R_j \right) + D_{j,n} \left(\frac{\mu_n}{a_j} R_j \right) - D_{j+1,n} Y_0 \left(\frac{\mu_n}{a_{j+1}} R_j \right)}{Y_0 \left(\frac{\mu_n}{a_{j+1}} R_j \right)}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1$$

$$D_{j+1,n} = \frac{\frac{\lambda_j \cdot a_{j+1}}{\lambda_{j+1} \cdot a_j} \cdot J_0 \cdot \left(\frac{\mu_n}{a_{j+1}} \cdot R_j \right) \cdot \left[C_{j,n} \cdot J_1 \left(\frac{\mu_n}{a_j} \cdot R_j \right) + D_{j,n} \cdot Y_1 \left(\frac{\mu_n}{a_j} \cdot R_j \right) \right] - J_0 \cdot \left(\frac{\mu_n}{a_{j+1}} \cdot R_j \right) \cdot Y_1 \left(\frac{\mu_n}{a_{j+1}} \cdot R_j \right) - J_1 \left(\frac{\mu_n}{a_{j+1}} \cdot R_j \right) \cdot \left[C_{j,n} \cdot J_0 \cdot \left(\frac{\mu_n}{a_j} \cdot R_j \right) + D_{j,n} \cdot Y_0 \left(\frac{\mu_n}{a_j} \cdot R_j \right) \right]}{- J_1 \left(\frac{\mu_n}{a_{j+1}} \cdot R_j \right) \cdot Y_0 \left(\frac{\mu_n}{a_{j+1}} \cdot R_j \right)},$$

μ_n – n -ый положительный корень уравнения

$$C_N \left[J_0 \cdot \left(\frac{\mu P_{1N}}{a_N} \right) - \frac{\mu \lambda_N}{a_N \alpha_N} J_1 \cdot \left(\frac{\mu R_N}{a_N} \right) \right] + D_N \cdot \left[Y_0 \cdot \left(\frac{\mu R_N}{a_N} \right) - \frac{\mu \lambda_N}{a_N \alpha_N} Y_1 \left(\frac{\mu R_N}{a_N} \right) \right] = 0.$$

Применяя преобразование (21) к задаче (16)–(20), переходим к изображениям

$$\frac{dU(\mu_n, \tau)}{d\tau} + \mu_n^2 \overline{U(\mu_n, \tau)} = 0 \quad (22)$$

$$\overline{U(\mu_n, 0)} = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \cdot \int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m [f_m(r_m) - Q_m(r_m)] \cdot W_m(r_m, \mu_n) dr_m. \quad (23)$$

Решением задачи (22)–(23) является функция

$$\overline{U(\mu_n, \tau)} = \overline{U(\mu_n, 0)} \cdot e^{-\mu_n^2 \tau} \quad (24)$$

Таким образом, решение исходной задачи (1)–(5) имеет вид

$$U_i(r_i, \tau) = A_i + b_i \ln(r_i) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{Z_n} \cdot \left[C_{i,n} J_0 \left(\frac{\mu_n r_i}{a_i} \right) + D_{i,n} Y_0 \left(\frac{\mu_n r_i}{a_i} \right) \right] \cdot e^{-\mu_n^2 \tau} \cdot \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \cdot \int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m [f_m(r_m) - A_m - B_m \ln(r_m)] \cdot \left[C_{m,n} J_0 \left(\frac{\mu_n r_m}{a_m} \right) + D_{m,n} Y_0 \left(\frac{\mu_n r_m}{a_m} \right) \right] dr_m,$$

где $J_0(x), J_1(x), Y_0(x), Y_1(x)$ – Бесселевы функции первого и второго рода, нулевого и первого порядка соответственно.

Список литературы

1. Акимов, И.А. Математическое моделирование технических объектов : учеб. пособие / И.А. Акимов, А.А. Аносов, А.И. Акимов; Мин-во образования и науки Рос. Федерации, агентство по образованию, Оренб. Гос. пед. ун-т. – Оренбург : Изд-во ОГПУ, 2009. – 120 с.
2. Акимов И.А. Нестационарная теплопроводность в слоях с неидеальным контактом / И.А. Акимов, В.Н. Абузьяров // Научно-технический вестник Поволжья. №4 2017г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2017. – с. 90

05.13.18

И.А. Акимов д.т.н., Е.О. Каракулина

Оренбургский государственный педагогический университет,
физико-математический факультет,
кафедра математики и методики преподавания математики,
Оренбург, elok2004@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ЭТАПЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-116-119

В данной работе представлены результаты изучения теплопередачи в многослойных композитных конструкциях с сотовым наполнителем на этапе стабилизации температуры при автоклавном формовании изделия.

Ключевые слова: композиционные материалы, метод изотермических поверхностей, многослойная конструкция, полимеризация, автоклав.

Введение. Конструкция с наполнителем представляет собой составную конструкцию, состоящую из несущих слоев, наполнителя, расположенного между несущими слоями и элементов каркаса. Наибольшую популярность в настоящее время получили конструкции с сотовым наполнителем. В настоящее время сотовые конструкции используются в строительстве, в различных агрегатах пассажирских и военных самолетов, вертолетов, космических аппаратов, двигателях летательных аппаратов, ракетостроении, а также судостроении и других отраслях.

В данной работе рассматривается девятислойный материал с сотовым наполнителем, расположенным между двумя и шестью несущими слоями из стеклоткани [1].

Постановка и решение задачи. При решении задачи теплообмена второго этапа производства композитов использован метод изотермических поверхностей. Поскольку в процессе производства полимер не поступает из внешних источников, а образуется только за счет фазового перехода связующего, то воспользуемся критерием фазового превращения только для твердой фазы, то есть $d = \frac{d_c}{d_c + d_n}$, где d_c – доля связующего, d_n – доля полимера.

На втором интервале производства композитов температура в автоклаве стабилизируется на постоянном уровне 125°C , но при этом за счет превращения связующего материала в полимер выделяется температура полимеризации. Поэтому рассматриваем теплообмен и массообмен в композитах, так как теплообмен в данном случае будет зависеть от потенциала массы (взаимосвязанный тепломассоперенос). При таких предположениях теплообмен и массообмен описываются соответственно следующими уравнениями по слоям композитов

$$\frac{\partial U_k(x_k, \tau)}{\partial \tau} = a_i^k \frac{\partial^2 U_k(x_k, \tau)}{\partial x_k^2} + \sigma \frac{c_{mk}}{c_{gk}} \cdot \frac{d_k}{1 - d_k} \frac{\partial m_k(x_k, \tau)}{\partial \tau} + W_k(x_k, \tau), \quad \tau > 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial m_k(x_k, \tau)}{\partial \tau} = a_{mk}^2 (1 - d_k) \frac{\partial^2 m_k(x_k, \tau)}{\partial x_k^2}, \quad \tau > 0, \quad x_1 \leq x_k \leq x_N, \quad (k = 1, 2, \dots, N), \quad (2)$$

где $U_k(r, \tau)$ – температура k -го слоя изделия, m_k – масса связующего в k -ом слое, a_i , a_m – температуропроводность, массопроводность k -го слоя, σ – удельная теплота фазового перехода, d_k – доля полимера в k -ом слое, c_{gk} , c_{mk} – удельные теплоемкость и

массоёмкость, W_k – теплота электрообеспечения, $\frac{\partial m_k}{\partial \tau}$ – потенциал массопереноса, τ – время, x_k – пространственная координата.

Решение задачи (1)-(2) показано в работе [2]. В данной работе использован метод изотермических поверхностей, сущность которого состоит в замене истинного распределения температуры внутри каждой области нестационарным, при фиксированных положениях границы $S_{i,\tau} : \xi_{i,n} = \xi_i(\tau_n), n = 1, 2, \dots$. Зафиксировав произвольным образом положение границы $S_{i,\tau} : \xi_i = \xi_{i,n}$, область непрерывного изменения этой границы заменяем дискретным множеством $\{\xi_{i,n}\}$, представляющим собой возрастающую и ограниченную сверху последовательность. В областях $D_{i,\tau_n} = \{0 < x < \xi_{i,n}\}$ находим нестационарное распределение температуры $U_{k,n}(x, \tau)$ и, используя их, функцию непрерывного аргумента $\tau = \tau(\xi_i)$ заменяем функцией дискретного аргумента $\tau_i = \tau(\xi_{i,n})$.

Таким образом, в непрерывном спектре собственных значений задачи, выделяется дискретный спектр, что позволяет отобрать и нормировать максимальную систему собственных функций в непрерывном спектре в соответствующих областях. Полученные решения $U_{k,n}(x, \tau)$ приближенно удовлетворяют условию задачи при $\tau = \tau_j^*$.

Так как полимеризация идет с обеих сторон композита, то примем за $R = \frac{N}{2}$ и за неполимеризованные слои условно примем $i = m, m+1, \dots, R, (m < R)$, где $x_m = x^*(\tau_j^*)$.

$$\frac{\partial U_i(x_i, \tau)}{\partial \tau} = a_i^2 \frac{\partial^2 U_i(x_i, \tau)}{\partial x_i^2} + \frac{v_i(x_i, \tau)}{c_i \rho_i}, \tau > 0, x_m = x^*(\tau_j^*) \leq x_R, i = m, m+1, \dots, R \quad (3)$$

$$\text{с начальными условиями} \quad U_i(x_i, 0) = f_i(x_i); \quad (4)$$

граничными условиями

$$\lambda_m \frac{\partial U_m(x_m, \tau)}{\partial x_m} - \alpha_m [U_m(x_m, \tau) - U_{cm}] = 0, \lambda_R \frac{\partial U_R(x_R, \tau)}{\partial x_R} - \alpha_R [U_R(x_R, \tau) - U_{cR}] = 0 \quad (5)$$

и условиями сопряжения

$$U_i(x_i, \tau) = U_{i+1}(x_i, \tau); \lambda_i \frac{\partial U_i(x_i, \tau)}{\partial x_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial U_{i+1}(x_i, \tau)}{\partial x_{i+1}}, i = m, m+1, \dots, R, \quad (6)$$

где α_m, α_R – коэффициенты теплоотдачи, λ_m, λ_R – коэффициенты теплопроводности слоев, U_{cm}, U_{cR} – температуры внешней среды, $v_i(x_i, \tau)$ – мощности источников слоев.

Решение задачи (3)-(6) ищем в виде

$$U_i(x_i, \tau) = S_i(x_i) + P_i(x_i, \tau), i = m, m+1, \dots, R, m < R, \quad (7)$$

где $S_i(x_i)$ – решения стационарной задачи с неоднородными граничными условиями.

$$\frac{\partial^2 S_i(x_i)}{\partial x_i^2} = 0, i = m, m+1, \dots, R, m \leq x_i \leq R, \quad (8)$$

$$\lambda_m \frac{dS_m(x_m)}{dx_m} - \alpha_m [S_m(x_m) - U_{cm}] = 0, \lambda_R \frac{dS_R(x_R)}{dx_R} + \alpha_R [S_R(x_R) - U_{cR}] = 0 \quad (9)$$

и условиями сопряжения

$$S_i(x_i) = S_{i+1}(x_i), \lambda_i \frac{dS_i(x_i)}{dx_i} = \lambda_{i+1} \frac{dS_{i+1}(x_i)}{dx_{i+1}}, i = m, m+1, \dots, R \quad (10)$$

Решение стационарной задачи имеет вид

$$S_i(x_i) = A_i x_i + B_i \quad (11)$$

где

$$A_i = \frac{U_{cR} - U_{cm}}{\lambda_i \left(\frac{1}{\alpha_m} + \sum_{i=m}^R \frac{R_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_R} \right)}, \quad B_i = U_{cR} = \frac{(U_{cR} - U_{cm}) \left(\frac{R_i}{\lambda_i} + \sum_{k=i+1}^R \frac{R_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_R} \right)}{\frac{1}{\alpha_m} + \sum_{i=m}^R \frac{R_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_R}}, \quad (12)$$

$P_i(x_i, \tau)$ – решение нестационарной задачи с однородными граничными условиями

$$\frac{\partial P_i(x_i, \tau)}{\partial \tau} = a_i^2 \frac{\partial^2 P_i(x_i, \tau)}{\partial x_i^2} + \frac{v_i(x_i, \tau)}{c_i \gamma_i}, \quad \tau > 0, \quad m = x_m \leq x_i \leq x_R = R, \quad i = m, m+1, \dots, R \quad (13)$$

$$\text{с начальными условиями } P_i(x_i, 0) = f_i(x_i) - S_i(x_i); \quad (14)$$

граничными условиями

$$\lambda_m \frac{\partial P_m(x_m, \tau)}{\partial x_m} - \alpha_m P_m(x_m, \tau) = 0, \quad \lambda_R \frac{\partial P_R(x_R, \tau)}{\partial x_R} + \alpha_R P_R(x_R, \tau) = 0; \quad (15)$$

и условиями сопряжения

$$P_i(x_i, \tau) = P_{i+1}(x_i, \tau); \quad \lambda_i \frac{\partial P_i(x_i, \tau)}{\partial x_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial P_{i+1}(x_i, \tau)}{\partial x_{i+1}}, \quad i = m, m+1, \dots, R, \quad (16)$$

Решение задачи (13)-(16) получено методом конечных интегральных преобразований Фурье.

Формула перехода к изображениям имеет вид

$$\overline{P(\mu, \tau)} = \sum_{i=m}^R \frac{\lambda_i^{i+1}}{a_i^2} \int P_i(x_i, \tau) W(x_i, \mu) dx_i \quad (17)$$

Обратный переход осуществляется по формулам

$$\overline{P_i(x_i, \tau)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\overline{P(\mu_n, \tau)} W_i(x_i, \mu_n)}{M_n} \quad (18)$$

где

$$M_n = \sum_{i=m}^R \frac{\lambda_i^{i+1}}{a_i^2} \int W_i^2(x_i, \mu_n) dx_i = \frac{1}{2} \sum_{i=m}^R \frac{\lambda_i}{a_i^2} C_{i,n}^2 \cdot \left[i+1 - \frac{a_i}{\mu_n} \left(\sin \left(\frac{\mu_n(i+1)}{a_i} \right) + \varphi_{i,n} \right) - \sin(\varphi_{i,n}) \cos(\varphi_{i,n}) \right] \quad (19)$$

Ядро интегрального преобразования определяем по формуле

$$W_i(x_i, \mu_n) = C_{i,n} \sin \left(\frac{\mu_n x_i}{a_i} + \varphi_{i,n} \right), \quad (20)$$

где из граничных условий находим $C_{i,n}$, $\varphi_{i,n}$, причем примем

$$C_{i,n} = 1, \quad \varphi_{i,n} = \arctg \left(\frac{\lambda_m \mu_n}{\alpha_m a_n} \right), \quad C_{i+1,n} = C_{i,n} \cdot \frac{\sin \left(\frac{\mu_n i}{a_i} + \varphi_{i,n} \right)}{\sin(\varphi_{i+1,n})}, \quad (21)$$

$$\varphi_{i+1,n} = \arctg \left(\frac{\lambda_{i+1} a_i}{\lambda_i a_{i+1}} \operatorname{tg} \left(\frac{\mu_n i}{a_i} + \varphi_{i,n} \right) \right), \quad i = m, m+1, \dots, R,$$

μ_n – положительные корни уравнения

$$\frac{\lambda_R \mu}{a_R} \cos \left(\frac{\mu R}{a_R} + \varphi_R \right) + \alpha_R \sin \left(\frac{\mu R}{a_R} + \varphi_R \right) = 0. \quad (22)$$

Применяя преобразование (18) к задачам (13)-(16), переходим к уравнениям в изображениях

$$\frac{d \overline{P_i(\mu_n, \tau)}}{d \tau} + a \mu_n^2 \overline{P_i(\mu_n, \tau)} - \int_i^{i+1} \frac{v_i(x_i)}{c \gamma} W(x_i, \mu_n) dx_i = 0. \quad (23)$$

Решая полученное обыкновенное дифференциальное уравнение и переходя к оригиналу,

завершаем решение исходной задачи

$$U_i(x_i, \tau) = A_i x_i + B_i + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_{i,n} \sin\left(\frac{\mu_n x_i}{a_i} + \varphi_{i,n}\right) \cdot e^{-\mu_n \tau} \cdot \sum_{i=m}^R \frac{\lambda_i}{a_i^2} C_{i,n}}{0,5 \sum_{i=m}^R \frac{\lambda_i}{a_i^2} C_{i,n}^2} \times$$

$$\times \frac{\int_i^{i+1} [f_i(x_i) - A_i x_i - B_i] \sin\left(\frac{\mu_n x_i}{a_i} + \varphi_{i,n}\right) dx_i}{\left[i + 1 - \frac{a_i}{\mu_n} \left(\sin\left(\frac{\mu_n (i+1)}{a_i} + \varphi_{i,n}\right) \cos\left(\frac{\mu_n (i+1)}{a_i} + \varphi_{i,n}\right) - \sin(\varphi_{i,n}) \cos(\varphi_{i,n}) \right) \right]}.$$
(24)

Так как сотовый материал находится в интервале $x_0 \leq x \leq x_{\frac{N}{2}}$, то решение задачи на интервале $x_{\frac{N}{2}} \leq x \leq x_N$ проводится по формуле (24).

Основные результаты и выводы.

1. Разработана математическая модель теплообмена в девятислойной композитной конструкции с сотовым наполнителем на этапе стабилизации температуры при её автоклавном формовании.

2. Приведено аналитическое решение поставленной задачи теплопроводности, позволяющее оценить распределение температуры в зависимости от времени в каждом слое изделия.

Список литературы

1. Акимов И.А., Акимов А.И., Каракулина Е.О. Исследование и разработка математических моделей на первом этапе производства некоторых типов композиционных материалов в установках Щольца // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – №1. – С. 54-57.
2. Акимов И.А., Каракулина Е.О. Исследование и разработка математической модели второго этапа производства композиционных материалов в установках Щольца // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 2. – С. 93-97.

05.13.01

Р.Г. Асадуллаев, В.В. Ломакин, Н.П. Путивцева, О.С. Резниченко, Ю.Ю. Белоконь

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
институт инженерных технологий и естественных наук,
кафедра прикладной информатики и информационных технологий,
Белгород, asadullaev@bsu.edu.ru, lomakin@bsu.edu.ru, putivzeva@bsu.edu.ru,
oreznichenko@bsu.edu.ru, voitova@bsu.edu.ru

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ОЦЕНКИ ПРОЕКТНЫХ РИСКОВ ПРИ СОЗДАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СФЕРЫ ГОСУДАРСТВЕННЫХ УСЛУГ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-120-122

В работе представлены результаты формального представления средств оценки рисков в процессе реализации проектов по разработке информационных систем. Разработан алгоритм мониторинга рисков на различных стадиях реализации проекта. Проведен теоретико-множественный анализ рисков и факторов, на основании которого разработаны средства оценки состояния как отдельно взятых типов проектных рисков, так и основных групп рисков.

Ключевые слова: информационная система, анализ риска, алгоритм мониторинга риска, проектный риск.

Реализация проектов прикладных приложений подразумевает наличие инструментальных средств управления рисками. Риск представляет собой нежелательное событие, наступление которого сокращает вероятность успешной реализации проекта. Возникновение риска определяется случайными событиями, вызванными как внешними, так и внутренними факторами [1]. Менеджер проекта реализации информационной системы должен проводить периодический анализ рисков с целью определения вероятности возникновения рисков различной природы и принятия эффективных мер по предупреждению негативных последствий влияния риска на стоимость, содержание и сроки реализации проекта. Эффективное управление рисками подразумевает выполнение следующих основных видов деятельности: идентификация риска, изучение и прогнозирование риска, оценка риска и управление риском.

Таким образом, необходима разработка формальных средств оценки проектных рисков в процессе управления жизненным циклом информационной системы. Вне зависимости от модели жизненного цикла необходимо проводить мониторинг рисков на каждом этапе реализации проекта. На рисунке 1 представлен алгоритм мониторинга проектных рисков. В зависимости от базы знаний организации на начальной стадии проводится ввод сведений о проекте с поиском информации об имеющемся собственном опыте реализации подобных проектов, в противном случае ведется поиск знаний об реализации аналогичных решений на рынке. В случае уникальности проекта проводится анализ существующих ограничений технологий, подразумевающий экспертный поиск факторов влияния в зависимости от специфики реализуемого проекта. После чего проводится систематизация факторов, формирующих каждый тип риска. Затем проводится процедура Парето оптимизации с целью выявления наиболее значимых факторов для каждого риска, которые в свою очередь оптимизируются относительно степени влияния на группы риска. В результате проводится экспертная оценка групп риска, подразумевающая оценку и определение веса каждого риска и фактора на соответствующий параметр. В итоге формируется количественная оценка рисков на каждом этапе реализации проекта. Блок «Модификация i в зависимости от хода проекта» увеличивает i при переходе к следующему этапу проекта и уменьшает в противном случае.

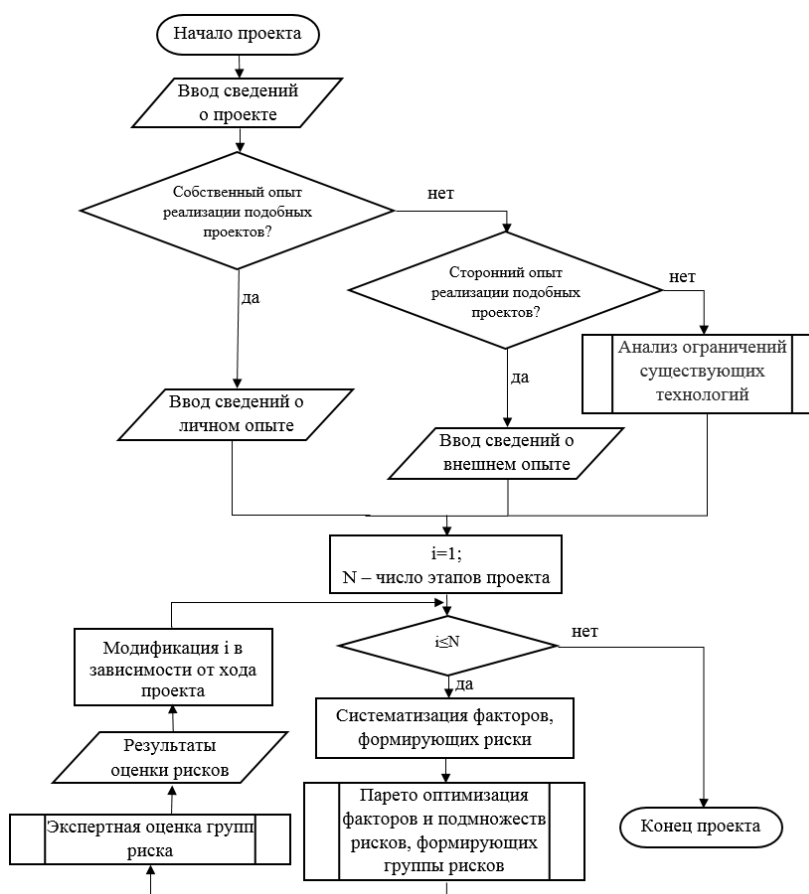


Рис. 1- Алгоритм мониторинга проектных рисков

В работе [2] проведена классификация проектных рисков с учетом специфики реализации проектов в сфере создания прикладных приложений информационных систем для государственных и муниципальных услуг. Автором выделяются десять типов проектных рисков, которые можно представить множеством $R = \{r_i\}$, $i = \overline{1, h}$ при $h = 10$. Каждый тип риска выражается степенью проявления факторов формирования риска $F = \{f_i\}$, $i = \overline{1, m}$ (наличие опыта реализации подобного проекта, используемые технологии разработки, квалификация и опыт совместной работы коллектива, наличие среды разработки, текучесть кадров и т.д.).

Вне зависимости от специфики предметной области, на автоматизацию которой направлен проект реализации информационной системы, выделяют следующее множество основных групп рисков $GR = \{gr_i\}$, $i = \overline{1, n}$, которыми должен управлять менеджер проекта: неудовлетворительное качество выходного продукта проекта, срыв сроков реализации проекта, увеличение затрат на проект, прекращение выполнения проекта в силу изменения условий и масштабов проекта.

С целью учета специфики отдельно взятых проектов строится два отношения влияния рисков на группы рисков $GR \times R$ и влияния факторов на риски $R \times F$. В ячейках отношения $GR \times R$ заносятся весовые коэффициенты w_{ij} , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, h}$, а в отношении $R \times F$ коэффициенты v_{ij} , $i = \overline{1, h}$, $j = \overline{1, m}$. Весовые коэффициенты отношений изменяются в интервале $[0..1]$ и выполняются условия $\sum w_{ij} = 1$ и $\sum v_{ij} = 1$. Таким образом, если на i -й риск не оказывает влияния j -й фактор, то $v_{ij} = 0$, аналогично для $GR \times R$.

Для выявления и оценки рисков, менеджером составляется анкета на основании факторов влияния на риск, а также привлекаются эксперты. При предварительном расчете рисков проекта возможно применение линейной свертки для выявления угроз и акцентирования фокуса внимания на решении конкретных задач по управлению рисками. Затем возможно использование методов поддержки принятия решений с целью ранжирования рисков по значимости [3]. Представим множество рисков R в форме множества их оценок $OR = \{or_i\}$, $i = \overline{1, h}$.

Выражение (1) рассчитывает уровень каждого риска or_i .

$$or_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_p} (v_j * of_j)}{m_p} \quad (1)$$

где v_j - вес j -го фактора при оценке i -го риска, of_j - оценка j -го фактора, m_p - факторы, оказывающие влияние на i -й риск $m_p \leq m$.

Множество групп рисков GR также необходимо представить в форме множества их оценок $OGR = \{ogr_i\}, i = \overline{1, n}$.

Выражение (2) определяет способ оценки каждой группы риска ogr_i .

$$ogr_i = \frac{\sum_{j=1}^{h_s} (w_j * or_j)}{h_s} \quad (2)$$

где w_j - вес j -го риска при оценке i -й группы риска, or_j - оценка j -го риска, h_s - риски, оказывающие влияние на i -ю группу рисков $h_s \leq h$.

Множество OGR формирует оценку влияния каждой группы рисков на проект. Интегрированная оценка риска I показывает подверженность проекта влиянию рисковенных факторов (3).

$$I = \frac{1}{4} * \sum_{j=1}^4 (y_j * ogr_j) \quad (3)$$

где y_j - вес j -го типа риска.

Таким образом, разработан алгоритм мониторинга рисков позволяющий проводить анализ рисков на различных стадиях реализации проекта. Проведена систематизация рисков и формирующих их факторов с учетом специфики предметной области реализации проекта. Разработаны средства предварительной оценки проектных рисков, а также свертка оценок по группам рисков.

Выполнено в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Разработка методологии и инструментальных средств создания прикладных приложений, поддержки жизненного цикла информационно-технологического обеспечения и принятия решений для эффективного осуществления административно-управленческих процессов в рамках установленных полномочий», 2017-218-09-187; постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010г. №218.

Список литературы

1. Кушнир, А.М. Управление рисками инновационных проектов: системный подход [Электронный ресурс] / А.М. Кушнир // Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. Серия 1. Экономика и управление. – 2012. – №2012'1. – С. 65-71. Режим доступа: https://www.muiiv.ru/vestnik/pdf/eu/eu_2012_1_65_71.pdf, свободный.
2. Кутикова, К.В. Риски разработки информационных систем для сферы государственных услуг [Текст] / К.В. Кутикова // Политематический журнал научных публикаций "Дискус-сия". – Екатеринбург: ООО «Издательский дом «Ажур» . – 2014. – №10(51). – С. 52-56.
3. Ломакин, В.В. Система поддержки принятия решений с автоматизированными средствами корректировки суждений экспертов [Текст] / В.В. Ломакин, М.В. Лифиренко // Научные ведомости Белгородского государственного университета: научный журнал. – Белгород: Издательский дом «Белгород». – 2014. – №1(172) вып. 29/1. – С. 114-120.

05.13.06

Е.Н. Белоусова, Ф.С. Жафярова

Ивановский государственный университет,
экономический факультет,
кафедра информационных технологий в экономике и организации производства,
Иваново, elenabelousova10081994@gmail.com, flera-sab@yandex.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫМ ИМУЩЕСТВОМ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-123-125

В работе рассмотрены проблемы управления государственным имуществом в Российской Федерации. Изложены способы устранения недостатков существующей на сегодняшний день информационной системы управления государственной собственностью. Приведены экономические эффекты, которые достигнуты в результате внедрения предложенных решений.

Ключевые слова: государственное имущество, федеральная собственность, система управления, органы исполнительной власти.

Государственное имущество, являющееся доходной статьей государственного бюджета, заслуживает особого внимания. Это связано прежде всего с тем, что эффективное управление государственной собственностью непосредственно оказывает влияние на уровень экономического развития всей страны.

Согласно пункту 1 статьи 214 Гражданского кодекса Российской Федерации (ГК РФ) под государственной собственностью понимается имущество, принадлежащее на праве собственности РФ (федеральная собственность), и имущество, принадлежащее на праве собственности субъектам РФ – республикам, краям, областям, городам федерального значения, автономной области, автономным округам (собственность субъекта РФ) [1]. В тоже время необходимо отличать государственную собственность от муниципальной, так из статьи 130 Конституции РФ следует, что муниципальная собственность не является разновидностью государственной, а является самостоятельной формой собственности [2]. В федеральную собственность входят [3]:

1) Объекты, составляющие основу национального богатства страны (природные ресурсы, охраняемые или особым образом используемые объекты, объекты историко-культурного и природного наследия и художественные ценности).

2) Объекты, необходимые для обеспечения функционирования федеральных органов власти, управления и решения общероссийских задач (Государственная казна РФ, имущество вооруженных сил и различных войск, предприятия и т.д.).

3) Объекты оборонного производства.

4) Объекты отраслей, обеспечивающих жизнедеятельность народного хозяйства России в целом и развитие других отраслей народного хозяйства.

5) Федеральные автомобильные дороги общего пользования и обслуживающие их организации.

В соответствии со статьями 214 и 215 ГК РФ государственное имущество, не закрепленное за государственными учреждениями на праве оперативного управления (статья 296 ГК РФ) или хозяйственного ведения (статья 294 ГК РФ) составляет государственную казну РФ и казну субъектов РФ. Следовательно, имущество (движимое и недвижимое), являясь государственной собственностью, может закрепляться за государственными учреждениями на праве оперативного управления или хозяйственного ведения, а также входит в состав имущества казны.

Как видно, государственное имущество включает большое количество объектов, как движимого, так и недвижимого имущества, которые требуют постоянного контроля в процессе учета и внимания. В связи с этим крайне актуальной задачей становится обеспечение полноты учета и достоверности данных об объектах государственного имущества в различных аспектах и доступности этой информации для принятия управленческих решений.

Под учетом имущества понимается упорядоченная система сбора, регистрации и обобщения информации об объектах государственной (муниципальной) собственности, включающая описания с указанием индивидуальных особенностей (место нахождения, стоимость, обременение и т.д.). Данными об объектах учета являются сведения, характеризующие эти объекты (наименование, место нахождения, стоимость, обременение и т.д.).

На сегодняшний день большинство органов исполнительной власти управления имуществом, таких как Федеральное агентство по управлению государственным имуществом, ведут разрозненный учет объектов имущества, прав и субъектов прав, зачастую используя Excel. При этом документы по объектам имущества и правам хранятся в архивах только в бумажном виде, и в силу большого объема хранимых документов, поиск необходимой информации требует времени.

Данный принцип ведения и хранения данных и документов существенно усложняет возможность оперативного и эффективного управления имуществом.

Актуальность подтверждается необходимостью повышения эффективности взаимодействия органов власти в сфере земельно-имущественных отношений с заявителями и иными органами и организациями, участвующими в процессах предоставления услуг, переводом оказания государственных услуг органов в электронный вид, а также автоматизацией мониторинга этапов процесса оказания услуг. Решение проблемы взаимодействия органов исполнительной власти тормозит разнородность используемых приложений. В связи с чем, контроль за исполнением государственных услуг обеспечивается не полностью, а обмен данных между приложениями в большинстве своем вообще невозможен.

Проблемы, выявленные в результате исследования, решаются комплексно, акцентируя свое внимание на развитии информационно-коммуникационных систем, формировании новых каналов взаимодействия участников процесса управления федеральным имуществом, а также развитии ведомственной и межведомственной инфраструктуры обеспечения информационного обмена.

Во-первых, для обеспечения полного и актуального учета всех объектов государственного имущества и операций с ним необходимо установить единую информационную систему во все органы исполнительной власти, ведущих управление государственной собственностью.

Во-вторых, создать единую базу данных объектов государственного имущества, прав и субъектов прав, включающую в себя региональное и муниципальное имущество, а также процедуры и процессы принятия решений в данной сфере на уровне субъекта РФ с учетом требований и специфики каждого участника процесса. Создание баз данных, поддержка их в целостном, непротиворечивом состоянии, обеспечение безопасности их использования и сохранности информации вплоть до восстановления ее после различных сбоев, предоставление различных информационных услуг обеспечивает системой управления базами данных (СУБД). Поэтому, применив метод анализа иерархий Т. Саати, заключающийся в попарном сравнении всех СУБД по основным критериям, нами была выбрана и установлена Microsoft SQL Server 2016 в Федеральном агентстве по управлению государственным имуществом.

В-третьих, для повышения производительности в процессе учета государственной собственности необходимо установить во всех органах исполнительной власти системы электронного документооборота. Так, в Федеральном агентстве по управлению государственным имуществом выбор остановился на программном продукте «1С:

Документооборот государственного учреждения 8», который обеспечит комплексные решения широкого спектра задач автоматизации учета документов, взаимодействия сотрудников, контроля и анализа исполнительской дисциплины в государственных и муниципальных учреждениях [4].

В результате внедрение предложенных решений достигаются следующие экономические эффекты:

- 1) Повышение эффективности управления государственным имуществом.
- 2) Прогнозирование выполнения планов по неналоговым доходам от использования государственного имущества, что приведет к увеличению объемов неналоговых поступлений, что позволит.
- 3) Анализ структуры использования объектов государственного имущества.
- 4) Анализ состояния выполнения договоров по операциям с объектами государственного имущества.
- 5) Повышение эффективности взаимодействия между органами.

Список литературы

1. Гражданский кодекс Российской Федерации. Часть первая от 30 ноября 1994 г. № 51-ФЗ (ред. от 29.07.2017): принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 24 октября 1994 г.: введ. Федер. законом Рос. Федерации от 30 ноября 1994 г. № 52-ФЗ// Собр. законодательства Рос. Федерации. –1994. – 05 дек. – №32, ст. 3301; Рос. газ. – 1994. – 08 дек. – № 238-239. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс» (дата обращения: 30.09.2017).
2. Конституция Российской Федерации: принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 г.// Рос. газ. – 1993. – 25 дек. –№ 237. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс» (дата обращения: 30.09.2017).
3. О разграничении государственной собственности в Российской Федерации на федеральную собственность, государственную собственность республик в составе Российской Федерации, краев, областей, автономной области, автономных округов, городов Москвы и Санкт-Петербурга и муниципальную собственность: Постановление Верховного совета РФ от 27 декабря 1991 г. № 3020-1 (ред. от 12 декабря 1993 г.) // Рос. газ. – 1992. – 11 янв. – № 8; Собр. законодательства Рос. Федерации. –1992. – 16 янв. – №3, ст. 89. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс» (дата обращения: 30.09.2017).
4. «1С: Документооборот государственного учреждения 8» [Электронный ресурс]. – URL: <http://v8.1c.ru/statedoc/> (дата обращения: 02.10.2017).

05.13.18

Д.В. Бережной, М.Р. Шамим, И.С. БалафендиеваКазанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, berezhnoi.dmitri@mail.ru, shamimta@aol.com, e_xo@mail.ru**ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КЛИНЧ-СОЕДИНЕНИЙ****DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-126-128**

В работе дана постановка задачи упругопластического поведения трехмерных конструкций в рамках геометрически нелинейного подхода к описанию деформирования. Реализована конечно-элементная методика расчета контактного взаимодействия между элементами трехмерных конструкций с учетом трения в зоне контакта. На основе предложенной методики решена задача деформирования клинч-соединений в процессе их изготовления и эксплуатации. Даны практические рекомендации для выбора параметров нагружения в процессе создания клинч-соединений.

Ключевые слова: упругопластическое деформирование, клинч-соединение, метод конечных элементов.

Введение

Литература, посвященная исследованию контактного взаимодействия упругопластических конструкций достаточно обширна. В качестве классических примеров можно привести [1, 2], где рассматриваются, в том числе, и большие деформации. В качестве искомым принимаются три деформации удлинений и три составляющие сдвиговых деформаций, которые носят название “истинных”. Вводятся в рассмотрение так называемые “истинные” напряжения, отнесенные к единицам соответствующих площадей после деформации тела. Предлагаемый подход был частично представлен в работах [3, 4]. В работе предлагается методика расчета процессов создания и некоторых этапов эксплуатации клинч-соединений, полученных путем штамповки стальных листов. Создание клинч-соединений предполагает наличие следующих структурных элементов, участвующих в технологическом процессе: подвижной матрицы, двух закрепленных штамповочных листов, неподвижного пуансона. В силу осесимметричности матрицы и пуансона, можно решать осесимметричную задачу, если радиусы штамповочных листов будут значительно больше, чем радиусы матрицы и пуансона. Для одного из расчетных случаев, определяемых геометрией пуансона и матрицы, было проведено численное моделирование процесса изготовления клинч-соединений. Для реализации процесса создания клинч-соединений не требуется моделирование всей рабочей части матрицы: достаточно знать геометрию границы верхней части матрицы. Особое отношение необходимо уделить моделированию угловых областей.

Постановка задачи

Рассмотрим в качестве компонент истинных деформаций относительные удлинения линейных элементов (суммирования по i нет)

$$\varepsilon_{ii}^{tr} = \varepsilon_i = \sqrt{1 + 2\varepsilon_{ii}} - 1$$

и синусы углов сдвига

$$\varepsilon_{ij}^{tr} = \sin \gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij} (1 + 2\varepsilon_{ii})^{-\frac{1}{2}} (1 + 2\varepsilon_{jj})^{-\frac{1}{2}} = 2\varepsilon_{ij} (1 + \varepsilon_i)^{-1} (1 + \varepsilon_j)^{-1}$$

где

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j})$$

а u_j – компоненты вектор перемещений. Истинными напряжениями по В.В. Новожилову являются компоненты векторов напряжений σ_i в разложении по ортонормированным основным базисным векторам в деформированном состоянии тела σ_{ij}^r , через которые выражаются обобщенные (по В.В. Новожилову) напряжения σ_{ij}^* по соотношениям вида $\sigma_{ij}^* = (S_{ij}^* \sigma_{ij}^r) / (S_i(1 + \varepsilon_j))$. Эти соотношения можно преобразовать к виду

$$\sigma_{11}^* = \frac{\sigma_{11}^{tr}}{1 + \varepsilon_1} (1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) \cos \gamma_{23}, \sigma_{12}^* = \sigma_{12}^{tr} (1 + \varepsilon_3) \cos \gamma_{23} = \sigma_{21}^{tr} (1 + \varepsilon_3) \cos \gamma_{13} = \sigma_{21}^*; 1, 2, 3$$

где S_i^* и S_i – единицы площади деформированного и недеформированного тела соответственно, а физические соотношения записываются в форме между истинными напряжениями и деформациями [3].

Для расчета упругопластического деформирования был выбран критерий пластичности Губера-Мизеса в форме $F \equiv \sigma_i^{tr} - H(\chi) = 0$, где χ – скалярный параметр упрочнения, $\sigma_i^{tr} = \sqrt{(3/2) \sigma_{kl}^{tr} \sigma_{kl}^{tr}}$ – интенсивность истинных напряжений, определяемая через компоненты девиатора истинных напряжений σ_{kl}^{tr} . Связь между приращениями компонент тензора истинных напряжений σ_{kl}^{tr} и тензора истинных деформаций ε_{ij}^{tr} на этапе упругопластического деформирования принимается в виде уравнений типа Прандтля-Рейсса для упрочняющегося материала.

Результаты решения

Создание клинч-соединений предполагает наличие следующих структурных элементов, участвующих в технологическом процесс: подвижной матрицы, двух закрепленных штамповочных листов, неподвижного пуансона, которые схематично изображены на рисунке 1. В силу осесимметричности матрицы и пуансона, можно решать осесимметричную задачу, если радиусы штамповочных листов будут значительно больше, чем радиусы матрицы и пуансона (которые можно считать абсолютно жесткими). Для одного из расчетных случаев, определяемых геометрией пуансона и матрицы, было проведено численное моделирование процесса изготовления клинч-соединений.

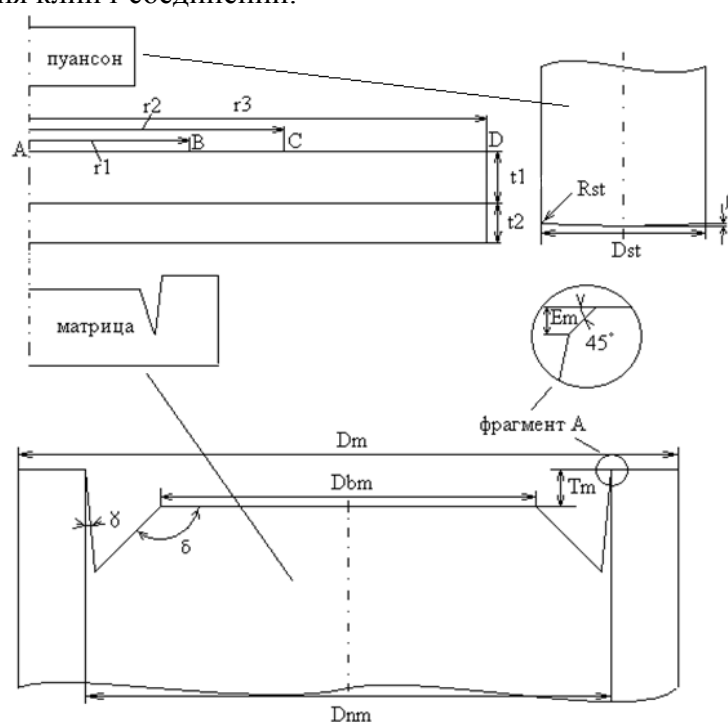


Рис. 1. Схема клинч-соединения

На рисунке 2 приведено распределение интенсивности напряжений по Мизесу после окончания процесса создания клинч-соединений для различных значений прижимной силы ($3t$, $7t$, $10t$, $14t$). На этих рисунках приведена истинная форма деформирования составных частей клинч-соединения.

На следующем этапе нагружения удаляется пуансон, и удаляется матрица. Рисунок 3 иллюстрируют остаточные напряжения в клинч-соединении. Это, соответственно, распределение по поперечному сечению стальных листов интенсивность напряжения по Мизесу σ_i , нормальные радиальные напряжения σ_{rr} , нормальные осевые напряжения σ_{zz} и касательные напряжения τ_{rz} .

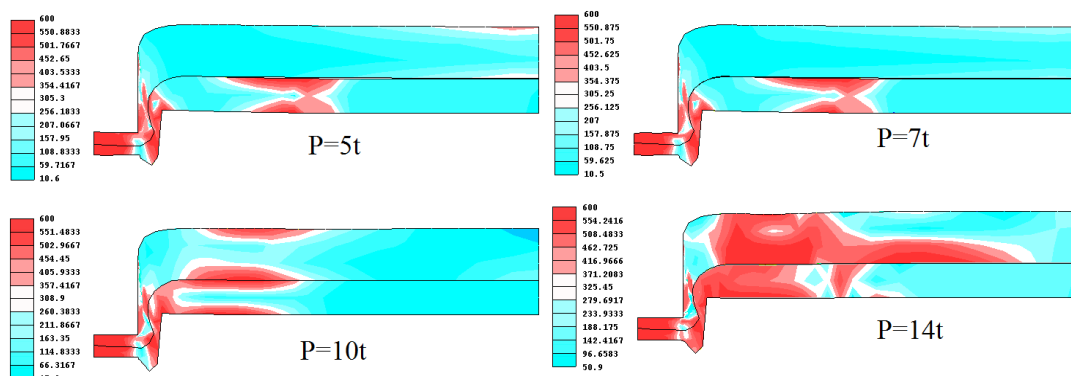


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу

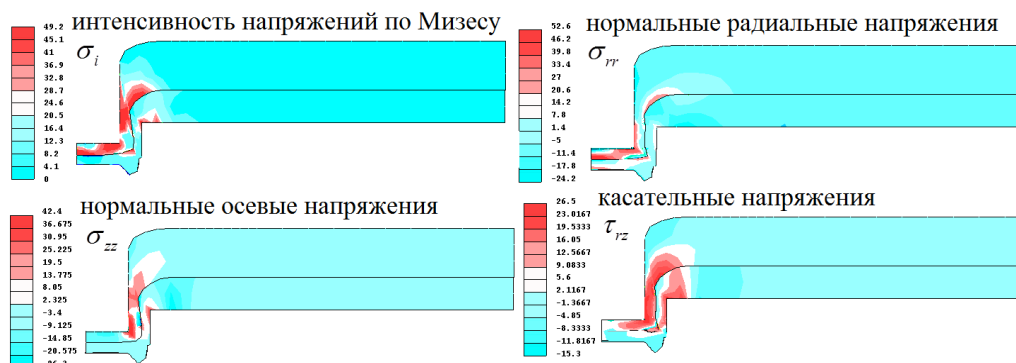


Рис. 3. Остающиеся напряжения в клинч-соединении

Анализ результатов и выводы

Было исследовано влияние величины шага кинематического нагружения на сходимость конечно-элементного решения для различных этапов решения задачи. Выяснено, что величина шага кинематического нагружения напрямую зависит от степени дискретизации расчетной области, и для выбранного базового конечно-элементного разбиения величина шага не должна превосходить характерного размера высоты конечного элемента в зоне внедрения пуансона. Исследовалось влияние кинематического закрепления по части нижней поверхности нижнего стального листа. Вычислительный эксперимент показал, что наличие на этой части расчетной области кинематических граничных условий (отсутствие вертикальных смещений) практически не влияет на решение задачи при условии достаточного прижимного усилия для верхнего листа клинч-соединения. Исследовалось влияние величины силы прижима верхнего листа клинч-соединения. Определено оптимальная величина прижимного усилия, в результате которого стальные листы не расходятся в процессе создания клинч-соединения, и, в то же время, не появляются дополнительные зоны концентрации напряжений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научных проектов № 15-41-02555 и № 15-41-02557.

Список литературы

1. Поздеев А.А., Трусов П.В., Няшин Ю.И., Большие упругопластические деформации: теория, алгоритм, приложения. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
2. Golovanov A., Sultanov L., Numerical Investigation of Large Elastoplastic Strains of Three-Dimensional Bodies // International Applied Mechanics, Volume 41, Issue 6, June 2005, Pages 614-620.
3. Berezhnoi D.V., Paimushin V.N., Two formulations of elastoplastic problems and the theoretical determination of the location of neck formation in samples under tension // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – Volume 75. – Issue 4. – 2011. – pp. 447-462.
4. Shamim M.R., Berezhnoi D.V., Investigation of deformation at a centrifugal compressor rotor in process of interference on shaft // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, Vol. 158, 012083.

05.13.18

Д.В. Бережной, М.Р. Шамим, А.А. Саченков

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, berezhnoi.dmitri@mail.ru, shamimta@aol.com, sarga1507@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-129-131

В настоящей работе в рамках геометрически нелинейного описания деформирования проводится расчет элемента обтекателя, представляющего собой многослойную оболочку из углепластика, при термосиловом нагружении. Исследуется влияние граничных условий, в том числе с учетом контактного взаимодействия оболочки с оснасткой, на процесс деформирования оболочки вплоть до момента потери устойчивости. Результаты показывают приемлемость применения предложенной методики для нелинейного расчета многослойных тонкостенных конструкций с учетом их контактного взаимодействия с оснасткой. Отмечено, что учет контактного взаимодействия может привести к принципиально иным результатам.

Ключевые слова: многослойные оболочки, контактная задача, термосиловое нагружение, метод конечных элементов.

Введение

При построении физических моделей многослойных ортотропных оболочек, вводятся всевозможные подходы, основанные как на различных гипотезах для каждого слоя оболочки [1], так и на единых гипотезах для всех слоев тонкостенной конструкции [2]. В первом случае порядок разрешающей системы зависит от количества слоев. Во втором случае порядок системы не зависит от числа слоев, что открывает, в частности возможности, для эффективного применения МКЭ в расчетах ортотропных многослойных оболочек. Требуется разработать методику построения изопараметрического трехмерного конечного элемента (КЭ) сплошной среды, приспособленного также для расчета оболочек средней толщины при однослойной аппроксимации по толщине. Поэтому получили распространение специальные элементы оболочек, которые имеют в качестве узловых степеней свободы перемещения узлов, расположенных на лицевых поверхностях.

Постановка задачи

Структурно используемый в работе конечный элемент представляет собой искривленный параллелепипед, состоящий из набора N слоев по толщине, каждый из которых является ортотропным материалом с осями ортотропии α, β, γ . При этом предполагается, что плоскость α, β , параллельна плоскости локальных координат ξ, η вдоль любой прямой по толщине, т.е. ось ортотропии γ параллельна локальной координате ζ . Вводятся ковариантные компоненты деформаций:

$$\varepsilon_{\xi\xi} = \frac{\partial r}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial v}{\partial \xi}, \varepsilon_{\eta\eta} = \frac{\partial r}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial v}{\partial \eta}, \varepsilon_{\zeta\zeta} = \frac{\partial r}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial v}{\partial \zeta},$$
$$\varepsilon_{\xi\eta} = \frac{\partial r}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial r}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial v}{\partial \xi}, \varepsilon_{\eta\zeta} = \frac{\partial r}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial v}{\partial \zeta} + \frac{\partial r}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial v}{\partial \eta}, \varepsilon_{\xi\zeta} = \frac{\partial r}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial v}{\partial \zeta} + \frac{\partial r}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial v}{\partial \xi}.$$

при вычислении которых через перемещения используется метод двойной аппроксимации деформаций [3].

На основе предложенного конечного элемента проводится дискретизация расчетной области, которая представляет собой многослойную усеченный коническую оболочку, нагруженную по части внешней поверхности вдоль образующей постоянным внешним давлением 1 атм и медленно нагреваемую до 60⁰С. В процессе повышения температуры конструкция теряет устойчивость, момент наступления которой определяется в рамках

методики нелинейного деформирования, предложенной авторами ранее [4]. Исследуется влияние условий кинематического закрепления оболочки, причем могут быть закреплены как различные участки торцевых поверхностей оболочки, так и реализованы условия контактного взаимодействия с жестко закрепленными стальными коническими шайбами, на которые насаживается оболочка перед нагружением. При этом сам процесс насадки также реализуется в рамках процесса контактного взаимодействия, конечно-элементная методика которого реализована в [5]. Также исследуется возможность замены многослойной оболочки на однослойную с приведенными упругими модулями. На рисунке 1 приведена модель оболочки с торцевыми кольцами, на которые оболочка насаживается, на рисунке 2 приведена схема силового нагружения оболочки. Схема укладки слоев для различных участков оболочки приведена на рисунке 3, где черный цвет предполагает основу, синий цвет – слои, уложенный вдоль оси оболочки, бирюзовый – слои по окружности.

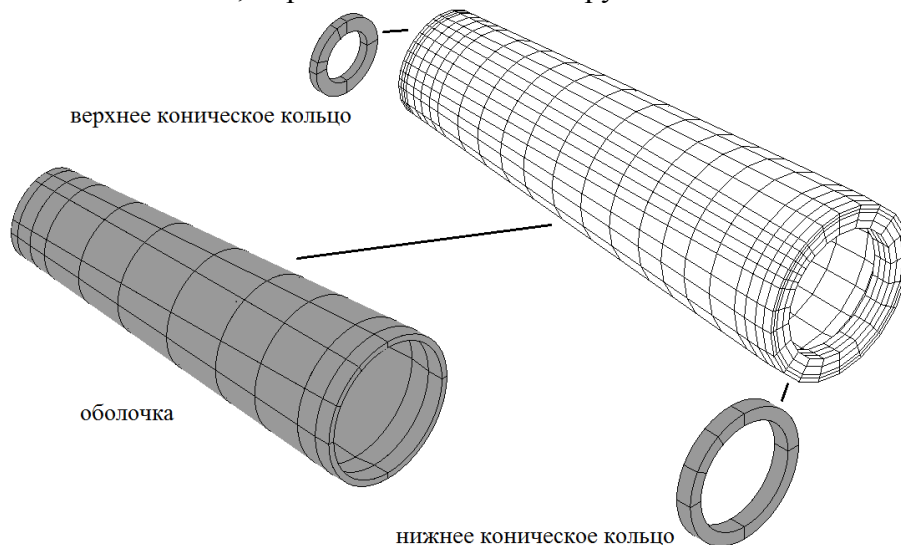


Рис.1. Модель оболочки с торцевыми кольцами

В таблице приведены результаты расчета потери устойчивости конструкции для однослойной и многослойной моделей для различных граничных условий. Начальная температура расчетной области – 20°C.

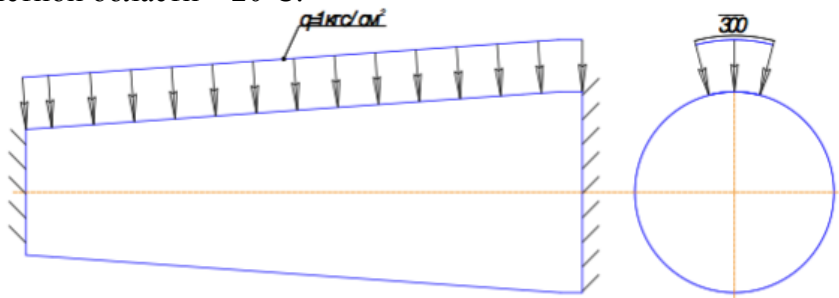


Рис.2. Схема силового нагружения оболочки



Рис.3. Схема укладки слоев в разных частях оболочки

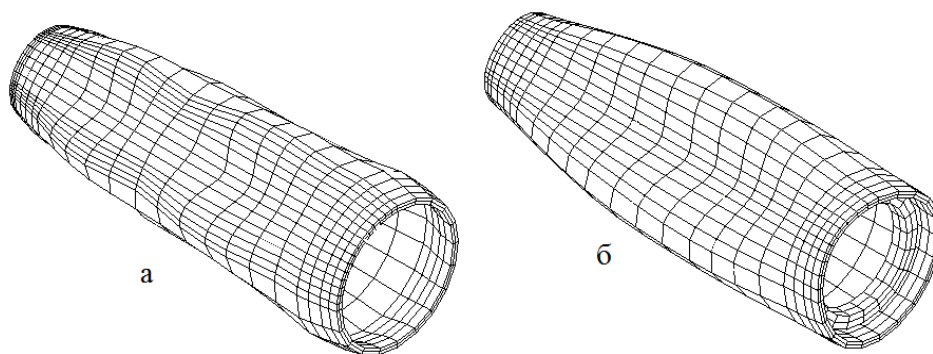


Рис.4. Схема укладки слоев в разных частях оболочки

Результаты решения

Схема закрепления 1 предполагает жесткое закрепление расчетной оболочки по торцам, схема закрепления 2 предполагает закрепление конических колец, с которыми контактирует насаженная на них оболочка, схема закрепления 3 совпадает со схемой 2, только дополнительной заданы ограничения в осевом направлении для торцов оболочки. На рисунке 4 приведены формы оболочек в момент нагружения, предшествующий моменту потери устойчивости для случая жесткого закрепления торцов оболочки (рис.4, а) и для случая учета контактного взаимодействия оболочки с коническими шайбами (рис.4, б).

Таблица. Результаты расчета устойчивости оболочек.

Модель	Однослойная			Многослойная		
Температура потери устойчивости T_{buck} [°C]	82	66	79	99	66	95
Первые главные напряжения σ_1 [МПа]	113	91	111	159	105	158
Третьи главные напряжения σ_3 [МПа]	-202	-87	-173	-328	-85	-254
Номер схемы закрепления	1	2	3	1	2	3

Анализ результатов и выводы

Можно отметить, что в данной задаче использование однослойной схемы для моделирования оболочки занижает температуру, при которой происходит процесс потери устойчивости, а максимальные сжимающие напряжения в слоях выше. При контактном закреплении оболочки через шайбы температура потери устойчивости падает примерно на 25%, причем характер распределения напряжений в оболочке в момент нагружения перед потерей устойчивости существенно другой.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научных проектов № 15-41-02555 и № 15-41-02557.

Список литературы

1. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. 375с.
2. Григолюк Э.И., Куликов Г.М. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин. – М.: Машиностроение, 1988. 288с.
3. Бережной Д.В., Сагдатуллин М.К., Саченков А.А. Универсальный конечный элемент для расчета комбинированных конструкций // Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2012. – №17. – С.150-157.
4. Абросимов Ю.А., Бережной Д.В., Еранов А.П., Сибгатуллин Р.Г. Расчет деформирования ротора центробежного компрессора в процессе его насадки на вал // Научно-технический вестник Поволжья. №5, Казань, 2013. – С.94-97.
5. Бережной Д.В., Сагдатуллин М.К., Султанов Л.У. Расчет взаимодействия деформируемых конструкций с учетом трения в зоне контакта на основе метода конечных элементов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 14. С. 478-481.

05.13.18

Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский

"ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет"
(ПНИПУ),

Центр высокопроизводительных вычислительных систем,
Пермь, liliya85@gmail.com, modorsky@pstu.ru

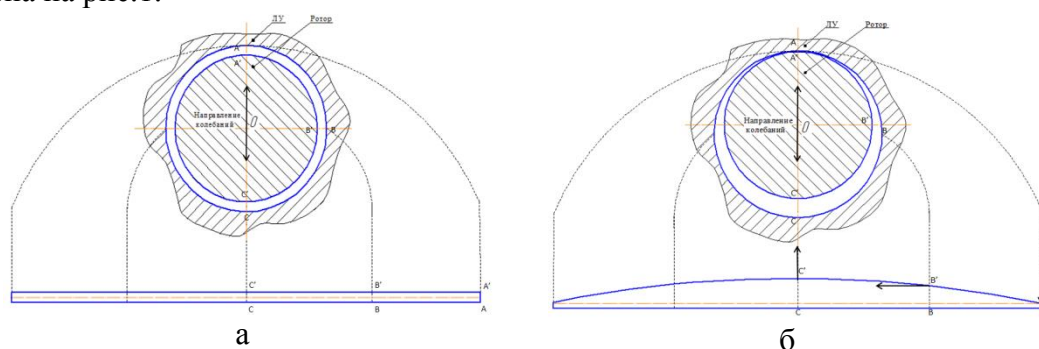
АНАЛИЗ РАБОТЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЯХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-132-134

В уплотнениях лабиринтного типа рабочая среда герметизируется за счет дросселирования ее при движении в осевом направлении через последовательно расположенные сужения и расширения. Однако чтобы обеспечить азровиброустойчивость, необходимо учитывать процессы движения рабочей среды, протекающие в окружном направлении лабиринтного уплотнения (ЛУ) при вибрациях ротора. Публикации, связанные с вибрационными процессами в ЛУ, рассматривают влияние прецессии, геометрических характеристик ЛУ и не учитывают влияние газодинамических сил. В данной работе показано как колебания ротора в зазоре ЛУ моделируются нелинейной динамической квазидвумерной газодинамической моделью развертки зазора ЛУ с подвижными границами. В этой работе показано как колебания ротора в зазоре ЛУ моделируются нелинейной динамической квазидвумерной газодинамической моделью развертки зазора ЛУ с подвижными границами. Также проведен анализ работы газодинамических сил в ЛУ центробежных компрессоров ГПА.

Ключевые слова: лабиринтные уплотнения, работа газодинамических сил, колебания ротора, развертка ЛУ ГПА, геометрические характеристики.

Важным фактором, влияющим на колебательные процессы в ЛУ центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата (ЦК ГПА) являются волны возмущений [5-6] в газодинамическом потоке в окружном направлении ЛУ [1]. При анализе причин возникновения опасных условий эксплуатации ЛУ, учитывались собственная частота газодинамической полости ЛУ, лопаточная и роторная частоты. Расчетная модель задачи подразумевает возможность анализа отклика газодинамической полости ЛУ на различные компоненты спектра колебаний ротора, в т.ч. соответствующие лопаточным частотам [2-4]. В данной работе учитываются не все компоненты спектра. На данном этапе исследований проведены расчеты колебаний конструкции на роторной частоте. Расчетная схема представлена на рис.1.



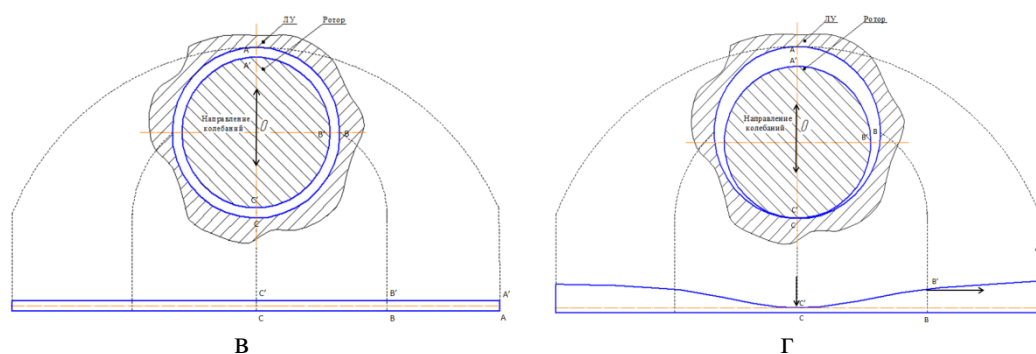


Рис. 1– Анализ процессов в ЛУ (1FSI постановка):

- (а) основное положение ротора в ЛУ; (б) движение "вверх" ротора в ЛУ;
(в) основное положение ротора в ЛУ; (г) движение "вниз" ротора в ЛУ

В качестве модели рассматривается развёртка ЛУ, ширина которой соответствует ширине ЛУ. В процессе счета в контрольных точках фиксируются колебания перемещений, скоростей, давлений и газодинамической силы, действующей на ротор в районе ЛУ. Таким образом, в однонаправленной FSI-постановке движение ротора заменено на движение поршней, расположенных диаметрально-противоположно, и движущихся с заданными амплитудой и частотой (рис.2). Анализ развёртки ЛУ показал, что изменение зазора по длине окружности ротора в районе ЛУ изменяется по синусоидальному закону. Это позволило заменить сложную трехмерную модель на более простую одномерную. Выдавливание газа при уменьшении зазора и заполнение свободного объема газом при увеличении зазора в процессе колебаний ротора в ЛУ моделируется двумя движущимися по гармоническому закону поршнями. Частота их колебаний одинаковая и соответствует частоте колебаний ротора, рассчитанной исходя из длины пробега волны, равной длине дуги окружности, описывающей ротор. Амплитуды колебаний поршней равны между собой и соответствуют величине поперечных колебаний ротора.

Поскольку в расчетах учитывается, что процессы изменяются во времени модель можно считать квазидвумерной, динамической.

Вначале расчеты проводились при постоянной частоте колебаний для различных диаметров ротора (этап проектирования). Осуществлялся поиск такой геометрии ЛУ, при которой не будет происходить усиление колебательных процессов.

Обработка результатов вычислительных экспериментов, проведенных при изменении значений диаметра ротора в зоне ЛУ от 65 мм до 292 мм позволил построить зависимость амплитуды газодинамической силы, действующей на ротор в зоне ЛУ от диаметра ротора(рис.2).

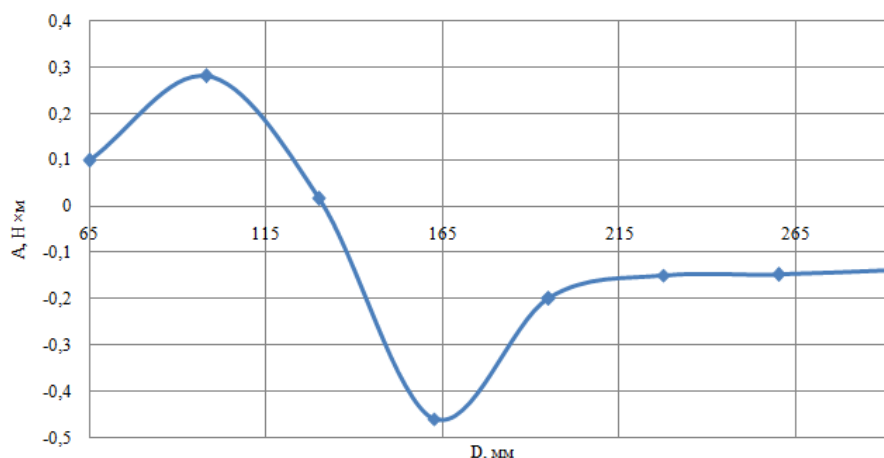


Рис.2– Зависимость амплитуды газодинамической силы, действующей на ротор в зоне ЛУ от диаметра ротора

При анализе влияния геометрических характеристик ЛУ выявлено, что при заданных условиях колебаний и диаметре ротора 130 мм возникают расходящиеся колебания газодинамической силы.

В процессе эксплуатации ЦК ГПА работа происходит на различных скоростях вращения в пределах рабочего диапазона. Поэтому, на втором этапе был проведен расчет газодинамических процессов в ЛУ при различных скоростях вращения и поиск условий усиления колебаний. Собственные частоты газодинамической полости не изменялись.

Обычно при рассмотрении процессов ослабления и усиления учитывают, что условием возникновения "раскачки" ГПА является то, что работа газодинамических сил, совершаемая в газодинамической полости должна быть положительной. Получены временные зависимости работы, совершаемой газодинамической силой, возникающей в районе ЛУ (Таблица 1).

Таблица 1– Зависимость работы газодинамических сил в ЛУ от геометрических характеристик ротора.

Номер эксперимента	Диаметр ротора, мм	Работа, совершаемая газодинамическими силами, Н×м
1	65	0.098
2	98	0.281
3	130	0.017
4	162.5	-0.458
5	195	-0.198
6	227.5	-0.149
7	260	-0.147
8	292.5	-0.136

Работа рассчитывалась на определенном временном интервале.

При положительном значении работы имеет место усиление колебаний в районе ЛУ. Если работа меньше нуля, то вибрации в районе ЛУ затухают.

Обнаружено, что для исключения резонансных режимов в ЛУ, возникающих при изменении скорости вращения ротора при некоторых значениях среднего диаметра ЛУ необходимо реализовывать программу ступенчатого изменения скорости вращения.

Исследование выполнено в Центре коллективного пользования на базе Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877).

Список литературы

1. Бутымова Л.Н. Влияние вибраций на газодинамические процессы в лабиринтных уплотнениях центробежного модельного компрессора газоперекачивающего агрегата / Л.Н. Бутымова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 47. – С. 243-259.
2. Butymova L.N. Numerical modeling of interaction in the dynamic system "gas-structure" with harmonic motion of the piston in the variable section pipe / L.N. Butymova, V. Ya. Modorskii, V. Yu. Petrov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – P. 030103-1-030103-5.
3. Mekhonoshina, E. V. Impact of magnetic suspension stiffness on aeroelastic compressor rotor vibrations of gas pumping units / E. V. Mekhonoshina, V. Ya. Modorskii // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol.1770. – С. 030113-1-030113-5.
4. Nishii Kazufumi, Furukawa Akinori, Watanabe Satoshi, Miyake Kunihiro Experimental Study on Leakage Flow in Labyrinth Seals with Asymmetric Geometries, AIP Conference Proceedings. 1225 (1) (2010), 91.
5. Дзева И.Ю. Математическое моделирование работы бесконтактного пальчикового уплотнения турбомшины / Дзева И.Ю.
6. Vedeneev, A.V. Experimental investigation of single-mode panel flutter in supersonic gas flow / Vedeneev A.V., Guvernyuk S., Zubkov A., Kolotnikov M. // Fluid Dynamics. – 2010 – Vol.45(2). – С.312.

05.13.00

Л.А. Галиуллин

Набережночелнинский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
кафедра информационных систем,
Набережные Челны, galilenar@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-135-137

Спроектирована автоматизированная система диагностики на базе объектно-ориентированного подхода. Для проверки качества сборки и проведения диагностики ДВС, оборудованных электронным контроллером, предложено внедрение на заводе-производителе технического комплекса, обеспечивающего автоматическое управление технологическими режимами работы ДВС. Предложена разработка автоматизированная система диагностики, позволяющая эффективно производить диагностику двигателя.

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, диагностика, программирование, контроллер, модель.*

Рост энерговооруженности всех отраслей промышленности во всем мире вызвал широкое развитие двигателестроения, в том числе и производства двигателей различных типов, в связи, с чем проблема их совершенствования приобретает большое значение [1].

Решение проблемы совершенствования в большей степени зависит от соответствия процесса впрыска топлива рабочему процессу, происходящему в двигателях. Для постоянного управления и контроля процессом работы ДВС необходимо внедрение контроллера. Электронный блок управления (контроллер) позволяет управлять соленоидными насос-форсунок. Он контролирует и обрабатывает различные поступающие сигналы измерительных датчиков. Основные данные – это частота вращения двигателя и нагрузка, с которой водитель может оказывать прямое воздействие через педаль газа. Контролируемые параметры также включают температуру воздуха, топливо, давление охлаждающей жидкости и турбонагнетателя. Эти основные функции могут быть дополнены множеством других операций, направленных на повышение удобства. Контроллер должен удовлетворять строгим требованиям надежности работы путем компенсации и выявления неисправностей функционирования отдельных компонентов. Он также предназначен для облегчения диагностики неисправностей двигателя и его системы подачи топлива.

Для проверки качества сборки и проведения диагностики ДВС, оборудованных электронным контроллером, необходимо внедрение на заводе-производителе технического комплекса, обеспечивающего автоматическое управление технологическими режимами работы ДВС [2].

Создание автоматизированной системы осуществляется на базе объектно-ориентированного подхода. Преимущество данного подхода заключается в интерфейсе для загрузки проекта диагностики и поддержании протокола обмена данными OBD-II между электронным блоком управления MS-6.1 фирмы «Bosch». Исходный текст программы разрабатывается на базе языка программирования Visual C++ [3].

Для создания структуры модели проекта необходимо определить исходную структуру процесса диагностики, отображающую схему работы автоматизированной системы диагностики (рис. 1), а также установить функциональные особенности заданных режимов.

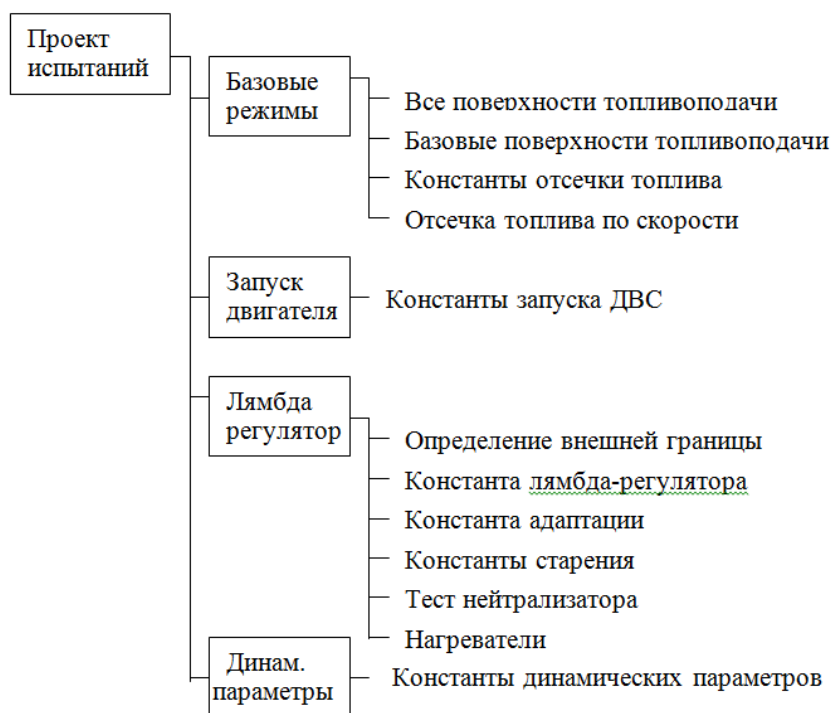


Рис. 1 - Структура проекта

Во время проведения диагностики вся информация сохраняется в память ECU в виде таблицы, структура которой представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сводная таблица параметров

№ п/п	Параметр 1	Параметр 2	Параметр 3	...	Параметр m
1	A11	A21	A31	...	Am1
2	A12	A22	A32	...	Am2
3	A13	A23	A33	...	Am3
	...	...	...	...	...
S	A1S	A2S	A3S	...	AmS

где:

A_{ij} – значение параметра ДВС;

M – количество измеряемых параметров;

S – число контрольных точек замеров в процессе диагностики;

Для более точного выбора режимов диагностики необходимо учитывать основные характеристики ДВС, требующие особого контроля. При диагностике ДВС необходима проверка следующих параметров:

- текущие параметры топливopодачи;
- регулирование холостого хода;
- функциональность датчика надува воздуха;
- переход топливной смеси из режима бедной в насыщенную.

Изначально в электронный блок управления загружается файл параметров ДВС и автомобиля [4]. После загрузки производится запуск ДВС с последующим воздействием на исполняющие устройства для проведения диагностики ДВС [5]. В процессе диагностики происходит сбор информации с датчиков. Полученная информация отображается на мониторе (Рис. 2).

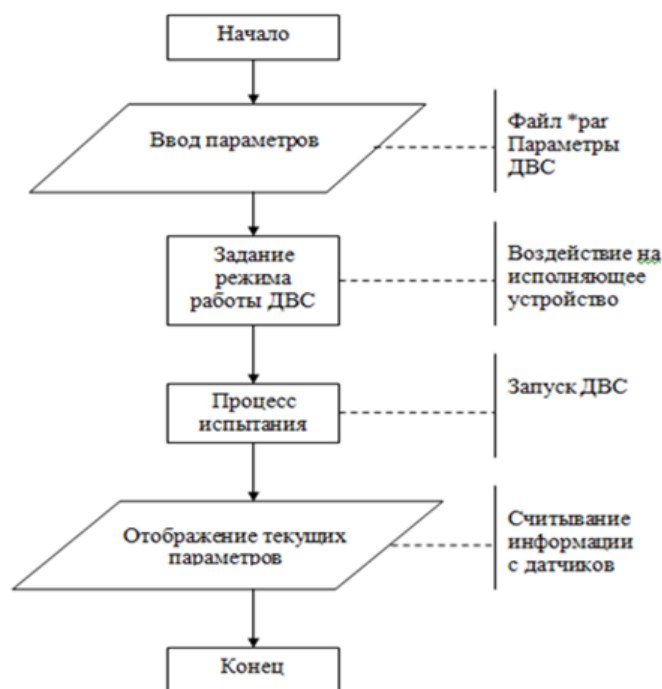


Рис. 2 – Алгоритм работы автоматизированной системы диагностики

В результате проведенной работы предложена автоматизированная система диагностики двигателя автомобиля на базе контроллера фирмы Bosch MS-6.1 [6].

В процессе выполнения проекта были проведен анализ существующих систем диагностики ДВС, который показал необходимость разработки автоматизированной системы [7]. Для создания программного обеспечения верхнего уровня была задана структура процесса диагностики, основанная на конструкторско-технологических параметрах ДВС. В процессе разработки структуры системы диагностики были определены основные группы режимов. Для реализации режимов диагностики были определены константы переменных, закрепленные за группами в соответствии с их функциональными назначениями, что позволяет исключить предварительную настройку дерева проекта системы диагностики. На основании заданной структуры процесса диагностики было реализовано программное обеспечение верхнего уровня [8].

Список литературы

1. Y. Shatnawi, M. Al-Khassaweneh. Fault diagnosis in internal combustion engines using extension neural network // IEEE Transactions on Industrial Electronics. № 61 (3). 2014. P. 1434-1443.
2. Y. Yu, J. Yang. The development of fault diagnosis system for diesel engine based on fuzzy logic // Proceedings - 2011 8th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. 2011. P. 472-475.
3. Yao, Z.T., Pan, H.X. Engine fault diagnosis based on improved BP neural network with conjugate gradient // Applied Mechanics and Materials. 2014. № 536, P. 296-299.
4. Валиев Р.А., Хайруллин А.Х., Шibaков В.Г. Модели и методы синтеза алгоритмов и программ систем автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении // Вестник машиностроения. – 2015. – №6. – С.48–51.
5. Хайруллин А.Х. Модели и методы синтеза алгоритмов и программ систем автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении / А.Х. Хайруллин, Р.А. Валиев, В.Г. Шibaков // Вестник машиностроения. – 2015. – № 6. – С.48–51.
6. Галиуллин Л.А. Формирование базы знаний автоматизированной системы испытаний дизелей / Л.А. Галиуллин // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – №8. – С. 41-44.
7. Valiev R.A. Automated design systems for manufacturing processes / R.A. Valiev, A.K. Khairullin, V.G. Shibakov // Russian Engineering Research. 2015. № 9. P. 662-665.
8. Галиуллин Л.А. Управление дизелем при проведении испытаний на основе гибридной нейронной сети / Л.А. Галиуллин // Информационные технологии моделирования и управления. – 2010. – № 6 (65). – С. 732-737.

05.13.00

С.В. Данилова к.э.н., А.И. Офилова, Н.А. Андреева

Ивановский государственный университет,
экономический факультет,
кафедра информационных технологий в экономике и организации производства,
Иваново, swdanilova@mail.ru, alena_trufanova1512@mail.ru, andreeva.tasha.37@gmail.com

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ЛОГИСТИЧЕСКИМИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ В ИНТЕРНЕТ-ТОРГОВЛЕ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-138-140

В работе исследованы основные тенденции и факторы развития логистических бизнес-процессов. Определены пути повышения эффективности работы интернет-магазина. Рассмотрены общие правила и особенности идентификации бизнес-процессов в логистических системах. Сделан вывод об эффективности процессного подхода в силу его гибкости при моделировании бизнес-процессов в интернет-магазинах и предприятиях в целом.

Ключевые слова: *бизнес-процессы, логистика, интернет-торговля.*

Развитие информатизации дает возможность открывать новые горизонты ведения бизнеса. Быстрое распространение Интернета существенно повлияло и на сферу торговли товарами и услугами, породив новое направление – интернет-торговлю, под которой в широком смысле подразумевается розничная и оптовая покупка/продажа товаров и услуг посредством электронной сети. Наиболее популярной является схема В2С («Бизнес-Потребитель»), которая предусматривает розничную торговлю через интернет-магазины, хотя параллельно не менее динамично развиваются и другие форматы электронного бизнеса, в том числе сфокусированных на корпоративном и правительственном секторах.

Розничная электронная торговля – сложный проект, в силу специфики организации работ самого интернет-магазина. Со стороны покупателя работа интернет-магазина выглядит довольно простой: зашел на сайт магазина, выбрал необходимый товар, способ оплаты и доставки, произвел оплату и на этом действия покупателя заканчиваются. Однако не все так просто с обратной стороны, при открытии интернет-магазина, необходимо грамотно сформировать работу магазина. Каждый потребитель хочет получить качественный товар и в максимально короткие сроки. Поэтому одним из главных моментов эффективной работоспособности интернет-магазина – построение эффективного функционирования логистических бизнес-процессов и постоянное их усовершенствование с помощью современных информационных технологий.

Современное представление предпринимателя базируется на том, что бизнес необходимо четко определять, анализировать и улучшать. При моделировании бизнес-процессов основным преимуществом является возможность их самоусовершенствования и развития. Грамотное построение и постоянное совершенствование бизнес-процессов помогает сохранять конкурентоспособность любого предприятия на рынке.

Вновь создаваемые торговые интернет-магазины, в случае удачного старта, преуспевают первое время за счет первенства в своей товарной нише и серьезной экономии масштабов, так как на начальном этапе товарооборот компании достаточно невелик. Если на начальном этапе функционирования интернет-магазина основным моментом является выбор ниши и целевой аудитории, то с появлением конкурентов и ростом бизнеса, дальнейшая жизнеспособность предприятия напрямую зависит от эффективного функционирования бизнеса – совершенствования логистической составляющей [1].

Для эффективного использования логистических подходов необходимо обеспечивать внутреннюю интеграцию реализуемых процессов, которые могут быть обеспечены за счет разработки и внедрения логистических систем, основанных на процессном подходе к управлению. Решение основных задач логистики являются: оснащение современным оборудованием, средствами механизации, автоматизации и компьютеризации складских работ, грамотная и тщательная организация складского процесса. Если эти задачи не реализованы на предприятии то, это приводит к нерациональному использованию финансовых и материальных ресурсов на уровне организаций бизнеса.

В современном процессном управлении выделяют два концептуальных подхода улучшения бизнес-процессов:

1. Пошаговый (по Демингу) – подход улучшения процессов, который требует небольших финансовых вложений либо не требуют их вообще.

Пошаговый подход приводит к совершенствованию бизнес-процессов и ориентирован на улучшение процессов в рамках функционально-специализированных структур управления с целью их стандартизации в рамках информационных систем. Данный подход применяется для организации складского хозяйства.

2. Кардинальный подход (по Хаммеру и Чампи) приводит к существенным переменам процессов и изменениям в организационной структуре управления, то есть реинжиниринг.

Кардинальный подход предполагает исследование самих процессов, имеющих ценность для потребителя. Подход предполагает исследование процесса как объекта управления с последующим переходом к процессно-ориентированной модели управления. В рамках этого подхода реализуется процессное управление, появляется возможность избежать функциональной специализации в управлении или значительно снизить ее роль посредством интеграции бизнес-процессов.

Оптимизация управления бизнес-процессами имеет значение для повышения экономической эффективности деятельности интернет-магазина: уменьшение сроков и затрат на обработку заказов покупателей, повышение качества их обслуживания. В настоящее время разработано множество различных логистических технологий, отличающихся способами управления товарно-материальными потоками и запасами, которые реализуются с использованием средств автоматизации современных информационных систем управления предприятием. Среди наиболее известных и широко применяемых логистических моделей можно отметить такие модели как MRP, JIT, SIC и SCOR.

Будущее логистического сервиса - за развитием IT технологий. Самое важное на сегодняшний день - применение современных информационных систем в работе склада: ERP и WMS системы. Такие системы обеспечивают высочайшую точность сведений о количестве имеющихся товаров, а также инструменты для мониторинга движения материальных ценностей. Важным является оснащение склад механизированной и автоматизированной техникой, например, применение штрихкодирования, технологию RFID. Применения логистических решений способны вывести предприятия на более высокий уровень, исключить возможные убытки на предприятии.

Результативность эффективной деятельности всей информационной системы предприятия зависит от актуальности, всесторонности и полноты данных всех отделов. [2, С. 46]. Для максимально продуктивной и эффективной деятельности работы интернет-магазина – логистическая система должна быть гибкой для оптимального решения поставленных задач, организации оперативного учета, менеджмента, контроля, и планирования.

В заключение необходимо отметить, что рассмотренные подходы по совершенствованию логистических бизнес-процессов интернет-торговли, применимы и к практике традиционного бизнеса. Для того, чтобы деятельность предприятия приносила прибыль и была максимально эффективной необходимо следить за современными тенденциями рынка информационных технологий, которые направлены на своевременное совершенствование логистических процессов компании.

Список литературы

1. Забурдаев В. Ю. Логистика электронной торговли. URL: <http://rvles.ieie.nsc.ru/parinov/e-trade.htm> (дата обращения 10.09.2017).
2. Воронцова Е. В. Логистическая концепция как метод управления потоковыми процессами на предприятии/ Е. В. Воронцова // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. - 2009. - № 14. - С. 28-34.
3. Дергалюк О. Н. Логистический аутсорсинг в России: проблемы и пути их решения / О. Н. Дергалюк, Е. Б. Кметь // Экономическая наука сегодня: теория и практика: Сборник материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. - 2016. - 115 с.
4. Гаджинский А. М. Основы логистики. / А. М. Гаджинский: Учебное пособие. - М.: Маркетинг, 2011. - 234 с.
5. Дыбская В. В. Логистика. Интеграция и оптимизация логистических бизнес-процессов в цепях поставок / В. В. Дыбская. - М.: Эксмо, 2011 - 213 с.
6. Лайсонс К. Управление закупочной деятельностью и цепью поставок/ К. Лайсонс, М. Джиллингем. - М.: 2012. - С. 804.
7. Ковалев В. Секреты успешных предприятий: бизнес-процессы и организационная структура / В. Ковалев, С. Ковалев. - 2010. С -715.
8. Родников А.Н. Логистика Терминологический словарь / А.Н. Родников - М.: Инфра-М, 2011. - 730 с.

05.13.18

¹В.О. Каледин, ¹А.Д. Ульянов, ²Вл.О. Каледин

¹Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Кемеровский государственный университет»,

²АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»

КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ СДВИГОВОЙ БАЛКИ ТИМОШЕНКО С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ВЫГОРАНИЯ МАТЕРИАЛА

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-141-144

Рассмотрен конечный элемент балки конечной сдвиговой жесткости с прямоугольным сечением при поперечном изгибе силами, приложенными на торцах, и начальными (температурными) деформациями, постоянными вдоль ее оси. Температура, модули упругости, модули сдвига и коэффициенты линейного температурного расширения (КЛТР) переменны в сечении и постоянны вдоль оси в пределах элемента. Подобные модели используются при проектировании балочных конструкций из композитов, работающих при высоких температурах, поэтому жесткостные и прочностные характеристики материала исследуемого объекта изменяются вследствие его выгорания. Положение линии приведения задано, эта линия параллельна оси балки и не обязательно проходит через центры жесткости сечений. Определяются деформации, зависящие от линейных перемещений точек линии приведения на торцах и углов поворота торцевых сечений, удовлетворяющие уравнениям равновесия балки и физическому закону Дюамеля-Неймана.

Ключевые слова: балка, сдвиговая жесткость, выгорание, смещение линии приведения, температурные деформации.

Анализ напряжённо-деформированного состояния балок при необратимых изменениях материала, вызванных тепловым воздействием, затруднён смещением центров жесткости от исходной оси балки. Поэтому целесообразно строить в этом случае модель деформирования так, чтобы в ней учитывалась несимметричность сечения.

Рассмотрим балку с прямоугольным поперечным сечением. Ось x направлена вдоль ее оси и расположена на заданной линии приведения. Левое сечение имеет координату, равную нулю, координата второго – положительна и равна длине L . Оси y и z перпендикулярны оси x . Начало системы координат находится в левом сечении и является левым узлом, а точка с координатами $(L, 0, 0)$ – правым узлом.

Деформации балки включают растяжение (сжатие) ε , кручение χ , изгиб в плоскости xu κ_{xu} , изгиб в плоскости xz κ_{xz} , поперечный сдвиг в плоскости xu γ_{xu} , поперечный сдвиг в плоскости xz γ_{xz} . Деформациям соответствуют внутренние силовые факторы: продольная сила N , крутящий момент M_x , изгибающие моменты M_y , M_z и поперечные силы Q_y , Q_z .

Линейные перемещения в сечении складываются из перемещения точки приведения и перемещений, обусловленных поворотами сечения относительно осей, в соответствии с правилом правого винта:

$$\begin{aligned} u_x(x, y, z) &= u_x^0 - \theta_z y + \theta_y z \\ u_y(x, y, z) &= u_y^0 - \theta_x z \\ u_z(x, y, z) &= u_z^0 + \theta_x y \end{aligned} \quad , \quad (1)$$

где u_x^0 , u_y^0 , u_z^0 – перемещения точки приведения, θ_x , θ_y и θ_z – углы поворота сечений вокруг осей x , y и z соответственно [1].

Уравнение равновесия сил, действующих вдоль оси x , является тривиальным: $N = const$. Аналогично, уравнение равновесия моментов относительно оси x (крутящих моментов) имеет вид $M_x = const$. Уравнения равновесия сил, действующих вдоль осей y и z , в отсутствие погонных сил имеют аналогичный вид: $Q_y = const$, $Q_z = const$.

Составим уравнения равновесия моментов:

$$Q_z = \frac{dM_y}{dx}, \quad Q_y = \frac{dM_z}{dx}. \quad (2)$$

Осевая деформация в точке балки, удалённой от её оси:

$$e_x(x, y, z) = \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial u_x^0}{\partial x} - \frac{\partial \theta_z}{\partial x} y + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} z. \quad (3)$$

По закону Дюамеля-Неймана для одноосного напряжённого состояния, выразим с учетом (3) нормальное напряжение через перемещения [2]:

$$\sigma(x, y, z) = E_x \left[\frac{\partial u_x^0}{\partial x} - \frac{\partial \theta_z}{\partial x} y + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} z - \alpha_x \cdot \Delta T \right], \quad (4)$$

где α_x - коэффициент линейного теплового расширения, ΔT - изменение температуры относительно нормальной, а E_x - модуль упругости материала.

Интегрируя напряжения (4) по площади сечения с множителями 1, x и y получаем интегральную осевую силу $N(x)$, изгибающий момент $M_z(x)$ и изгибающий момент $M_y(x)$ соответственно.

Средние деформации поперечного сдвига найдём, дифференцируя перемещения по координатам с учетом (1) [2]:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} = -\theta_z + \frac{\partial u_y^0}{\partial x} - z \frac{\partial \theta_x}{\partial x}, \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} = \theta_y + \frac{\partial u_z^0}{\partial x} + y \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \end{aligned} \quad (5)$$

Интегралы от напряжений поперечного сдвига по сечению дадут поперечные силы:

$$Q_y = GF_y \left(\frac{\partial u_y^0}{\partial x} - \theta_z \right) - GS_y \frac{\partial \theta_x}{\partial x}, \quad Q_z = GF_z \left(\frac{\partial u_z^0}{\partial x} + \theta_y \right) + GS_z \frac{\partial \theta_x}{\partial x}, \quad (6)$$

где через GF_y и GF_z обозначены интегралы от модулей сдвига по сечению, GS_z и GS_y - интегралы от произведений модуля сдвига на координату y и z .

Введём дополнительно следующие обозначения:

$$\kappa_z(x) = \frac{\partial \theta_y}{\partial x}, \quad \kappa_y(x) = -\frac{\partial \theta_z}{\partial x}, \quad \varepsilon(x) = \frac{\partial u_x^0}{\partial x}. \quad (7)$$

Тогда определяющие уравнения можно записать в матричном виде:

$$R(x) + R_T = D\varepsilon(x), \quad (8)$$

где $R(x) = [N \quad Q_y \quad Q_z \quad M_z \quad M_y \quad M_x]^T$ - вектор-столбец внутренних сил и моментов, $\varepsilon(x) = [\varepsilon \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{xz} \quad \kappa_y \quad \kappa_z \quad \chi]^T$ - вектор-столбец деформаций, $R_T = [N_T \quad 0 \quad 0 \quad M_{zT} \quad M_{yT} \quad 0]^T$ - вектор-столбец температурных сил и моментов, D - интегральная матрица упругости по сечению.

Можно построить шесть линейно независимых систем функций, отвечающих уравнениям равновесия. Введем коэффициенты разложения вектора внутренних сил и моментов по базису равновесных систем сил вида:

$$R(x) + R_T = N \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Q_y \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Q_z \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ x \\ 0 \end{bmatrix} + M_z \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + M_y \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + M_x \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Приравняв правые части (9) и (8) между собой, выразим базисные функции равновесных деформаций, обратив матрицу определяющего уравнения и умножив на нее обе части тождества. Используя кинематические соотношения (5) и (7), выразим базисные функции для перемещений.

В отсутствие жестких смещений левый торец балки будет неподвижен, а правый подвержен только деформационным смещениям. Связать перемещения правого торца Δ с коэффициентами разложения Q можно посредством матрицы A , состоящей из значений базисных функций перемещений в крайнем правом торце балки:

$$Q = A^{-1}\Delta \quad (10)$$

Тем самым, зная перемещения узлов элемента, можно получить распределение внутренних сил и моментов по его длине:

$$R(x) = \Omega A^{-1}\Delta - R_T, \quad (11)$$

где R_T - температурные моменты и усилия, Ω - матрица базисных функций.

Зная распределение внутренних усилий можно вывести формулу энергии деформации:

$$W = \Delta^T A^{-T} \int_0^L \Omega^t D^{-1} \Omega dx A^{-1} \Delta - \Delta^T A^{-T} \int_0^L \Omega^t dx D^{-1} R_T. \quad (12)$$

Матрица коэффициентов квадратичной формы в (12) (первого слагаемого) есть матрица жесткости элемента K' , имеющая 6 строк и столбцов (в базисе с исключёнными жёсткими смещениями):

$$K' = A^{-T} \int_0^L \Omega^t D^{-1} \Omega dx A^{-1}. \quad (13)$$

Матрица коэффициентов линейной формы (второго слагаемого) в формуле (12) есть вектор эквивалентных узловых сил. Далее необходимо

перейти к двенадцати степеням свободы, добавив учет жестких смещений:

$$\Delta = X\delta, \quad (14)$$

где δ - вектор всех узловых смещений элемента, Δ - вектор деформационных смещений элемента, X - матрица связи.

Окончательно, матрица жесткости элемента K вычисляется по формуле:

$$K = X^T A^{-T} \int_0^L \Omega^t D^{-1} \Omega dx A^{-1} X, \quad (15)$$

а вектор эквивалентных узловых сил Q_T - по формуле:

$$Q_T = X^T A^{-T} \int_0^L \Omega^t dx D^{-1} R_T. \quad (16)$$

В качестве контрольного примера рассматривается задача о деформировании консольной балки при силовых и температурных воздействиях. Балка имеет длину L и прямоугольное сечение шириной b , где $b/L = 0.4$ и высотой h , где $h/L = 0.4$. Модуль упругости материала E связан с силой P и площадью сечения F выражением $P/EF = 3 \times 10^{-9}$, модуль сдвига определяется соотношением $G/E = 4 \times 10^5$, что должно дать решение, близкое к модели балки Сен-Венана. Коэффициент линейного теплового расширения α определяется выражением $\alpha \times \Delta T = 10^{-2}$, где ΔT - изменение температуры. Нижняя половина сечения балки считается выгоревшей, и в этой зоне модуль упругости равен нулю.

В вычислительных экспериментах анализировалось влияния положения линии приведения по отношению к центру жесткости сечения, смещённому от геометрического центра в результате того, что модуль упругости на половине сечения уменьшился до нуля. Результаты сравнивались с аналитическим решением, полученным с использованием приведения сил и моментов к линии, проходящей через центры жесткости. На рис. 1 (а, б) представлены полученные профили деформаций и напряжений в сечении балки для трех случаев различного нагружения. На рис. 2 представлена зависимость прогибов от осевой координаты для трех вариантов нагружения. Для первого варианта учитывается растягивающая сила и температурные деформации, постоянные по сечению; для второго учитывается растягивающая сила, изменение температуры не учитывается; для третьего учитываются только температурные деформации.

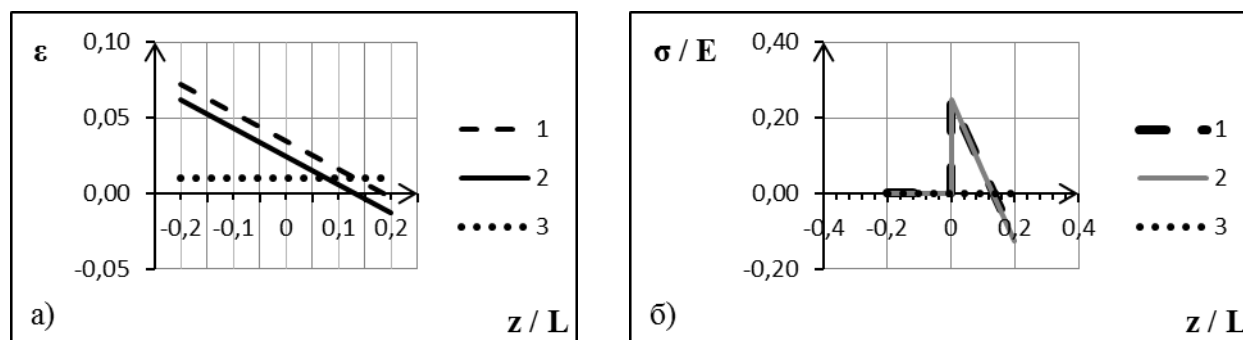


Рис. 1- Распределение деформаций (а) и напряжений (б) от безразмерной координаты по высоте сечения балки

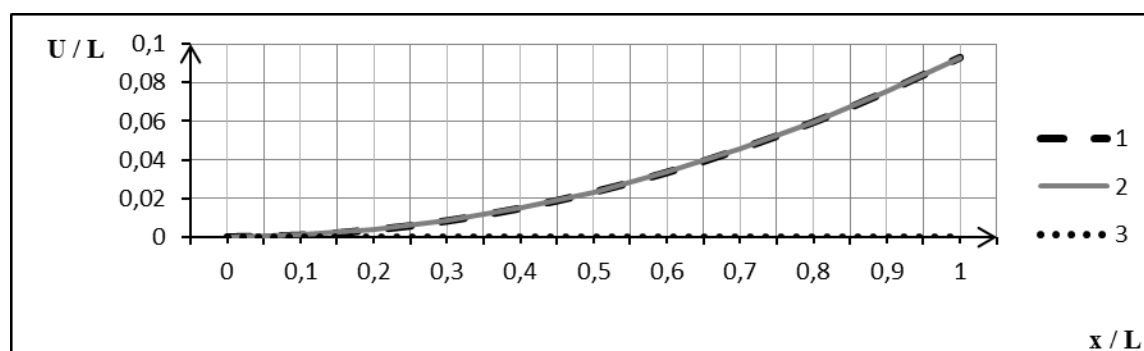


Рис. 2- Зависимость прогибов от безразмерной продольной координаты

Деформации постоянны по сечению при температурном нагружении и линейно изменяются при растяжении силой. В случае одновременного силового и температурного воздействия деформации складываются.

Напряжения изменяются скачком. Это обусловлено выгоранием нижней половины сечения по всей длине балки. Температурные нагрузки напряжений не вызывают. На рисунке 2 видно, что прогибов данный вид нагружения тоже не вызывает, в отличие от растяжения силой. Это обусловлено смещением центра жесткости сечения от линии приведения и созданием плеча силы на нагружаемом торце. Прогибы, деформации и напряжения полностью совпадают с аналитическим решением при любом положении линии приведения в численном расчёте.

Таким образом, предложенная модель применима к анализу напряжённо-деформированного состояния балок с изменяющимися при нагреве модулями упругости в сечении и не требует явного изменения положения линии приведения.

Список литературы

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. – М. НАУКА, 1975. – 576 с.
2. Каледин Вл.О., Страхов В.Л. Численное моделирование термомеханического поведения железобетонных рамных конструкций при нестационарных тепловых воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. №14. – С. 311-330.

05.13.18

¹С.Л. Калюлин, ¹В.Я. Модорский, ²К.А. Баркалов, ²В.П. Гергель, ¹Ю.А. Лаптева,
²Е.А. Козин

¹"ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет"
(ПНИПУ), Центр высокопроизводительных вычислительных систем,
Пермь, ksl@pstu.ru ,

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, victor.gergel@itmm.unn.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ GLOBALIZER И ANSYS ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ КАПЛИ В ПОТОКЕ ГАЗА

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-145-148

Применительно к вопросам исследования процессов обледенения в малогабаритной климатической аэродинамической трубе, представлены результаты оптимизационных 3D расчетов полета капли от впрыска до рабочей зоны в динамике. Отыскивается максимальная температура потока газа при заданной температуре капли, которая соответствует минимальному энергопотреблению при его охлаждении. Осуществлена интеграция программных систем Globalizer и ANSYS Workbench. При этом ANSYS использован как инструмент расчета значений критериев оптимизации, а Globalizer – как инструмент поиска оптимальных параметров.

Ключевые слова: малогабаритная климатическая аэродинамическая труба, глобальная оптимизация, полет капли, численное моделирование, поток газа.

При создании малогабаритной климатической аэродинамической трубы (МКАДТ) замкнутого цикла [1] особую важность приобретает моделирование процессов охлаждения капли в потоке газа для нахождения оптимальных геометрических параметров участка МКАДТ от зоны впрыска до рабочей части, а так же анализ энергоэффективных режимов.

1. Физическая и математическая модели газодинамической задачи

Принимается, что капля с некоторыми скоростью, температурой и диаметром попадает в газ, имеющий заданные скорость и температуру, так, чтобы при контакте с отдаленной преградой выполнялись температурные ограничения. Расстояние до преграды принимается равным 2 м. Отыскивается максимальная температура газа, которая соответствует минимальному энергопотреблению МКАДТ при его охлаждении.

Расчет ведется в трехмерной динамической постановке, моделируется внутренний объем трубы, учитывается двухфазная среда, гравитация, взаимодействие с охлаждающим газодинамическим потоком.

Математическая модель базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии и замыкается уравнениями состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями [2]. Используется метод конечных объемов, при котором поле течения газа аппроксимируется конечным числом расчетных точек. Так как геометрия расчетной области цилиндрическая, высокие скорости газа, длина участка мала, то, целесообразно использование k-ε модели турбулентности, как допустимой при влиянии сил инерции в потоке большим по сравнению с силами вязкости.

2. Параметры и критерии оптимизации газодинамического расчета

Проведена отладка задачи в ANSYS CFX, заданы начальные и граничные условия. Проведены исследования на сходимость решения. Необходимые для реализации итерационного запуска ANSYS в оптимизационной программе Globalizer [3] входные и выходные параметры были параметризованы в CFX и переданы в Workbench.

Были заданы следующие диапазоны изменения входных параметров:

$T_{\text{газа}} = -30 \dots 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ – для температуры газа; $V_{\text{газа}} = 10 \dots 270 \text{ м/с}$ – для скорости газа; $T_{\text{капли}}|_{l=0} = +5 \dots +10 \text{ } ^\circ\text{C}$ – для температуры капли в начальный момент времени; $V_{\text{капли}} = 10 \dots 270 \text{ м/с}$ – для скорости капли в начальный момент времени.

Величина диаметра капли принималась равной 20 мкм, как средняя по распылу из форсунок, и не изменялась в процессе счета.

Были приняты два выходных критерия оптимизации: $T_{\text{капли}}|_{l=2\text{м}} = -0.5 \dots +0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ – для температуры капли в момент, соответствующий достижению ей преграды ($L=2 \text{ м}$); $T_{\text{газа}} \rightarrow \max$ – максимум начальной температуры газа. При этом входной параметр $T_{\text{газа}}$ одновременно является выходным критерием, который стремится к максимуму.

Задача оптимизации решалась с помощью обобщенного алгоритма глобальной оптимизации, реализованного в программной системе Globalizer [3]. Для обеспечения возможности перебора в Globalizer результатов решения газодинамической задачи в ANSYS CFX были написаны соответствующие функции и параметризованы такие значения, как общее время счета (TotalTime) и шаг по времени (TimeSteps).

3. Интеграция Globalizer и ANSYS Workbench 13.0

Принципиальной особенностью системы Globalizer является ориентированность на решение вычислительно-трудоемких задач многоэкстремальной оптимизации. Для получения глобально-оптимальных решений при реалистических временных затратах система обеспечивает эффективное использование современных высокопроизводительных вычислительных систем [2].

Для интеграции систем требовалось обеспечить использование внешнего вычислителя значений функций задачи ANSYS в качестве блока, осуществляющего процедуры вычисления значений функционалов – передать из Globalizer в ANSYS Workbench значения входных параметров, обновить проект и получить значения выходных параметров. Передача параметров была реализована с помощью скрипта на языке IronPython.

4. Результаты оптимизации

В результате работы системы Globalizer было сформировано поле значений входных параметров, удовлетворяющих вышеприведенным (Разд. 2) ограничениям газодинамической задачи (Рис. 1).

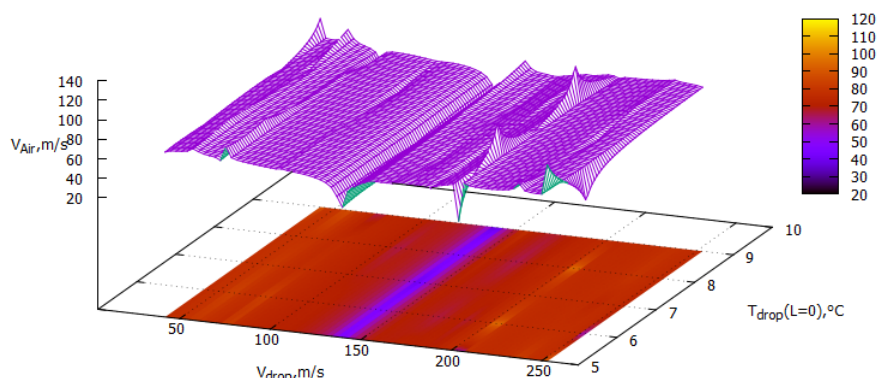


Рис. 1– Поле значений входных параметров, удовлетворяющих выходным критериям задачи оптимизации: $V_{\text{капли}}$ – скорость капли, $T_{\text{капли}}|_{l=0}$ – температура капли в момент впрыска, $V_{\text{газа}}$ – скорость газа

Общее время, затраченное на решение задачи оптимизации в Центре коллективного пользования на базе высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ (24 Tflops), составило 48 часов.

Принималось, что энергоэффективными режимами работы МКАДТ являются такие, при которых температура газа в рабочей части стремится к максимуму при температуре капли равной $+0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ в момент достижения преграды, отстоящей на расстояние 2 м от точки впрыска:

Диапазоны допустимых значений скоростей и температур капли в момент впрыска, согласно экспертных оценок, составили:

$$V_{\text{капли}} = 5 \dots 270 \text{ м/с}; \quad T_{\text{капли}}|_{l=0} = +5 \dots +10 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Значения скоростей и температур капли при энергоэффективных режимах работы МКАДТ, полученные в результате оптимизационных расчетов (Рис. 1), могут изменяться в следующих диапазонах:

$$V_{\text{капли}} = 42.37 \dots 237.63 \text{ м/с}; \quad T_{\text{капли}}|_{l=0} = +5 \dots +9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Анализ данных вычислительного оптимизационного эксперимента показал, что диапазоны значений скоростей и температур капли, соответствующие энергоэффективным режимам работы МКАДТ, являются более узкими по сравнению с предварительно рекомендованными экспертными оценками.

Полученные данные уточняют скоростной (на 26.32%) и температурный (на 20%) режимы впрыска капель, обеспечивающие достижение обледенения [4,5] в рабочей зоне с учетом заданного расстояния экспериментальной модели до зоны впрыска.

На Рис. 2 видно, что варьирование всего двумя параметрами, такими как скорость газа и температура капли в момент впрыска, позволяет добиться необходимого значения температуры капли ($+0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) в момент достижения преграды (экспериментальной модели) при удовлетворении выходному критерию оптимизации, что может позволить обеспечить энергоэффективные режимы работы МКАДТ.

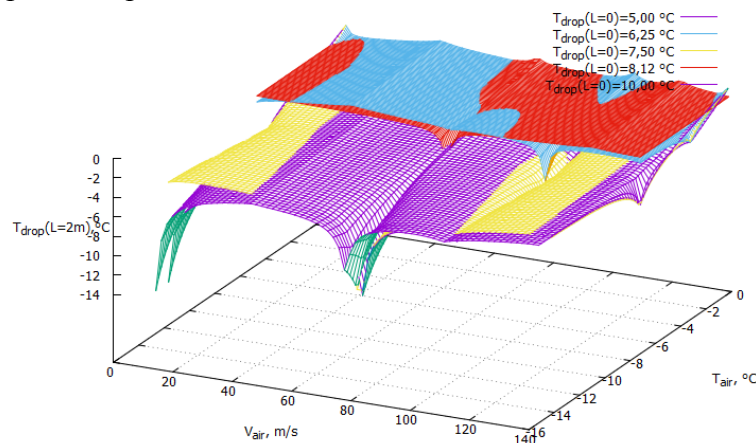


Рис. 2— Зависимость значений $V_{\text{газа}}$ — скорости газа и $T_{\text{газа}}$ — температуры газа от $T_{\text{капли}}|_{l=2m}$ — температуры капли в момент достижения преграды при различных значениях $T_{\text{капли}}|_{l=0}$ — температуры капли в момент впрыска (приводятся 5 поверхностей для различных температур)

Выводы

1. Уточнены диапазоны допустимых значений скоростей и температур капли в момент впрыска;

2. С помощью оптимизационного программного комплекса Globalizer удалось выявить достаточно широкий спектр сочетания параметров, который позволяет выдерживать с достаточной для инженерной практики точностью ($\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) энергоэффективный режим работы МКАДТ.

Исследование выполнено за счет грантов Российского научного фонда: проект №14-19-00877 (Калюлин С.Л., Модорский В.Я., Лаптева Ю.А., разделы 1,4), проект №16-11-10150 (Баркалов К.А., Гергель В.П., Козинев Е.А., разделы 2,3).

Список литературы

1. *Kalyulin, S.L., Modorskii, V.Ya., Paduchev, A.P.* Numerical design of the rectifying lattices in a small-sized wind tunnel. In: Vasily Fomin (Ed.) ICMAR 2016, AIP Conference Proceedings, vol. 1770, art. no. 030110 (2016)
2. *Модорский В.Я., Шмаков А.Ф., Бутымова Л.Н., Гайнутдинова Д.Ф., Мехоношина Е.В., Калюлин С.Л.* Параллельный расчет газодинамического процесса в крупногабаритном нагнетателе // Научный сервис в сети интернет: многообразие суперкомпьютерных миров: Труды Межд. суперкомп. конф. (Новороссийск, 22-27 сент. 2014 г.). – Москва, 2014. – С. 258-262.
3. *Gergel, V.P., Strongin, R.G.* Parallel computing for globally optimal decision making on cluster systems // Future Gener. Comput. Syst. 2005. Vol. 21, № 5. P. 673-678.
4. *Клеменков Г.П., Приходько Ю.М., Пузырев Л.Н., Харитонов А.М.* Моделирование процессов обледенения летательных аппаратов в аэроклиматических трубах // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15, № 4. – С. 563-572.
5. *Bragg, M.B., Broeren, A.P., Blumenthal, L.A.* Iced-airfoil aerodynamics // Prog. Aeosp. Sci. 2005 . Vol. 41, № 5. P. 323-362.

05.13.06

¹В.А. Лысов к.т.н., ²В.С. Янё к.э.н., ¹А.В. Кузьмин, ¹А.В. Щеголев к.т.н.,
¹М.В. Иванюк, ²Е.В. Баширова к.п.н.

¹АО «Механический завод»,

²Орский гуманитарно-технологический институт (филиал) ОГУ,
lysov.vladimir-orisk@yandex.ru, andrewkuzmin@yandex.ru, andrej-shhegolev@yandex.ru,
ivanyuk@mz orsk.ru, vsyaneo@mail.ru, elena_bashirova66@rambler.ru

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОСНОВА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ПЛОСКОГО КРИВОЛИНЕЙНОГО КОНТУРА ГЛАДКОЙ СОВОКУПНОСТЬЮ ДУГ ОКРУЖНОСТЕЙ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-149-152

Обобщён опыт приложения в решении производственных задач гладких непрерывных аппроксимирующих кривых, образованных дугами окружностей. Разработан результативный алгоритм расчёта и построения.

Представлен графический интерактивный интерфейс в режиме реального времени.

Приведены практические результаты.

Ключевые слова: аппроксимация, дуга окружности, регламентирующая касательная, опорная точка, гладкая кривая.

Введение

В работе проанализирован опыт приложения в решении производственных задач различного направления плоских гладких непрерывных аппроксимирующих кривых, образованных дугами окружностей, на дискретном множестве опорных точек с заданной точностью, регламентированных совокупностью касательных (далее по тексту «аппроксимирующие кривые»).

Во многих сферах деятельности промышленного предприятия машиностроительного профиля актуальной является задача представления аппроксимирующими кривыми с заданной точностью плоских криволинейных контуров различного рода и назначения.

В качестве примера ниже приведены производственные приложения аппроксимирующих кривых в технологических процессах изготовления изделий холодным формоизменением металла ротационной и глубокой вытяжкой:

1. Пооперационное отображение фигурных контуров осевых сечений изделий и полуфабрикатов.
2. Графоаналитическое моделирование динамики механических свойств металлов [1].
3. Пооперационное профилирование осевых сечений рабочих поверхностей пуансонов и матриц [2].
4. Отображение контуров рабочих поверхностей кулаков.

Приведённые задачи решены для основного, инструментального и вспомогательного производств.

Цели решения:

1. Изготовление фигурных контуров осевых сечений на специализированном оборудовании с ЧПУ.
2. Создание электронной базы данных механических свойств металлов.
3. Изготовление и реставрация технологического и вспомогательного инструмента на специализированном оборудовании с ЧПУ.

1. Постановка задачи. Производственная необходимость

Предлагается следующая формулировка задачи.

Отображение с определённой точностью плоского криволинейного контура

аппроксимирующей кривой, проходящей через заданные опорные точки, регламентированной совокупностью касательных. Контур может быть выпуклым, вогнутым, выпукло-вогнутым, то есть содержащим точки перегиба.

Производственная необходимость решения сформулированной задачи обусловлена потребностью изготовления фигурных и криволинейных контуров изделий и полуфабрикатов, а также технологического и вспомогательного инструмента на специализированном оборудовании, в частности токарном и фрезерном, с ЧПУ. Отображение изготавливаемого контура аппроксимирующими кривыми упрощает процесс подготовки программ для станков с ЧПУ.

2. Теоретическая основа существования аппроксимирующей кривой. Алгоритм отображения

Обоснованием существования рассматриваемых аппроксимирующих кривых является утверждение, изложенное в [3].

Предлагается вариант отображения аппроксимирующей кривой криволинейного контура, заданного точками $A_1, A_2, \dots, A_n$. Точки определены в прямоугольной системе координат.

С помощью аппарата аналитической геометрии [4], линейной алгебры [5] осуществляется на рекуррентной основе расчёт параметров отображения следующим образом: расчёт и построение первого фрагмента. Далее каждого последующего. Основу расчёта и построения составляет следующее свойство биссектрис треугольника.

Свойство.

В треугольнике $A_k B_k A_{k+1}$ (рис. 1):

- из вершин A_k, A_{k+1} проведены биссектрисы $A_k Q_k, A_{k+1} P_k$, пересекающиеся в точке X_k ;
- проведена прямая $P_k Q_k$, проходящая через точку X_k , параллельно $A_k A_{k+1}$;
- построены отрезки: $A_k O_{k1}$ перпендикулярно $A_k B_k$, $A_{k+1} O_{k2}$ перпендикулярно $A_{k+1} B_k$;
- из точки X_k опущен перпендикуляр на основание $A_k A_{k+1}$.

Тогда из равенства треугольников $A_k O_{k1} P_k$ и $X_k O_{k1} P_k$, $A_{k+1} O_{k2} Q_k$ и $X_k O_{k2} Q_k$ имеет место следующее: $A_k O_{k1} = X_k O_{k1}$, $A_{k+1} O_{k2} = X_k O_{k2}$. Значит, эти отрезки являются радиусами дуг окружностей $A_k X_k$ и $A_{k+1} X_k$, сопрягающихся в точке X_k по прямой $P_k Q_k$.

Построенный таким образом фрагмент $A_k X_k A_{k+1}$ аппроксимирующей кривой, состоящий из двух сопрягающихся дуг окружностей, является гладким, то есть удовлетворяет условию поставленной задачи.

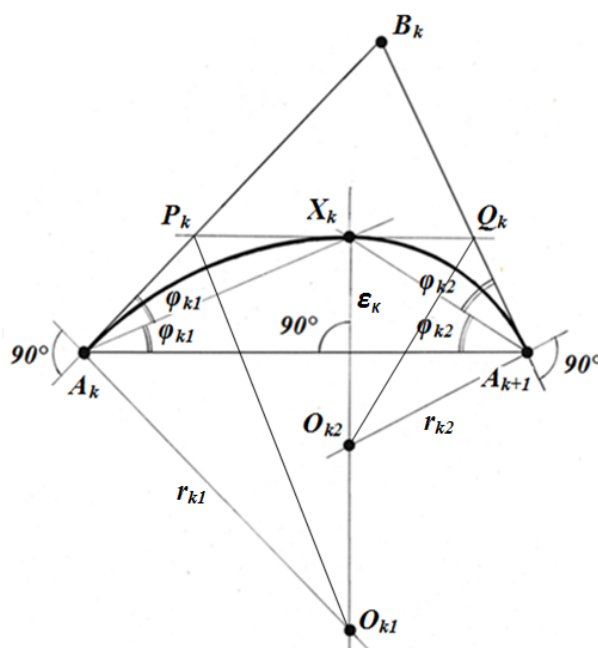


Рис. 1 – Геометрическая модель построения сопряжённых дуг окружностей для k -ого фрагмента ($k=1, 2, \dots, n-1$)

3. Практические особенности расчёта и построения аппроксимирующей кривой

1. Для каждого фрагмента $A_k A_{k+1}$ отображаемого контура строится треугольник $A_k B_k A_{k+1}$ так, чтобы регламентирующие касательные содержали смежные боковые стороны соседних треугольников. Таким образом, имеет место сопряжение аппроксимирующей кривой между фрагментами в точках A_k ($k = 2, \dots, n-1$).

Сопряжение дуг окружностей внутри треугольников $A_k B_k A_{k+1}$ ($k = 1, \dots, n-1$), составляющих аппроксимирующую кривую, обосновано свойством биссектрис треугольника, рассмотренным выше.

2. Следует отметить (рис. 2), что углы наклона $\alpha_1, \alpha_k, \alpha_n$ регламентирующих касательных в начальной и конечной опорных точках, а также в точках перегиба могут изменяться в интервале $(0^\circ, 90^\circ)$, а в промежуточных точках в интервале $(0^\circ, (180^\circ - \alpha_{k+1})/2)$.

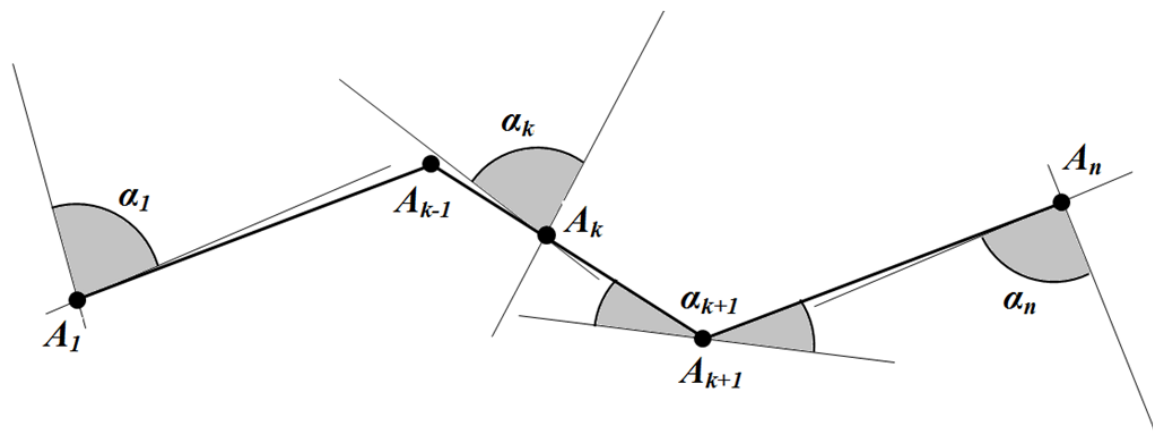


Рис. 2— Геометрическая модель ограничений значений углов наклона регламентирующих касательных

3. Величина припуска ε_k может определяться расстоянием от точки X_k до основания треугольника $A_k A_{k+1}$. Если припуск превышает заданное значение, то необходимо на данном фрагменте ввести дополнительную опорную точку, например, точку перегиба.

4. Отображаемый контур может быть задан графически, опорными точками, регламентирующими касательными.

5. Алгоритм расчёта и построения аппроксимирующей кривой изложен в свойстве биссектрис треугольника, рассмотренном выше.

Входные данные: координаты опорных точек, угловые коэффициенты регламентирующих касательных.

Выходные данные: координаты точек X_k, O_{k1}, O_{k2} , радиусы дуг фрагментов ($k=1, 2, \dots, n$) (рис. 3).

4. Программное обеспечение

Для реализации поставленной в статье цели создан программный продукт, демонстрирующий применение математического аппарата, разработанного в статье (рис. 3).

Для разработки программного продукта выбрана интегрированная среда разработки Lazarus IDE v. 1.6.4.

Lazarus – это совместимая с Delphi кросс-платформенная IDE (интегрированная среда разработки) для компилятора Free Pascal, включающая также в себя библиотеку компонентов LCL, созданная для быстрой разработки приложений. Содержит большой набор компонентов и графический дизайнер форм для создания комплексных графических пользовательских интерфейсов.

Среда разработки Lazarus распространяется под лицензиями GPL и LGPL, что позволяет создавать проприетарные коммерческие приложения.

Для визуализации графической информации дополнительно используется библиотека BGRABitmap – это набор модулей, спроектированных для создания и модификации

изображений с использованием прозрачности (альфа-канала). Также распространяется по лицензии LGPL.

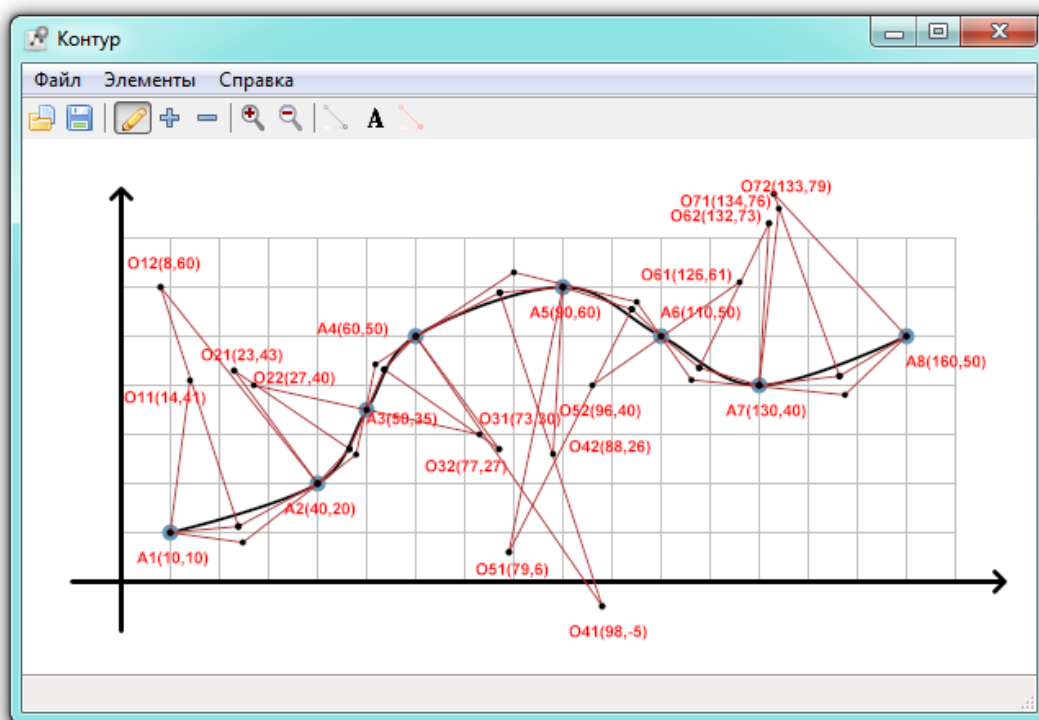


Рис. 3– Интерфейс приложения, иллюстрирующего геометрическую модель отображения выпукло-вогнутого контура аппроксимирующей кривой

Выводы

1. Предложен инструментарий, позволяющий дискретные цифровые данные преобразовать в аналитический и графический формат непрерывных функциональных зависимостей гладких аппроксимирующих кривых.
2. Реализована возможность интерактивного доступа в режиме реального времени, способствующая применению данной разработки для решения широкого круга производственных задач.
3. Приведены производственные приложения аппроксимирующих кривых в технологических процессах изготовления.

Список литературы

1. Лысов, В.А. Графоаналитическое моделирование динамики механических свойств металлов в технологических процессах изготовления глубокой вытяжкой [Текст] / В.А. Лысов, А.И. Сердюк, О.В. Шевченко, А.В. Щеголев // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – № 4. – С. 46 – 53.
2. Лысов, В.А. Автоматизация профилирования осевых сечений пуансонов гладкой совокупностью дуг кривых третьего порядка в технологических процессах глубокой вытяжки [Текст] / В.А. Лысов, Н.Б. Абрамова, О.В. Шевченко, А.В. Щеголев, В.С. Янё // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2013. – № 4. – С. 31 – 39.
3. Лысов, В.А. Аппроксимация плоских криволинейных контуров гладкими кривыми на дискретном множестве опорных точек [Текст] / В.А. Лысов, О.В. Шевченко, А.В. Щеголев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 3. – С. 145 – 149.
4. Моденов, П.С. Аналитическая геометрия. [Текст] / П.С. Моденов - М.: МГУ, 1969 год. 699 стр.
5. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров: Учебное пособие - 2-е изд., доп. [Текст] / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копчёнова – М.: Издательство МЭИ, 2003.- 569 с., ил.

05.13.18

Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский

"ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет"
(ПНИПУ),

Центр высокопроизводительных вычислительных систем,
Пермь, Россия, mevpstu@gmail.com, modorsky@pstu.ru

О ВОЗМОЖНОСТИ ЧИСЛЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВОЧНЫХ АЭРОУПРУГИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО РАСЧЕТА РОТОРА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ГПА

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-153-155

В рамках работы созданы физическая и математическая модели вибрационных процессов ротора компрессора газоперекачивающего агрегата (ГПА), учитывающие в динамике аэродинамическую и инерционную нагрузки, опоры жесткого типа, технологические дисбалансы, геометрические и физико-механические характеристики конструкции. В ходе исследования получены результаты BFSI расчета и нестационарного расчета по оценке компонент напряженно-деформированного состояния. Обнаружено, что вибрации ротора зависят от взаимовлияния в системе «газ–конструкция».

Ключевые слова: *центробежный компрессор; нестационарный расчет компонент НДС; BFSI расчет.*

1. Введение

Повышение надежности компрессорной техники тесно связано со снижением вибраций. Это особенно актуально для газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Создание современных конкурентоспособных образцов ГПА связано со снижением жесткости и материалоемкости конструкции и увеличением газодинамических нагрузок. Это повышает вероятность возникновения аэроупругих колебательных процессов в нежесткой тонкостенной конструкции при действии интенсивных потоков газа [1]. Такие процессы ведут к повышенным вибрациям на валу. Проблема вибраций проявляется, в частности, в компрессорах газоперекачивающих станций, но, в целом, является общей для турбомашиностроения.

Существующие в настоящее время методики расчета компрессоров практически не учитывают аэроупругих эффектов. Так, расчет критических скоростей вращения проводится для "изолированного" ротора, а расчет напорной характеристики – только для газодинамического домена. В качестве новых факторов предлагается рассматривать аэроупругие эффекты на лопатках компрессора и в лабиринтных уплотнениях [2]; аэроупругое взаимовлияние в динамической системе «газодинамический поток – ротор в опорах жесткого типа». В данной работе в качестве инструмента численного моделирования в работе использована система инженерного анализа ANSYS. Расчеты проведены с использованием мощностей Центра коллективного пользования на базе Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

2. Объект исследования

В данной статье авторы изучают особенности аэроупругих процессов в лопатках центробежного компрессора с расходом 445 кг/с. Аэроупругая (bidirectional Fluid Structure Interaction – BFSI) задача включает в себя две подмодели: газодинамическую и подмодель для оценки компонент напряженно-деформированного состояния (НДС) газодинамической подмодели рассмотрен ротор, вращающийся с постоянной угловой скоростью. Рассматривается течение нереагирующего совершенного газа; поток однофазный. Степень

повышения давления 1.172; давление на входе – 6.88 МПа. На рабочем колесе 11 лопаток, относительная толщина 0.014. В расчете по оценке компонент НДС рассматривается ротор в сборе, включая вал, рабочее колесо и опоры жесткого типа. Производится учет технологических дисбалансов участков вала. Расчеты проведены с учетом гравитации. Производится учет взаимовлияния газодинамического потока и деформируемого ротора. Материал конструкции – сталь; относительный диаметр втулочного обвода равен 0.29; относительная ширина рабочего колеса – 0.95 (в области лопаток) и 0.086 в области «входа». Относительная толщина покрывного диска 0.0114 со стороны входа и 0.0129 с обратной стороны. Размеры отнесены к диаметру внешнего обвода колеса. Длина ротора равна 2968 мм, ширина опоры жесткого типа отнесена к длине вала и составляет 0.037; эксцентриситет составляет 10 мкм; стенки шероховатые. Скорость вращения ротора – 5160 об/мин.

Для сравнения проведен расчет напряженно-деформированного состояния без учета FSI взаимодействий. На поверхность рабочего колеса приложено постоянное давление $P = 7.33$ МПа.

3. Методы исследования и математическая модель

В качестве методов исследования использованы метод конечных объемов для расчетов газодинамики и метод конечных элементов для оценки компонент НДС. Схема реализации BFSI расчета в ANSYS, представлена в [3].

Используется математическая модель, включающая в себя две подмодели. Подмодель газодинамики базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии, уравнении состояния совершенного сжимаемого газа и замыкается начальными и граничными условиями. Математическая подмодель для оценки НДС описана в [4].

4. Расчет центробежного компрессора

Трехмерная расчетная подмодель газодинамики представлена на рис. 1. Цифрами обозначены: 1 – вход; 2 – выход; 3 – интерфейс «газ-конструкция» (реализуется на трех поверхностях каждой из лопаток); 4 – интерфейс «газ-конструкция» (реализуется на поверхности покрывного диска и втулочного обвода); 5 – интерфейс «газ-конструкция» (реализуется на поверхности покрывного диска); 6 – интерфейс «газ-конструкция» (реализуется на торцах покрывных дисков и лопаток).

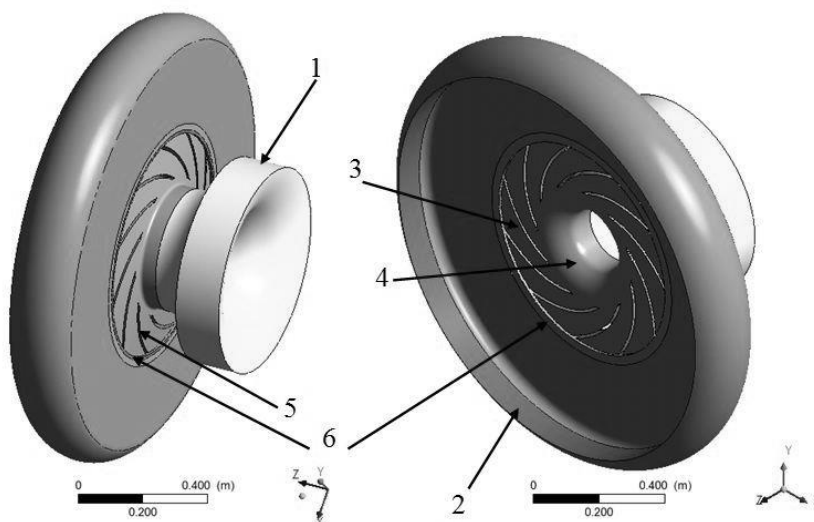


Рис. 1– Расчетная схема газодинамики компрессора

В [5] описаны граничные условия для конструкции. Производится учет эксцентриситета участка вала. Он моделируется эквивалентным грузиком [6].

Для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, домены были разбиты на ячейки. Общее количество узлов составило порядка 1.5 миллиона.

5. Результаты

Результаты, полученные при расчете параметров газодинамического потока и компонент НДС конструкции в постановке BFSI, отличаются от результатов, полученных в несвязанных постановках. Это свидетельствует о том, что характер течения потока и вибрации ротора зависят от взаимовлияния "в системе "газ–конструкция". Такое взаимовлияние является еще одним признаком возникновения вибраций ротора центробежного компрессора.

В таблице сведены значения максимальных перемещений участка вала и рабочего колеса в постановках BFSI и НДС для различных моментов времени. Зона максимумов в постановке BFSI выше, также наблюдается различный характер деформирования конструкции в постановках BFSI и НДС.

Таблица – Значения максимальных перемещений участка вала и рабочего колеса в постановках BFSI и НДС для различных моментов времени

t, c	Максимальные перемещения $U_{\max} \cdot 10^{-4}$, м			
	Рабочее колесо		Вал	
	BFSI расчет	НДС	BFSI расчет	НДС
0,0005	5,612	4,5201	1,119	1,3019
0,0027	18,79	7,7463	4,322	0,86128

На первых итерациях в ходе численного расчета (в данном примере взят отрезок времени $0 < t < 0.0005$ с) отличие максимальных перемещений на рабочем колесе в BFSI и НДС составляет 19.45%. В то время как с течением времени ($t=0.0027$ с) эта разница уже 58.7%. Аналогичная картина на валу: в момент времени $t=0.0005$ с разница составляет 16.3%, а в момент времени $t=0.0027$ с – уже 80%. Таким образом, изменяющаяся во времени газодинамическая нагрузка влияет на характер колебаний конструкции ротора. В то же время, деформирование рабочего колеса вносит изменения в характер колебаний газа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда: проект №14-19-00877.

Список литературы

1. Kalyulin, S.L., Modorskii, V.Ya., Paduchev, A.P. Numerical design of the rectifying lattices in a small-sized wind tunnel. In: Vasily Fomin (Ed.) ICMAR 2016, AIP Conference Proceedings, vol. 1770, art. no. 030110 (2016)
2. Бутымова Л.Н. Влияние вибраций на газодинамические процессы в лабиринтных уплотнениях ГПА // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2016 г. – № 47 – С.243-259. ISSN 2224-9982.
3. Jianping Zhang, Liang Guo, Helen Wu, Aixi Zhou, Danmei Hu, Jianxing Ren. The influence of wind shear on vibration of geometrically nonlinear wind turbine blade under fluid–structure interaction // Ocean Engineering. – 84 (2014). – P. 14–19.
4. Erke Wang, Thomas Nelson. Structural Dynamic Capabilities of ANSYS// – Nonlinear Analysis Using ANSYS - The University Of Maine, 2015.
5. Мехоношина Е.В., Модорский В.Я. Численное моделирование аэроупругого поведения ротора центробежного компрессора ГПА // сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017), С.1552-1559.
6. Mekhonoshina, E.V., Modorskii, V.Ya., Petrov, V.Yu. Influence of Kinematic, Physical and Mechanical Structure Parameters on Aeroelastic GTU Shaft Vibrations in Magnetic Bearings // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering –10 (2016). – P.613-622.

05.13.18

В.А. Столярчук

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
аэрокосмический факультет,
кафедра прикладной информатики,
Москва, stolyarchukva609@mail.ru

УЧЕБНАЯ САПР С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ**DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-156-159**

В статье описывается концепция и реализация открытой учебной САПР, используемой в качестве объекта разработки для студентов, специализирующихся в области создания подобных программных автоматизированных систем. Приведен перечень задач, которые решает САПР, а также её структура.

Ключевые слова: методика обучения, учебная САПР, открытое программное обеспечение, алгоритмы оптимизации.

При подготовке в учебном вузе специалистов по разработке САПР изучение коммерческих пакетов вызывает значительные трудности вследствие их естественной закрытости. Поэтому, помимо знакомства с коммерческими системами, возникает необходимость создания учебных САПР, сохраняющих упрощенные свойства реальных САПР и допускающих в дидактических целях модификацию и изменение не только методики проектирования, но и программных модулей, составляющих подобные системы.

Основные требования к учебным САПР были сформулированы достаточно давно, и реализованы в одном из лучших представителей таких систем УИ САПР ПРОСК [1]. На основе многих идей этой системы в МАИ на кафедре прикладной информатики (каф. 609) создана и успешно используется в учебном процессе система Ferma, призванная познакомить студентов-разработчиков автоматизированных систем с примером реализации САПР, а студентов проектно-конструкторских специальностей - с возможностями автоматизированного проектирования силовых конструкций.

В отличие от САПР ПРОСК, где основной упор сделан на использование её в качестве своеобразного тренажера, в САПР Ferma предпринята попытка познакомить студентов с законченным циклом проектирования, включая подбор силовых элементов из имеющейся номенклатуры стандартных труб с выпуском электронных чертежей [2].

Система дает возможность обучаемому самому оценить эффективность того или иного проекта, а также понять преимущества использованного подхода к проектированию силовых конструкций, что формирует более реалистичное восприятие как самого процесса проектирования, так и возможностей его автоматизации.

Если для студента-проектанта САПР Ferma выступает в качестве инструмента выполнения проектной работы, то для студента – разработчика программных автоматизированных систем САПР Ferma – объект разработки. Поэтому САПР Ferma - система с открытым исходным кодом, чтобы обучаемый мог познакомиться с реализацией как конкретной САПР в целом, так и составляющих её алгоритмов. Использование этой возможностей нашло свое отражение и в литературе [3]. Естественно, что наибольшие успехи достигнуты в среде Linux [4]. Развитие такой концепции получило и на каф. 609 МАИ, где успешно работает САЕ Sigma с открытым кодом, использование которой проводится по такой же методике, что и САПР Ferma [5].

Модульность и открытость Ferma дает возможность вовлекать в ее разработку студентов 3–4-х курсов и дипломников.

Заданиями для студентов в рамках курсовых и дипломных работ служат, как правило, модули подготовки исходных данных, числовой и графической обработки выходной

информации, модули численного анализа, оптимизации, интерфейса и т.д. В результате, помимо ознакомительных функций, система Ferma используется как своеобразный полигон для обучения студентов-разработчиков САПР. Это привело к тому, что значительная часть системы является плодом совместной разработки поколений студентов, а сама система неким центром, объединяющим разнообразные устремления отдельных студентов.

Основное назначение САПР Ferma - проектирование, расчет и оптимизация плоских ферменных конструкций. Ферменные конструкции были выбраны по методическим соображениям: они по своему построению и начертанию наиболее близки к понятию силовой схемы. К тому же ферменные конструкции, в силу одноосной работы их элементов, дают достаточно наглядное представление о путях передачи сил, а потому удобны для изучения закономерностей силовой работы конструкций.

С помощью системы можно решать следующие проектно-конструкторские задачи:

1. Проектирование оптимальной по массе силовой схемы (структуры) ферменной конструкции.
2. Расчет фермы методом конечных элементов, включающим определение напряженно-деформированного состояния стержней и их необходимых моментов инерции.
3. Оптимизация фермы по критерию массы, в результате чего отыскивается оптимальное распределение материала в элементах фермы.
4. Расчет напряженно-деформированного состояния прямоугольных пластин постоянной толщины, нагруженных в своей плоскости.
5. Оптимизация по критерию массы прямоугольных пластин, нагруженных в своей плоскости. Определяется оптимальное распределение материала (толщины) пластины.

Результаты расчета и оптимизации прямоугольных пластин используются при проектировании ферм методом силового анализа.

Структура программного комплекса приведена на рис.1.

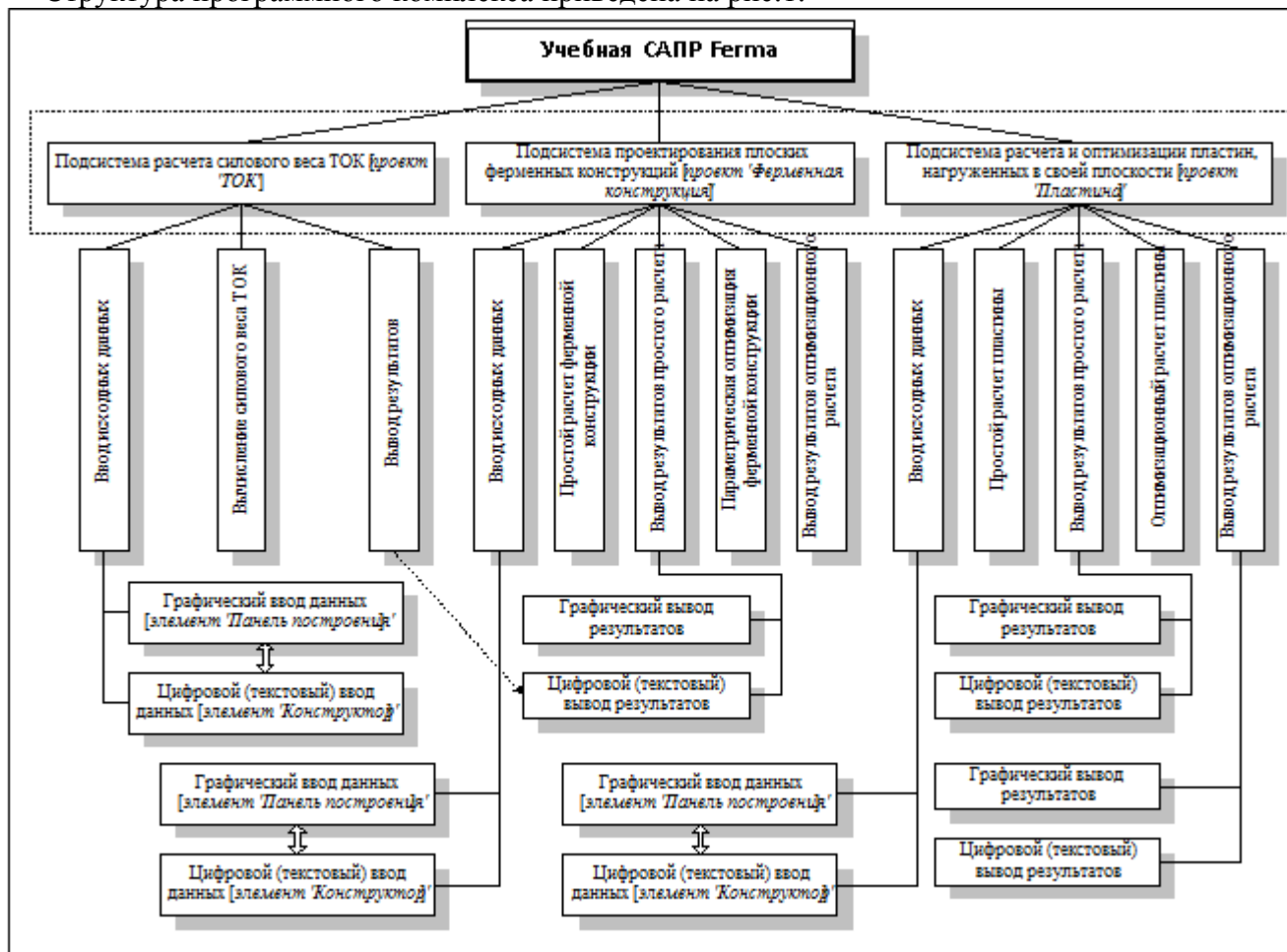


Рис.1.

Программная реализация системы.

Исходя из принципов использования учебной САПР Ferma, которые предусматривают возможность модификации системы самими студентами в процессе обучения, система реализована как MDI (Multiple Document Interface) приложение.

В САПР Ferma используются дочерние формы MDI-приложения трех типов: проект “(Теоретически Оптимальная Конструкция)”, проект “Ферменная конструкция”, проект “Пластина” (см. рис.1).

Некоторые формы (например, результаты расчетов) реализованы как Modal Form, в которых запрещаются все действия вне этой формы внутри приложения. Последнее помогает избежать ошибки и неправильную интерпретацию действий и данных.

Обмен информацией в системе происходит через обычные текстовые файлы (ASCII-файлы). При сохранении на диск для каждого из типов проекта и результатов его расчета создаются файлы с соответствующим типу проекта форматом.

При реализации системы была применена также модель программирования на основе DLL (Dynamic Link Library), которая позволяет добиться дополнительной модульности многих элементов системы. Через DLL реализованы расчетные и оптимизационные методы. Такая организация упрощает работу студентов при модификации системы.

Интерфейс системы.

В САПР Ferma реализован оконный интерфейс с использованием метафоры рабочего стола. Имеется одно большое окно системы, внутри которого помещаются окна проектов. Остальные окна (результаты расчетов и оптимизации, параметры оптимизации и т.д.) не привязаны к основному окну и могут выходить за его пределы.

Панель построения – основной графический инструмент создания и редактирования конструкций. Для каждого вида проекта панель построения своя и имеет соответствующие инструменты.

Навигация между блоками системы осуществляется посредством перехода из одного окна в другое.

Визуальный дизайн экранов программы выполнен в стандартной стилистике Microsoft Windows т.е. это хорошо знакомые всем окна, внутри которых могут располагаться схема конструкции, результаты расчета в виде таблиц или графических схем, а также наборы кнопок и полей для задания параметров оптимизации.

Основные средства отображения информации – это таблицы, показывающие значения исследуемых параметров в числовом виде. Графика используется для отображения напряженно-деформированного состояния при помощи цветов различной интенсивности.

Диалоги, взаимодействие и транзакции между пользователем и системой происходят стандартным образом: пользователь выполняет необходимые действия, нажимая необходимые кнопки на панелях или выбирая нужные пункты меню, а также производя построения конструкций в графическом редакторе с помощью мыши. Действие пользователя считается завершенным, когда отпущена кнопка мыши или нажата кнопка Enter клавиатуры. В ответ система открывает требуемое окно, выполняет расчет, строит требуемый элемент в окне построения конструкции и т.д. в зависимости от требуемого пользователем действия.

Обратная связь с пользователем осуществляется выводом сообщений в отдельных появляющихся окнах или в нижней части основного окна системы в так называемых status bar.

Поддержка принятия решений в конкретном проекте осуществляется посредством демонстрации напряженно-деформированного состояния конструкций и акцентировании внимания пользователя на элементах конструкции, не удовлетворяющих установленным к конструкции ограничениям.

В системе имеется справочно-информационная подсистема, которая позволяет пользователю быстрее освоиться с комплексом, получить полную и достоверную информацию по порядку работы с каждой подсистемой.

Интерфейс учебной САПР Ferma нельзя назвать идеальным, как и всю программу в целом, о чем свидетельствуют замечания работающих с ней студентов, однако большинство

замечаний принимаются во внимание студентами-разработчиками и исправляются, тем самым, приближая систему к максимально удобной в рамках выбранной концепции. Система постоянно совершенствуется не только за счет устранения ошибок, модификации существующих модулей и разработки новых, но и за счет появления новейших средств разработки программ, а также современных методических разработок в области автоматизации проектирования.

Список литературы

1. Учебная САПР силовых конструкций ПРОСК /А.В. Соловов, А.А. Черепашков, С.В. Мрыкин и др. Методические указания .- Куйбышев: КуАИ, 1987.
2. Ампиров В.И. Дидактические компоненты системы подготовки электронных рабочих чертежей деталей // Науч.-технич. вестн. Повол-жья. 2014. № 6. С. 62–66.
3. Pedroni M., Bay T., Oriol M., Pedroni A. Open source projects in programming courses. ACM SIGCSE Bulletin, March 2007, no. 39 (1), pp. 454–458.
4. САПР CAD, CAE, CAM с открытым исходным кодом для многофункциональной операционной среды GNU/Linux; URL: <http://mrc.org.ua/component/content/article/56-sapr-linux> (дата обращения: 05.08.2015).
5. Столярчук В.А. Программный комплекс для расчета прочности//Программные продукты и системы. 2016.№1. С.140-145

05.13.01

Д.Н. Тимофеев, В.В. Шведенко, О.В. Щекочихин

Костромской государственный университет,
институт физико-математических и естественных наук, кафедра защиты информации,
Кострома, slim700@yandex.ru
ООО «РЕГУЛ++» (резидент «Инновационного центра «СКОЛКОВО»»),
Санкт-Петербург, vv_shved@mail.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-160-162

В статье рассматривается интеграция информационного обеспечения на основе метрической системы показателей деятельности предприятия, которая включает в себя общеуправленческий и функциональные блоки. В работе предложена ее структура. Рассмотрен вариант ее исполнения в виде архитектурного решения.

Ключевые слова: метрическая система, показатели, интегрированная информационная система, архитектура информационной системы

Любая материальная система промышленного предприятия может быть представлена как набор подсистем, функционирование которых описывается группой показателей, значение и периодичность сбора которых дает полное или частичное представление о работе подсистемы, состояния отдельных ее элементов, а также связей между ними. Если систему показателей сделать инвариантной по отношению к остальным системам, то есть обеспечить самостоятельность и независимость, включив в нее полный набор показателей, способы их группирования и описание их взаимозависимостей, ее можно рассматривать как интегрирующий элемент, наделенный функциями накопления и преобразования значений показателей, дающей сигналы на оповещение о необходимости принятия управленческого решения. Ключевые показатели, оказывающие влияние на принятие управленческих решений и соответствующие параметрам дерева стратегических, тактических и оперативных целей предприятия формируют метрическую систему показателей деятельности предприятия.

Описание структуры метрической системы показателей деятельности предприятия. Структура метрической системы состоит из общеуправленческого и функциональных блоков, каждый из которых включает стратегический (СФ_i), тактический (ТФ_i) и оперативный (ОФ_i) уровни сборки, преобразования и анализа данных, где *i* – номер функционального блока (подсистемы) предприятия [1].

Блок ОФ_i включает в себя набор показателей, описывающих состояние контролируемых параметров подсистемы, получаемых с первоисточников (датчиков и других измерительных устройств, внешних баз данных, оперативной информации, вводимой пользователем ЭВМ в конкретную электронную форму или таблицу). Структура блока ОФ_i зависит от количества центров поступления и обработки информации, количества центров принятия решений на оперативном уровне, количества этапов процессов, закомутированных на каждый центр принятия решений, количества показателей, отслеживаемых на каждом этапе процесса, периодичности поступления оперативной информации (значений показателей) по исполнению каждого этапа процесса.

Каждый показатель имеет стандартный набор характеристик, включающий в себя название показателя, его, аббревиатуру, ед.измерения, тип свойства, полярность (нисходящий, const, восходящий); тип (назначаемый, первичный (получаемый по факту

исполнения этапа процесса), вычисляемый), модификацию (нормативный, фактический, отклонения абсолютное и относительное, формулу расчета (для вычисляемого значения), описание физического смысла, источник получения значения показателя, поле ввода (длина и формат) - (для показателя, вносимого вручную), указание периода агрегации значений показателя (например, по итогам суток, рабочей недели, декады, месяца, квартала и т.д.), класс показателя (целевой (Ц), ресурсный (Р), эффективности (Э), качества исполнения работы (КИР), оценки работы исполнителя (ОРИ). Для целевого показателя указывается его принадлежность к следующему подклассу: финансовый результат (ЦФР); клиентский результат (ЦКР); производственный результат (ЦПР); результат работника (ЦРР); экологический результат (ЦЭР); результат по безопасности (экономической, пожарной, охраны труда и т.д.) (ЦРБ); экономический результат (региональный индикативный аспект) (ЦЭР); социальный результат (региональный индикативный аспект) (ЦСР). Для ресурсного показателя выделяют подклассы показателя состояния ресурса (СР): время использования ресурса (ВИР) (начало, окончание, продолжительность); стоимость ресурса (СР) (в разрезе подбюджетных статей); количество потребления ресурса (электроэнергии, воды, материалов и т.д.); длительность отвлечения ресурса (оборудования, инструмента, оснастки, транспорта, и т.д.); трудоемкость (количество работников различной квалификации в заданный промежуток времени). Показатели эффективности представляют собой отношение значения целевого показателя к значению ресурсного показателя [2].

Показатели, на основании которых принимаются решения в рамках оперативного контура подсистемы получают статус метрик $ОФ_i$. Таким образом, метриками являются ключевые показатели подсистемы, обеспечивающие информационную поддержку принятия решения.

Различают три уровня оперативного функционального блока: уровень специалиста ($ОФ_iКПР_{cj}$, где j – табельный номер работника согласно штатного расписанию предприятия), уровень руководителя подразделения ($ОФ_iКЗР_{pk}$, где k – номер подразделения), уровень руководителя направления ($ОФ_iКЗР_{nl}$, где l – номер функционального направления). Каждый уровень оперативного функционального блока характеризуется своим набором метрик.

Уровень $ОФ_iКЗР_{pk}$ содержит следующий набор показателей: метрики нижестоящего уровня функциональных специалистов, набор показателей их интегральных (преобразованных) значений, полученных на основании обработки и анализа текущих данных в сопоставлении с данными прошлых периодов и установленных нормативных значений, показатели личной эффективности руководителя подразделения.

Уровень $ОФ_iКЗР_{nl}$, организован по такому же принципу, что и у руководителя подразделения. Отражаемый набор показателей соответствует зонам личной и функциональной ответственности руководителей направлений предприятия. Метрики уровня $ОФ_iКЗР_{nl}$ представляют собой производную уровня $ОФ_iКЗР_{pk}$.

Показатели тактических и стратегических уровней функционального блока организованы аналогичным образом, представляя собой дерево взаимосвязанных показателей (расширенный набор данных) и дерево взаимосвязанных метрик (ключевой набор данных).

Рассматривая показатели как надстройку над подсистемами предприятия можно осуществить оценку не только каждой подсистемы, но и всей системы целиком. При этом также выделяется оперативный, тактический и стратегический контуры принимаемых решений, настройка которых осуществляется в строгом соответствии с установленным деревом целей, настройка параметров (ключевых ориентиров) которого зависит от условий микро и макросреды предприятия, а также долгосрочных интересов собственников бизнеса.

Метрическая система общего управления деятельностью предприятия также представляет собой трехуровневую систему, состоящую из наборов расширенных показателей и метрик (ключевых показателей, на основании значений которых принимаются решения).

Архитектура интегрированной информационной системы предприятия.
Интегрирующая система показателей содержит следующие элементы (рис):

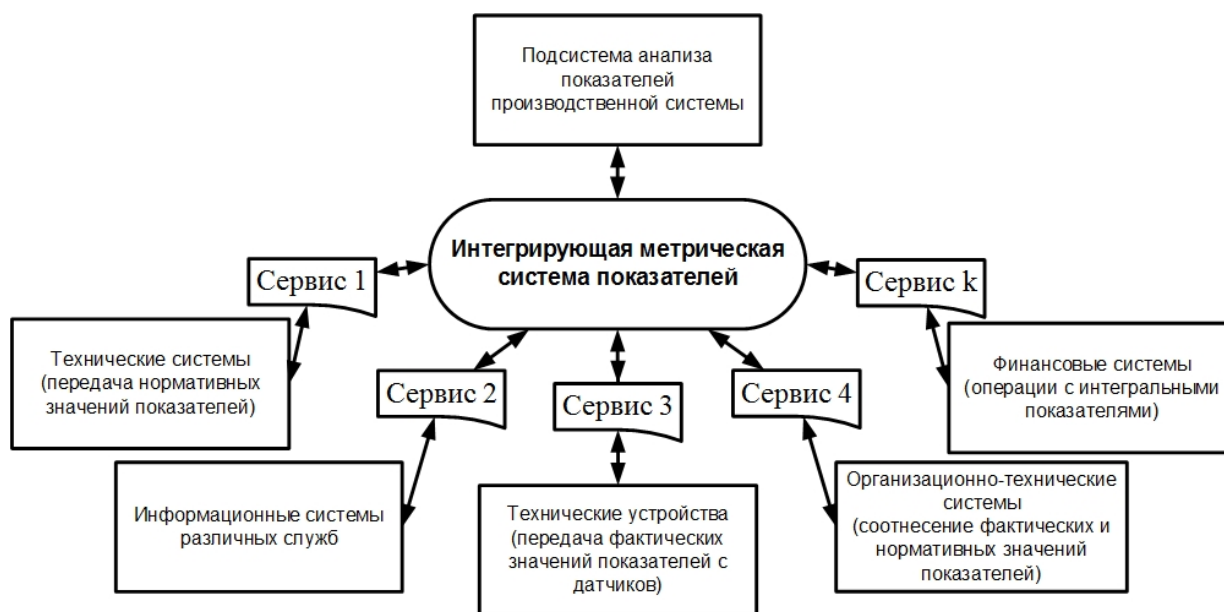


Рис. – Архитектура интегрированной информационной системы

1. Инвариантную систему метрик

2. Систему передачи данных из одной информационной системы (ИС) в другую и обеспечение потока данных между отдельными ИС, через преобразование данных. Метрика строится как древовидная структура. Объединяющая показатели по источникам их возникновения физическим, информационным и другим признакам. Взаимодействие с интегрирующей ИС осуществляется на основе сервисов. Метрическая система включает в себя программатор формул, позволяющий передавать данные от источника к приемнику. В системе метрик особое значение имеют метрики времени. Использование метрик времени дает возможность рассматривать изменение показателей и определять момент возникновения проблемной ситуации, что дает сигнал на использование систем подготовки и принятия решений.

3. Система интеллектуальной обработки данных.

4. Систему проведения экспертиз.

Таким образом, разработана структура метрической системы показателей, которая является инвариантной по отношению к информационным системам предприятия. Предложен вариант архитектуры встраивания метрической системы показателей в контуры системы управления.

Список литературы

1. Шведенко В.В., Постников М.Л. Построение метрической системы оценки деятельности предприятия и ее реализация в программном комплексе «Собра++» // Научно-практический межотраслевой журнал «Интеграл», 2010. - №6(56). – С.100.
2. Шведенко В.В., Ипатов В.А. Адаптивная настройка системы показателей результативности и ресурсной обеспеченности деятельности предприятия// Научно-практический межотраслевой журнал «Интеграл», 2012. - №3(65). – С.85.

05.13.06

В.А. Харитонов д.т.н., С.В. Леонтьев к.т.н., А.Д. Курзанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
кафедра строительного инжиниринга и материаловедения,
Пермь, kurzanov_sm_st@mail.ru

КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-163-165

В статье представлена концепция автоматизированной системы подбора рецептурно-технологических параметров производства изделий из неавтоклавного газобетона. Отмечено, что реализация такой системы возможна при обосновании выбора управляющих параметров, разработке экспертной системы, формирующей новый вектор управляющих воздействий на основе результатов предыдущего цикла производства, а также при внедрении в технологический процесс автоматических средств контроля процесса вспучивания. Представлен лабораторный прототип установки, позволяющий в режиме онлайн фиксировать параметры подъема массива.

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, рецептурно-технологические параметры, управление технологическим процессом, интеллектуальная система, экспертная система.

Известно [1, 2], что производство газобетона, будь-то автоклавного или неавтоклавного, - сложный и крайне неустойчивый процесс, подверженный влиянию большого числа контролируемых и неконтролируемых факторов. Существенное влияние на качество готовых изделий оказывает колебание свойств используемого сырья, параметры которого постепенно меняются не только от партии к партии, но и в пределах одной партии. Все это неблагоприятно сказывается на стабильности выпуска продукции высокого качества.

На заводах большой и средней производственной мощности необходимость внесения корректировок в состав разрешается технологом либо лаборантом, который от цикла к циклу вносит изменения в рецептурно-технологические параметры (РТП) производства на основе имеющейся информации. На предприятиях малой производительности, доля которых составляет более 70%, зачастую, отсутствует возможность содержать в штате высококвалифицированного специалиста-технолога. Кроме того, большинство из таких заводов не оснащены лабораторией для оценки качества сырья.

Возникает проблема корректировки состава НГБ в условиях изменения качества применяемого сырья, а также подбора нового состава при смене сырьевых компонентов. Данная проблема также усугубляется нестабильностью параметров технологического процесса производства (ТПП) материала.

Решением указанной проблемы может быть внедрение в ТПП изделий интеллектуальной системы, позволяющей в автоматическом режиме регулировать состав материала, а также отдельные параметры производства. Замена труда специалиста на автоматическую интеллектуальную систему возможна при решении ряда задач, среди которых следует выделить:

1. Выявление РТП, оказывающих существенное влияние на формирование ячеистой структуры материала;
2. Формулирование критериев оперативной оценки качества структуры материала;
3. Вывод правил, позволяющих осуществлять переход от результата предыдущего пробного замеса к новым РТП.
4. Разработка методов и средств автоматического мониторинга протекания процессов макроструктурообразования;

В ходе многочисленных экспериментальных исследований различными авторами установлено [3, 4, 5], что на динамику процессов вспучивания массива и набора пластической прочности при литьевой технологии изготовления НГБ наибольшее влияние оказывают: расход газообразующих и щелочных агентов, соотношение цемента и песка, первоначальный распływ растворной смеси, температура растворной смеси в момент заливки. Меняя соотношения указанных факторов в определенных пределах можно добиться получения НГБ высокого качества, удовлетворяющего требованиям НТД.

Качество макроструктуры НГБ определяется диаметрами газовых ячеек, их взаимном расположением в единице объема материала, а также плотностью межпоровой перегородки и отсутствием дефектов в ней [6, 7]. Определить качество структуры можно по данным физико-механических испытаний материала, а также в результате анализа сечения материала. С другой стороны, косвенно оценить качество структуры готового продукта можно по динамике протекания процесса вспучивания.

Для оценки качества процесса макроструктурообразования необходимо в режиме реального времени отслеживать следующие его параметры: коэффициент вспучивания $K_{всп}$, равный соотношению между фактической и начальной высотами подъема ($K_{всп} = H_{всп}^{факт} / H_{всп}^{нач}$); скорость подъема смеси ϑ_H^T , текущую высоту массива H^T , величину осадки смеси ΔH^T , пластическую прочность сырца $R_{пласт}^T$ в заданный момент времени T . В случае, если структура массива, полученного в результате пробного опыта, не оптимальна, на основе данных о процессе макроструктурообразования могут быть назначены новые РТП, которые позволят компенсировать отклонения процесса от оптимального. Изменения РТП по сравнению с предыдущим замесом названы «корректирующим управлением». Таким образом, значения вектора управляющих воздействий на i -м шаге будут вычисляться в соответствии с выражением $U^i = U^{i-1} + \Delta U$, где ΔU – корректирующее управление, назначаемое экспертной системой.

Также установлены зависимости между параметрами оценки качества макроструктуры и значениями «корректирующих управлений». Эти зависимости были представлены в виде правил типа ЕСЛИ «А» и «В», то «С». К примеру, если массив не поднялся до требуемой высоты по причине нехватки выделившегося газа, то правило будет звучать следующим образом: ЕСЛИ « $K_{всп}^0 \in [1,0..2,0]$ » И « $R_{пласт}^0 < R_{пласт}^1$ » И « $\Delta H^0 \in [0..1,0]$ », ТО «увеличить А1 на 30%» И «увеличить NaOH на 10%». На сегодняшний день сформулировано 43 правила; предполагается, что по мере накопления информации правила будут уточняться и пополняться. Все сформулированные на данный момент правила легли в основу базы знаний экспертной системы, которая в будущем станет частью автоматической СУ подбором рецептурно-технологических параметров ТПП изделий из НГБ.

Для автоматического определения параметров процесса макроструктурообразования необходим комплекс приборов, соединенных с ЭВМ и позволяющих в режиме реального времени определять и анализировать требуемые величины. Коэффициент вспучивания, текущая высота массива, осадка смеси, скорость подъема могут быть определены с помощью прибора, в основу которого заложен принцип определения периода времени, который требуется звуковой волне для преодоления расстояния от передатчика, расположенного над формой, до поверхности смеси и обратно до приемника. Данный прибор, снабженный также погружаемым термометром, соединен с компьютером при помощи СОМ-порта. Определяемая информация выводится на экран в виде графиков.

Определение пластической прочности производится при помощи конического пластомера [8]. Работа пластомера в автоматическом режиме на данном этапе не реализована; величина погружения конуса, определенная в ручном режиме по команде системы, вносится в специальное поле в программе через устройство ввода информации.

Общий вид лабораторного прототипа установки (А), а также модуль датчиков (Б) представлены на рисунке 1.

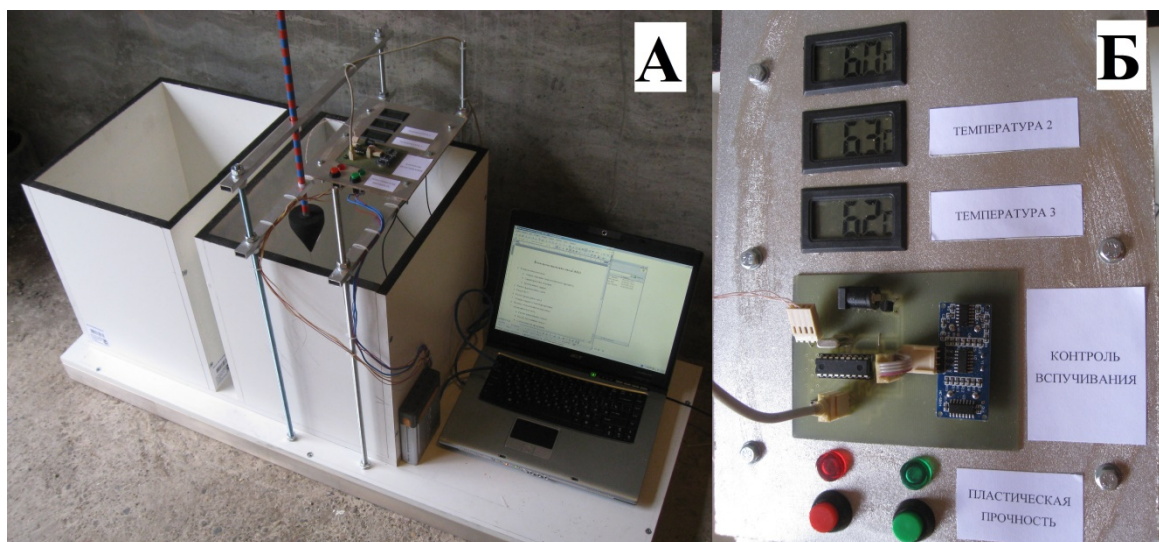


Рисунок 1 – Фотографии испытательной установки

В заключении необходимо отметить, что применение автоматизированных систем корректировки рецептурно-технологических параметров позволит существенно облегчить процесс выработки управленческих решений, повысить скорость оптимизации РТП для получения готового продукта требуемого качества и, следовательно, снизить количество выпускаемого брака.

Список литературы

1. *Зиновкин, В.В.* Оптимальное управление многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич, А. И. Байша, В. О. Мирный // Автоматизация, моделирование та методи оптимізації. Електромеханічні енергозберігаючі системи. – 2012. - №3. – С. 383.
2. *Шаманов, В.А.* Современное состояние и перспективы оптимизации технологического процесса производства автоклавного газобетона [Электронный ресурс] / В.А. Шаманов, С.В. Леонтьев, А.Д. Курзанов, В.А. Голубев, // Фундаментальные исследования. – 2015. - № 5. Ч.3. – Режим доступа: <http://www.rae.ru/fs/pdf/2015/5-3/38300.pdf>.
3. *Лаукайтис, А.А.* Влияние температуры воды на разогрев формовочной смеси и свойства ячеистого бетона / А.А. Лаукайтис // Строительные материалы. – 2002. - № 3. – С.37.
4. *Сахаров, Г.П., Корниенко, П.В.* Образование оптимальной структуры ячеистого бетона / Г.П. Сахаров, П.В. Корниенко // Строительные материалы.- 1973. - № 10. - С.30.
5. *Резанов, А.А.* Влияние внешнего давления газовой среды на качество макроструктуры газобетона / А.А. Резанов // Молодежь и XXI век: тез. докл. конф. – Курск, 2008. – Ч. 1. – С. 225.
6. *Курзанов, А.Д.* Анализ процесса производства изделий из неавтоклавного газобетона / А.Д. Курзанов, В.А. Шаманов, С.В. Леонтьев, Е.П. Анферов // The scientific heritage. – 2016. – № 7(7), Pt. 3. – С.97
7. *Курзанов, А.Д.* Температура как фактор управления процессами структурообразования газобетона [Электронный ресурс] / А.Д. Курзанов, А.О. Куршаков, Е.П. Анферов, С.В. Леонтьев // Master's journal. – 2017. - № 1. – Режим доступа: http://vestnik.pstu.ru/mj/archives/?id=&folder_id=6601
8. *Мартыненко, В.А.* Справочник специалиста лаборатории завода по производству газобетонных изделий / В.А. Мартыненко, Н.В. Морозова. – Днепропетровск: ПГАСА, 2009. – 308 с.

05.13.18

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.С. Клепов, В.Е. Бажин

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
Бийск, grn@bti.secna.ru

МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЕРЦИОННЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ НА БАЗЕ МОДЕЛИ ДИСКРЕТНОЙ ФАЗЫ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-166-168

В данной статье описывается метод расчета эффективности инерционных пылеуловителей, благодаря которой можно повысить их эффективность, что приведет к меньшим выбросам мелкодисперсных частиц в атмосферу.

Ключевые слова: *циклон, частицы, эффективность, газоочистка.*

Введение

Важнейшая характеристика газоочистного оборудования – это его эффективность, которая определяет, выброс какой доли частиц из отходящих газов в атмосферу будет предотвращен. Современные экологические требования устанавливают, что в связи возрастанием вредных производств, эффективность пылеуловителей должна составлять более 98% [1].

Однако большинство используемых конструкций пылеуловителей обеспечивают эффективность лишь не более 92%. При этом, на высокодисперсных частицах (менее 5 мкм), наиболее опасных для человека, эффективность, как правило, не превышает 80%.

Поэтому необходимо дальнейшее совершенствование инерционных пылеуловителей путем оптимизации геометрических размеров, введения вспомогательных абсорбирующих веществ (например, распыление капель воды, поглощающих на себя частицы золы) и или наложения внешних энергетических полей (например, ультразвуковых).

Ввиду сложности проведения натурных испытаний различных вариантов конструктивных схем пылеуловителей при различных режимах работы необходима разработка специальных методов математического и компьютерного моделирования для определения их эффективности.

Наиболее целесообразно для этих целей применять комплексы конечно-элементного моделирования. Наибольший функционал для этих целей предоставляет система ANSYS Fluent, в которой реализована модель дискретной фазы. Для решения поставленных задач она может быть дополнена с помощью программируемых пользовательских функций, которые учитывают особенности движения потока, характерные для конкретной прикладной задачи, и позволяют определить выходные характеристики рассчитываемого инерционного пылеуловителя (эффективность).

Перспективность предложенного подхода состоит в следующем:

1. Возможность одновременного учета большого числа факторов, влияющих на эффективность циклона (изменение температуры в газовом потоке, отражение частиц от стенок циклона и т.д.);

2. Простота реализации ввиду использования известных моделей заложенных в программном пакете, что позволяет избежать ошибок;

3. Высокая скорость расчета за счет использования стандартных и оптимизированных модулей реализующих базовую модель движения дисперсной фазы.

В модели дискретной фазы течение газовой фазы описывается системой уравнений Навье-Стокса, состояния газовой среды и теплопроводности в предположении, что движение газа является стационарным. Поле скоростей газа является входными данными для

моделирования движения дисперсной фазы. Движение каждой частицы описывается законом Ньютона, согласно которому её скорость изменяется за счёт действия некоторой совокупности сил со стороны молекул газовой фазы [2].

На стенках и патрубках циклона задаются граничные условия. На границе входного патрубка, условия инъекции перпендикулярны поверхности сечения, по направлению внутрь циклона, с равными интервалами времени, заданного размера, заданной скорости и заданным массовым расходом частиц. На стенках циклона задано граничное условие *reflect*, т.е. угол падения, равен углу отражения. Последнее условие – условие выхода. Условие означает, что при достижении частицей стенки, на которой условие задано, данная частица исключается из расчета (попала в бункер или окружающую среду). Условия выхода задаются на патрубке, соединяющем циклон с бункером.

Эффективность определяется как отношением массы частиц прошедших через сечение выходного патрубка циклона за фиксированный период времени к массе частиц на входном патрубке:

$$\eta = \left(1 - \frac{G_{out}}{G_{in}} \right) \times 100\% ; \quad (1)$$

Разработанная методика была реализована с помощью встроенных средств ANSYS Fluent. Ниже представлена 3D-модель расчетной области, разработанная в программе КОМПАС (рис. 1) и размеры циклона. В качестве примера была взята модели циклона ЦН-11-300 [3].

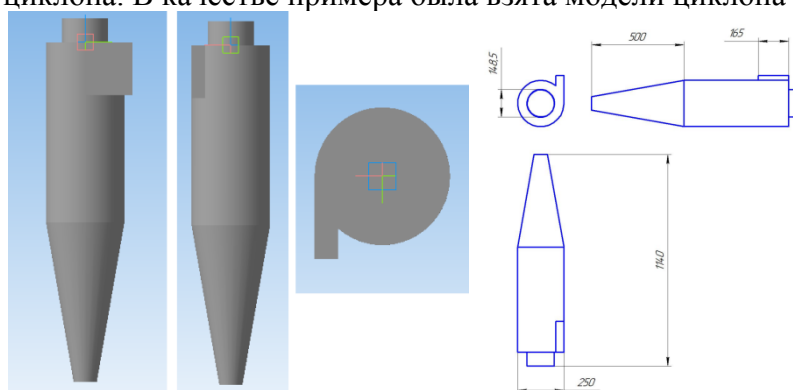


Рис. 1 – 3D-модель расчетной области (вид сбоку, спереди и сверху) и размеры циклона

Скорость на входе и разрежение на выходе соответствует типичным значениям разрежения промышленных вентиляторов. Результаты расчетов показаны на рис. 2 и рис. 3. Размер частиц равен 1 мкм, массовый расход составляет 0,1 кг/с, скорость частиц на входном патрубке равна 4 м/с.

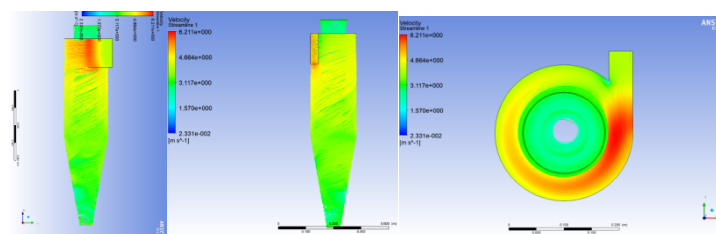


Рис. 2 – Распределение скорости движения газа в циклоне

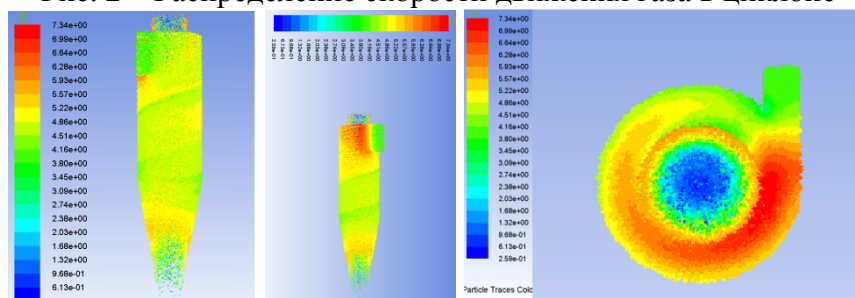


Рис. 3 – Распределение скорости движения частиц

Для расчета эффективности циклона, реализован специализированный программный модуль, представляющий собой User Define Functions (UDF), который реализован с применением широко распространенного языка программирования C++, используемого для этих целей в ANSYS Fluent.

На основании данных о суммарных массах, прошедших к определенному моменту времени (4,434 с – 5,434 с) рассчитывается эффективность инерционного пылеуловителя по формуле (1).

Для модельного циклона эффективность составила 88% для частиц размером 1 мкм.

Заключение

Выработан общий подход к моделированию, который впервые позволяет учесть множество факторов при этом отличается простотой реализации и высокой производительностью расчета. Подход реализован в CAE системе ANSYS Fluent Student и результаты расчета эффективности промышленного циклона показали, что он позволяет улавливать более 88% частиц размером менее 1 мкм.

Таким образом, предложенный метод расчета будет в дальнейшем использован для оптимизации конструкции инерционных пылеуловителей с введением вспомогательных абсорбирующих веществ и наложением внешних полей (УЗ полей).

Исследование проведено при поддержке гранта Президента РФ МД-4753.2016.8.

Список литературы

1. Охрана атмосферного воздуха. Установки очистки газа. Аппараты для мокрой очистки газа от пылевых частиц [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.air-protection.ru/uog/3_wa.htm.
2. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности [Текст] / В.Н. Хмелев [и др.]; под ред. В.Н. Хмелев. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.
3. Пылеулавливающее оборудование [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.cikloni.ru/item.php?uid=21>.

05.13.11

М.А. Черноскутов

Уральский федеральный университет,
Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского
Екатеринбург, mach@imm.uran.ru

АЛГОРИТМ ПОИСКА ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ СООБЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАВНОУДАЛЕННЫХ ВЕРШИН

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-169-171

Поиск сообществ в графах является актуальной задачей анализа крупных сетей. На данный момент существует множество различных работ, посвященных решению данной проблемы. Поиск пересекающихся сообществ – сложная задача, необходимая для анализа реальных данных. В работе представлен алгоритм, позволяющий находить перекрывающиеся сообщества в графе с помощью анализа его подграфов и поиска в них клик.

Ключевые слова: *алгоритмы на графах, поиск сообществ в графах, перекрывающиеся сообщества.*

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №16-37-00203_мол_а. При проведении работ был использован суперкомпьютер “Уран” ИММ УрО РАН.

1. Введение

Алгоритмы на графах являются распространенной математической абстракцией, позволяющей моделировать объекты реального мира и связи между ними. В частности, алгоритмы на графах используются для моделирования нейронных сетей в мозге [1], анализа социальных сетей [2], исследования городского трафика [3].

Одной из наиболее распространенных задач обработки графов является поиск сообществ. Данная задача предполагает поиск в графе таких локальных уплотнений, что внутри них плотность ребер больше, чем снаружи. Решение задачи поиска сообществ, особенно при анализе реальных данных, как правило, является субъективным. В частности, существует множество исследований, посвященных разным способам нахождения сообществ в графах [4-6]. Как правило, результаты работы вышеприведенных алгоритмов получаются примерно одинаковые. При этом, точность работы каждого отдельного алгоритма измеряется в соответствии с субъективными характеристиками (например, ручной разметкой графа на сообщества), а поэтому она может изменяться при анализе наборов данных с различной структурой внутренних связей.

Дальнейшим развитием задачи поиска сообществ в графах является задача поиска пересекающихся сообществ. В отличие от предыдущей задачи, в данном случае, некоторые сообщества могут иметь общие вершины. В связи с этим, задача поиска пересекающихся сообществ является более сложной для решения.

2. Поиск пересекающихся сообществ в графе

Известным алгоритмом для поиска пересекающихся сообществ является алгоритм CFinder [7], основанный на анализе “взаимопроникновения” клик. Граф в данном алгоритме анализируется на наличие всех k -клик, т.е. клик (полносвязных подграфов), состоящих из k -вершин. При этом, сообщество формируются при условии, что две смежные клики имеют $k-1$ общую вершину.

Алгоритм CFinder универсален и обладает высокой вычислительной сложностью. При этом, он не всегда может учитывать определенную специфику сложных сетей. Например, в социальных сетях отдельные сообщества часто бывают довольно плотными, т.е. имеющими максимальную длину пути между вершинами не более 2-3 ребер. Другим примером может служить граф синонимов. Как правило, отношение синонимии транзитивно, а значит, сообщества, образованные на основе синонимической связности, также имеют максимальную длину пути между своими элементами не более 2 ребер. В этом случае, CFinder не всегда может оказаться пригоден для анализа таких сетей, т.к. набор связанных клик может выстраиваться, например, в длинные цепочки, в которых длина пути между элементами может быть сопоставима с диаметром самого графа.

3. Поиск пересекающихся сообществ на основе определения равноудаленных вершин

Алгоритм поиска пересекающихся сообществ на основе равноудаленных вершин основан на идее поиска компактных плотных сообществ в комплексных сетях, характерным признаком которых является ограничение сверху на максимальную длину пути между вершинами. В частности, в данной работе рассматривается случай на сообщества, в которых вершины удалены друг от друга не более, чем на два ребра.

Описанный выше вариант поиска пересекающихся сообществ работает по следующей схеме. На первом этапе весь граф разбивается на отдельные эго-сети окрестности 2 (т.е. подграфы, образованные некоторыми вершинами, а также всеми вершинами, равноудаленными от них на два ребра). В каждом таком подграфе выполняется поиск кратчайших путей до всех остальных вершин. После чего выполняется транзитивное замыкание тех вершин, чьи длины путей не превысили 2 (данный параметр может быть варьируемым в зависимости от структуры графа и решаемой задачи). Далее, выполняются поиск клик максимального размера в полученных графах. Данные клики будут являться кандидатами на роль сообществ. На завершающем этапе клики поочередно сравниваются с друг другом. При этом, сообществом признается та клика, в которой содержится не менее 50% вершин, не участвующих в других сообществах (данный параметр также является варьируемым в зависимости от структуры исходного графа и желаемой максимальной площади пересечения сообществ). Ниже приведен псевдокод разработанного алгоритма.

Псевдокод алгоритма поиска пересекающихся сообществ на основе определения равноудаленных вершин

Входные данные: граф G

Выходные данные: список сообществ $ComList$

Функции: $ExtractSubgraph(G, v, k)$ извлекает эго-сеть v окрестности k из графа G , $TransClosure(G, k)$ выполняет транзитивное замыкание в графе G для длин путей, не превышающих k , $GetCliques(G)$ извлекает все клики из графа G , $Sort(L)$ сортирует клики из списка L по убыванию размера, $HasUncheckedNodes(G, m)$ возвращает $true$, если в графе G есть не менее m процентов неразмеченных узлов

```
1  for each  $v$  in  $G$ 
2       $Ego := ExtractSubgraph(G, v, 2)$ 
3       $EgoNew := TransClosure(Ego, 2)$ 
4       $CliqueList := GetCliques(EgoNew)$ 
5       $CliqueList := Sort(CliqueList)$ 
6      for each  $Clique$  in  $CliqueList$ 
7          If  $HasUncheckedNodes(Clique, 50)$ 
8               $ComList := ComList + Clique$ 
```

4. Результаты и анализ работы алгоритма

На рис. 1 представлен результат работы вышеприведенного алгоритма для модельного графа.

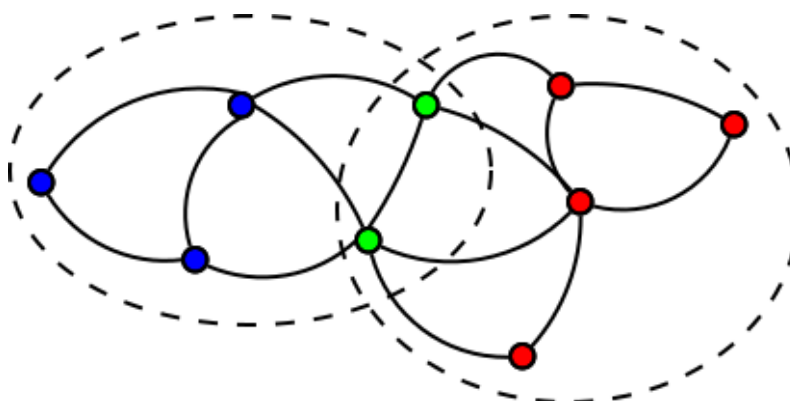


Рис. 1. Перекрывающиеся сообщества в графе (красным и синим цветом отмечены вершины из разных сообществ, зеленым цветом отмечены вершины, входящие в оба сообщества)

Как видно из рисунка, алгоритм выделил в графе два сообщества таким образом, что они имеют некоторую часть общих вершин. С помощью данного алгоритма можно также анализировать и другие графы, полученные в результате анализа реальных данных в различных приложениях науки: анализ социальных сетей, компьютерная лингвистика, нейроинформатика и др.

Достоинством разработанного алгоритма по сравнению с CFinder является сниженное время вычислений, т.к. поиск клик выполняется в графах меньшего размера. К недостаткам разработанного алгоритма можно отнести его возможную неустойчивость, т.к. на набор сообществ в графе может повлиять порядок просмотра вершин (см. строку 1 в псевдокоде).

5. Заключение

В статье описан алгоритм поиска перекрывающихся сообществ, основанный на определении множеств равноудаленных друг от друга вершин. Алгоритм основан на извлечении и последующем анализе отдельных структурных элементов графа – его эго-сетей второго порядка. Разработанный алгоритм может использоваться в различных приложениях анализа социальных сетей, компьютерной лингвистике и др. областях науки.

Список литературы

1. E. Bullmore and O. Sporns, "Complex brain networks: Graph theoretical analysis of structural and functional systems", (nature reviews neuroscience (2009) 10, (186-198)), vol. 10, pp. 186–198, 03 2009.
2. M. Grandjean, "A social network analysis of Twitter: Mapping the digital humanities community". Cogent Arts & Humanities.3 (1):1171458, 2016.
3. A. Haznagy, I. Fi, A. London, and T. Nemeth, "Complex network analysis of public transportation networks: A comprehensive study". In 2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), June 2015, pp. 371–378.
4. M.E.J. Newman, M. Girvan, "Finding and evaluating community structure in networks", Physical review E 69 (2), 026113.
5. M. Rosvall, C.T. Bergstrom, "Maps of random walks on complex networks reveal community structure", Proceedings of the National Academy of Sciences 105 (4), 1118.
6. V.D. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte, E. Lefebvre, "Fast unfolding of communities in large networks", Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment 2008 (10), P10008.
7. G. Palla, I. Derenyi, I. Farkas, T. Vicsek, "Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society", Nature 435 (7043), pp. 814-818.

05.13.11

^{1,2}В.А. Щапов к.т.н., ²С.Р. Латыпов¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет,

кафедра информационных технологий и автоматизированных систем;

²Институт механики сплошных сред УрО РАН,

лаборатория телекоммуникационных и информационных систем,

Пермь, phprus@gmail.com, latypovsr@icmm.ru

СПОСОБЫ ЗАПУСКА ЗАДАЧ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ОКРУЖЕНИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОНТЕЙНЕРНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ DOCKER

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-172-177

В статье рассматриваются способы запуска задач на суперкомпьютере при использовании контейнерной виртуализации Docker для их изоляции. Первый способ основан на использовании протокола SSH, является простым в реализации, но имеет сложности с обеспечением безопасности суперкомпьютера. Второй способ основан на отображении Slurm-окружения внутри контейнеров, что позволяет использовать входящий в состав Slurm механизм запуска параллельного приложения, а также решает проблемы с безопасностью, так как позволяет запускать приложения в контейнерах сразу с ограниченными правами. Описываются требования к базовым образам пользовательских контейнеров задач. Представленные результаты тестирования производительности показывают отсутствие наблюдаемого влияния контейнерной виртуализации на эффективность работающих задач. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-37-00069.

Ключевые слова: *Docker, Slurm, HPC, Linux, Контейнерная виртуализация.*

Введение

В настоящее время применение технологий контейнерной виртуализации для доставки, запуска и изоляции приложений становится одним из основных способов в больших инфраструктурах. Применительно к суперкомпьютерам и распределенным вычислительным системам актуальной является задача по обеспечению совместимости системы с пользовательскими приложениями без возможных конфликтов в окружении. Пользовательские расчетные приложения могут требовать установки несовместимых друг с другом настроек или библиотек. Вычислительные узлы могут иметь различные версии операционных систем, компиляторов, системных и прикладных библиотек, в том числе, библиотек MPI с различными ABI (Application Binary Interface). Все это делает невозможным прямой перенос скомпилированных бинарных файлов расчетных приложений между такими вычислительными узлами.

Эту проблему можно решить либо адаптацией программного обеспечения под окружение, что, однако, не всегда возможно или потребует больших ресурсов, либо применением технологий виртуализации.

Исследования показывают, что применение полной виртуализации в HPC задачах приводит к существенному снижению производительности [1], что делает невыгодным ее использование. Кроме того, процессоры Intel Xeon Phi, получающие в последнее время все большее распространение, не поддерживают технологии аппаратной виртуализации.

В случае контейнерной виртуализации (виртуализации на уровне ядра операционной системы) одно ядро операционной системы поддерживает несколько изолированных экземпляров пространства пользователя вместо одного. При этом каждый экземпляр пользовательского окружения может содержать свои версии файлов, свой набор программного обеспечения и библиотек, которые требуются запускаемым научным

приложениям. Использование изоляции на уровне ядра операционной системы снижает накладные расходы и делает возможным эффективное использование контейнеров для обеспечения переносимости вычислительноемких задач.

Общая схема работы задач в docker [2] контейнерах показана на рис. 1.

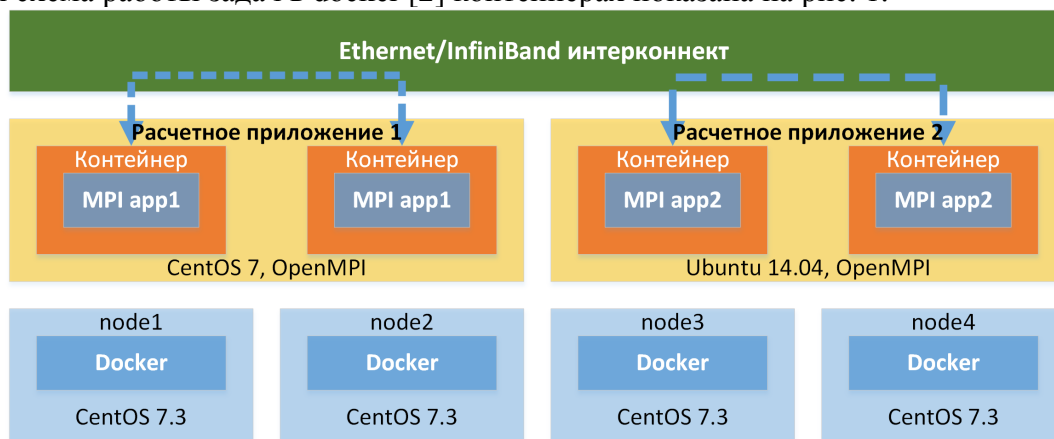


Рис. 1. Общая схема работы задач в контейнерах

1. Запуск контейнеризированных задач с использованием SSH

Простейшим способом является контейнеризация задач с использованием SSH-доступа для запуска приложений на вычислительных узлах. Подробнее он рассмотрен в статье [3]. Для этого в пользовательских контейнерах устанавливается SSH сервер. Перед запуском задачи на счет настраиваются ключи беспарольной аутентификации для подключения к SSH серверам в контейнерах.

После запуска задачи на счет один из счетных узлов объявляется ведущим, а остальные ведомыми. Ведомые узлы запускают SSH сервера внутри контейнера с задачей. Ведущий узел запускает внутри контейнера пользовательскую команду и передает ей список ведомых узлов, на которых запущены SSH сервера.

Таким образом, пользовательское приложение может получить доступ ко всем вычислительным ресурсам, выделенным для задачи. Так как реализации MPI позволяют использовать SSH для запуска распределенной задачи, то такой подход позволяет быстро реализовать запуск вычислительных задач в docker контейнерах.

Данный способ имеет несколько недостатков. Во-первых, в этом случае усложняется контроль за работой контейнеров. Завершение задачи внутри контейнера не завершает работу SSH сервера, и следовательно необходимо отдельно отслеживать завершение счетной задачи и осуществлять корректную остановку работающих на всех узлах задачи контейнеров.

Во-вторых, запуск SSH сервера внутри контейнера возможен только с правами пользователя root. Пользователь root внутри контейнера эквивалентен пользователю root в базовой операционной системе узлов, что потенциально позволяет пользовательскому приложению в контейнере получить полный доступ к суперкомпьютеру.

Таким образом данный способ запуска задач не может быть рекомендован, как основной для публично доступного сервиса или суперкомпьютера, где могут запускаться образы с задачами, полученные от пользователей.

2. Запуск контейнеризированных задач с использованием Slurm

Данный способ базируется на эмуляции наличия Slurm окружения внутри контейнера и перехвате обращений к командам Slurm внутри контейнера. На рис. 2 представлена схема запуска MPI задачи с использованием OpenMPI slurm plm модуля.

Из схемы следует, что система запуска задач Slurm на одном из выделенных вычислительных узлов запускает приложение mriexec, которое в свою очередь, используя команду srun, запускает дочерние процессы на остальных вычислительных узлах. Команда srun для запуска дочерних процессов на других вычислительных узлах использует встроенный механизм порождения процессов системы Slurm.

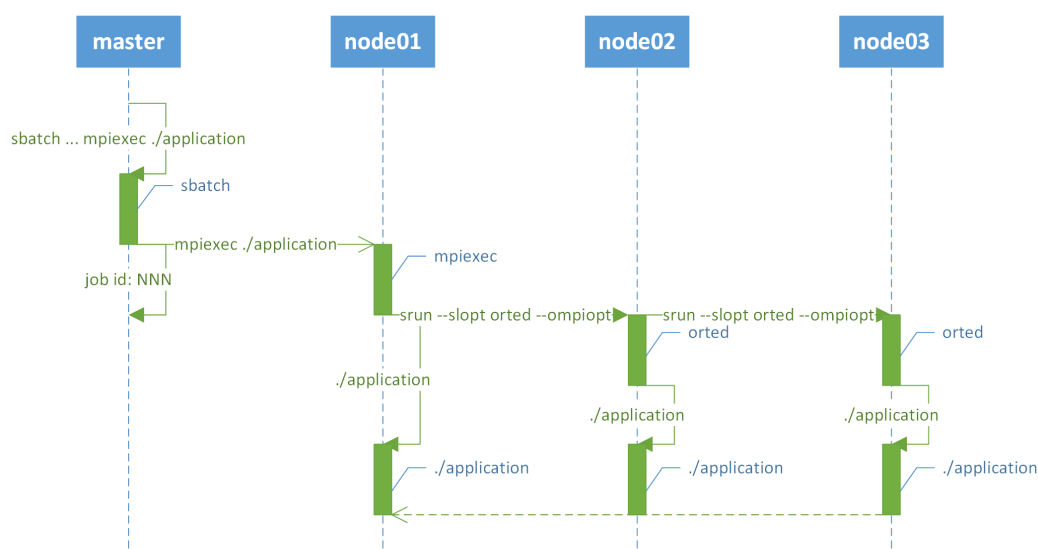


Рис. 2. Запуск MPI задачи с помощью OpenMPI slurm plm модуля

Таким образом, все процессы задачи на всех вычислительных узлах контролируются и централизованно управляются системой Slurm.

Для принятия решения о выборе механизма запуска дочерних задач через Slurm, plm-модуль используется проверка на наличие переменной окружения SLURM_JOBID. При ее наличии делается вывод, что MPI задача запущена системой Slurm, и, что можно использовать внутренние механизмы Slurm для управления процессами.

В этой схеме есть явные точки входа в задачу, перехватив которые можно запускать все процессы задачи в docker-контейнерах. К этим точкам относятся:

1. Запуск приложения mpirun на ведущем узле.
2. Запуск приложений orted на дочерних узлах.

Приложение mpirun можно запускать в контейнере без дополнительных условий, но с передачей всех переменных окружения Slurm (имеющих имя, начинающееся на «SLURM_») внутрь контейнера.

Для запуска приложений orted на дочерних узлах требуются дополнительные действия. Так как mpirun для запуска приложений orted на дочерних узлах использует команду srun, то внутри контейнера на ведущем узле необходимо установить приложение прослойку с именем srun, которая выйдет из контейнера и запустит на дочерних узлах модифицированную команду srun, передав ей параметры, запускающие orted внутри контейнеров.

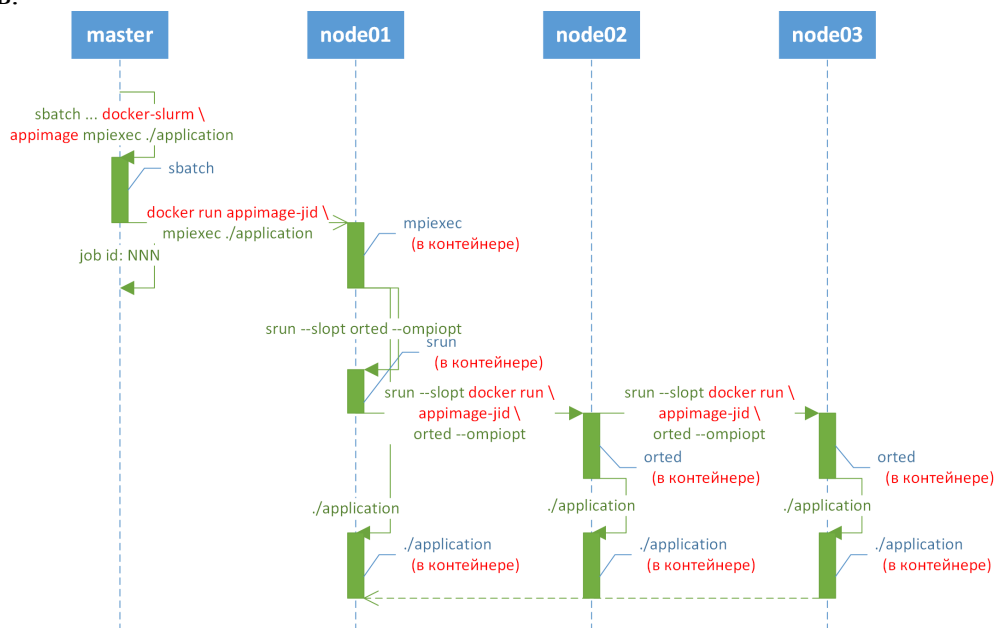


Рис. 3. Запуск MPI задачи с помощью OpenMPI slurm plm модуля внутри docker контейнеров

На рис. 3. представлена схема запуска MPI задачи с помощью OpenMPI slurm plm модуля внутри docker контейнеров. Красным цветом выделены дополнительные команды, требующиеся для запуска компонент задачи в изолированных контейнерах.

В текущей реализации, применяемой на суперкомпьютере «Тритон» ИМСС УрО РАН, команда прослойка `sgun` из контейнера ведущего узла использует SSH доступ из контейнера на ведущий узел задачи. Это накладывает требования на наличие заранее настроенной беспарольной аутентификации для пользователей суперкомпьютера между его узлами. Команда-прослойка `sgun` помещается в контейнер при его запуске, поэтому ее не требуется передавать пользователям для сборки контейнеров с задачами.

Ключевыми преимуществами данного метода являются:

1. Отсутствие дополнительных компонент, таких как SSH сервер в контейнерах с задачами.

2. Более высокий уровень защищенности системы, так как контейнеры с задачами можно запускать не с привилегиями суперпользователя, а с правами доступа конкретного, непривилегированного пользователя суперкомпьютера. В этом случае в контейнере не будет процессов, выполняющихся с повышенными привилегиями, что не дает возможность приложениям из контейнера повысить свои привилегии на вычислительных узлах или покинуть контейнер.

Таким образом, метод, основанный на эмуляции окружения Slurm внутри контейнера, является достаточно перспективным для реализации и практического применения.

3. Требования к docker-образам пользовательских задач

Ниже приведена конфигурация создания docker-образа тестовой задачи на примере системы измерения производительности работы MPI - Intel (R) MPI Benchmark Suite версии 3.2.4, устанавливаемого из репозитория операционной системы (пакет `mpitests-openmpi.x86_64`).

`mpitests-entrypoint.sh` – приложение точки входа в контейнер (настраивает окружение, требуемое для задачи):

```
#!/usr/bin/env bash
set -e
/usr/share/Modules/init/bash
module load mpi/openmpi-x86_64
exec "$@"
```

Dockerfile – конфигурационный файл сборки контейнера:

```
FROM centos:7.2.1511
# Установка библиотек для InfiniBand интерконнекта
RUN yum -y install libibverbs-utils libmlx4 libmlx5 ibutils libibcm libibcommon libibmad libibumad rdma librdmacm-utils librdmacm perftest infiniband-diags
# Установка OpenMPI
RUN yum -y install openmpi
# Установка пользовательской вычислительной задачи
RUN yum -y install mpitests-openmpi
# Добавление в контейнер приложения точки входа, которое настроит окружение для запускаемой пользовательской задачи.
ADD mpitest/mpitests-entrypoint.sh /mpitests-entrypoint.sh
RUN chmod +x /mpitests-entrypoint.sh
# Установка точки входа – приложения, которое будет запущено при старте контейнера
ENTRYPOINT /mpitests-entrypoint.sh
```

Точка входа в контейнер (ENTRYPOINT) – это программа, которая автоматически выполнится при запуске docker-образа. В качестве параметров ей будет передана пользовательская команда для запуска необходимой MPI-программы (например, `mpiexec /opt/mpi-app app-args`). Задача этой программы корректно настроить необходимое для работы MPI-программы окружение – пути поиска библиотек, исполняемых файлов и т.д., после чего запустить команду, переданную через параметры командной строки. В рассматриваемом примере

выполняется загрузка подсистемы модулей, и загружаются параметры среды для openmpi.

Для построения Docker образа задачи необходимо сформировать конфигурационный файл Dockerfile [4], отвечающий следующим требованиям:

1. В образ должны быть установлены пакеты библиотек для работы с InfiniBand. Без них использование InfiniBand интерконнекта будет невозможно.

2. В образ должны быть установлены пакеты MPI, необходимые для работы упакованного приложения.

3. В образ должны быть скопированы или установлены из пакетов все требуемые файлы расчетной задачи.

4. В образ должна быть скопирована правильная программа точки входа, которая выполняет настройку окружения внутри контейнера перед его запуском.

5. У образа должна быть установлена точка входа (ENTRYPOINT) на вышеуказанную программу.

Остальные действия, такие как создание требуемых пользователей внутри контейнера, копирование программы `gmp`, выполняются непосредственно перед постановкой задачи на счет одинаково для всех задач. Подобная архитектура позволяет создавать универсальные образы задач, не привязанные к конкретному суперкомпьютеру и к конкретным пользователям. Это позволит, например, подготовить общий контейнер с каким-либо расчетным приложением, которым без изменений смогут пользоваться все пользователи суперкомпьютера.

4. Измерение производительности задачи при запуске внутри docker контейнеров

Измерение производительности MPI задач проводилось с помощью программного обеспечения Intel (R) MPI Benchmark Suite версии 3.2.4, установленного из репозитория операционной системы (пакет `mpitests-openmpi.x86_64`). В качестве реализации MPI использовался OpenMPI версии 1.8.1 из репозитория операционной системы. Docker контейнеры были построены на базе docker образа `centos:6`, поставляемого разработчиками CentOS с датой сборки 15.03.2017. В контейнер были установлены пакеты, необходимые для запуска MPI задач, пакеты `openmpi`, `mpitests-openmpi` и пакеты, необходимые для работы InfiniBand интерконнекта.

Сравнение проводилось между одинаковыми наборами тестов, каждый из которых запускался, в базовой операционной системе вычислительных узлов, и в контейнерах, работающих поверх вычислительных узлов.

На рис. 4 приведены некоторые результаты запуска тестов. В тестах измерялось среднее время выполнения операции в зависимости от объема передаваемых данных.

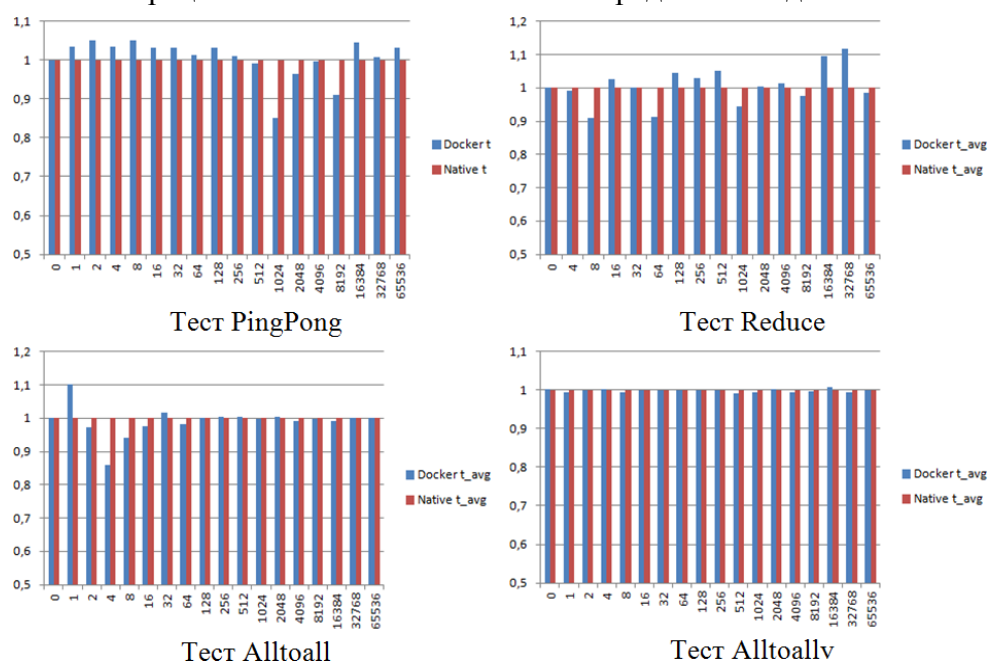


Рис. 4. Результаты тестов производительности

Данные на графиках приведены в нормированном относительном виде, где за единицу принято время выполнения соответствующего теста без использования контейнерной виртуализации. Результаты измерений производительности показывают отсутствие каких-либо существенных замедлений непосредственно во время работы MPI-приложений при использовании контейнерной виртуализации. Для средних значений замедление при использовании контейнерной виртуализации не превышает нескольких процентов, но оно полностью укладывается в размах колебаний измеряемых величин (min–max) в случае запуска тестов непосредственно в базовой операционной системе вычислительных узлов. Таким образом, можно сделать вывод, что возможные замедления при использовании контейнерной виртуализации меньше, чем погрешность измерения при тестировании.

Заключение

В работе приведены способы запуска задач в изолированных docker контейнерах на суперкомпьютере. Проанализированы их преимущества и недостатки и сделан вывод о преимуществах метода, основанного на эмуляции окружения системы запуска задач в Slurm внутри контейнера. Результаты тестирования производительности MPI при использовании контейнерной виртуализации для доставки и запуска задачи на вычислительных узлах показывают, что в среднем накладные расходы на контейнерную виртуализацию находятся в пределах погрешности измерения.

Таким образом, показана возможность использования технологии Docker для доставки, развертывания и запуска вычислительных задач на суперкомпьютере в изолированных контейнерах с использованием немодифицированной системы запуска задач без потерь производительности. Использование подготовленных контейнеров с приложениями позволит упростить сопровождение вычислительных систем и облегчить перенос приложений между суперкомпьютерами без необходимости их перекомпиляции.

Список литературы

1. *W. Felter, A. Ferreira, R. Rajamony and J. Rubio* An updated performance comparison of virtual machines and Linux containers // IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS), Philadelphia, PA, 2015, pp. 171-172.
2. Docker - Build, Ship, and Run Any App, Anywhere. URL: <https://www.docker.com/> (дата обращения: 17.08.2017).
3. *Щапов В.А., Денисов А.В., Латыпов С.Р.* Применение контейнерной виртуализации Docker для запуска задач на суперкомпьютере // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (26-27 сентября 2016 г., г. Москва). – М.: Изд-во МГУ, 2016. – С. 505-511.
4. Dockerfile reference | Docker Documentation. URL: <https://docs.docker.com/engine/reference/builder/> (дата обращения: 17.08.2017).

05.13.18

А.Г. Щербинин д.т.н., А.И. Кабирова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Электротехнический факультет, кафедра Конструирование и технологии в электротехнике,
Пермь, ktei@pstu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАБЕЛЯ С ЖИЛАМИ СЕКТОРНОЙ ФОРМЫ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-178-180

Исследовано электрическое поле кабелей с отдельно экранированными жилами секторной формы. Рассмотрен силовой кабель марки АПвП с тремя алюминиевыми жилами секторной формы с изоляцией из сшитого полиэтилена сечением 240 мм^2 . В ходе исследования получено распределение потенциала и напряженности электрического поля в поперечном сечении изоляции. Проведен анализ зависимости напряженности от радиусов закругления частей секторной жилы.

Ключевые слова: сектор, токопроводящая жила, напряжение, силовой кабель, напряженность электрического поля, математическое моделирование.

Рассмотрим кабель марки АПвП 3*240 на напряжение 10кВ (рис. 1), геометрические размеры которого представлены в табл 1

Таблица 1

Геометрические размеры кабеля АПвП с изоляцией из сшитого полиэтилена

Число жил и сечение жилы	Радиус сектора	Полупроводящий экран, толщина	Изоляция, толщина	Расчетный диаметр по скрутке	Расчетный диаметр по медному экрану	Расчетный диаметр кабеля	Радиусы закругления в нижней и боковых частях секторной жилы
шт/мм ²	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
3×240	20,64	0,60	3,40	50,48	53,68	60,04	3

Напряжение и напряженность электрического поля определяются для одной изолированной токопроводящей жилы, так как каждая жила экранирована (рис. 2).

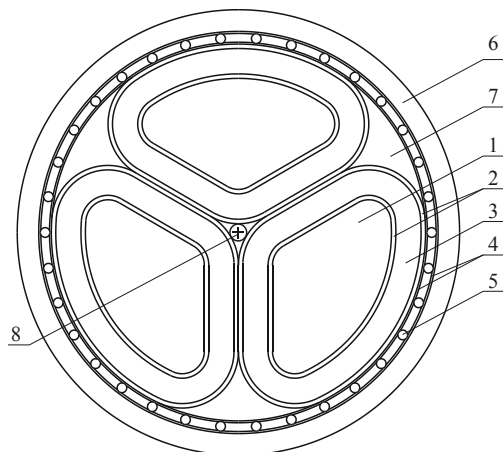


Рис. 1. Кабель марки АПвП на напряжение 10 кВ с секторными жилами. 1 – токопроводящая жила; 2 – два слоя экрана из полупроводящего вулканизированного полиэтилена; 3 – изоляция из вулканизированного полиэтилена; 4 – обмотка из нетканого полотна; 5 – экран из медных проволок; 6 – полиэтиленовая оболочка; 7 – межфазное заполнение; 8 – дренажный проводник из меди.

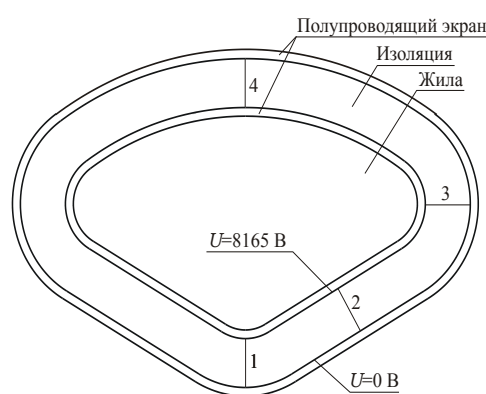


Рис. 2. Сечение изолированной секторной жилы

Распределение потенциала в изоляции описывается уравнением Лапласа [1-3]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

К внутренней поверхности изоляции прикладывается амплитудное значение напряжения, равное 8165 В, а к внешней – 0 В (рис. 2).

Дифференциальное уравнение (1) решается методом конечных элементов в среде ANSYS (МКЭ) [7–9].

Распределение потенциала в поперечном сечении представлено на рис. 3.

На рис. 4 приведено распределение напряженности электрического поля E , (В/м), которое вычисляется по формуле (2)

$$E = -grad(\varphi) \quad (2)$$

Наибольшие значения напряженности электрического поля наблюдаются в области с минимальным радиусом закругления, который с учетом толщины полупроводящего экрана равен 3,6 мм.

Из рисунков 4 и 5 видно, что максимальное значение напряженности электрического поля наблюдается на боковых радиусах закругления 3,40 кВ/мм, а на нижнем закруглении напряженность равна 3,33 кВ/мм. На боковых радиусах закругления напряженность больше на 2,1%, чем на нижнем радиусе закругления.

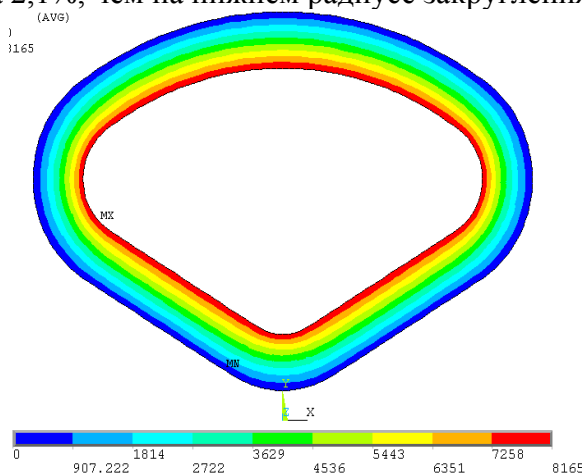


Рис. 3. Распределение потенциала в поперечном сечении изоляции

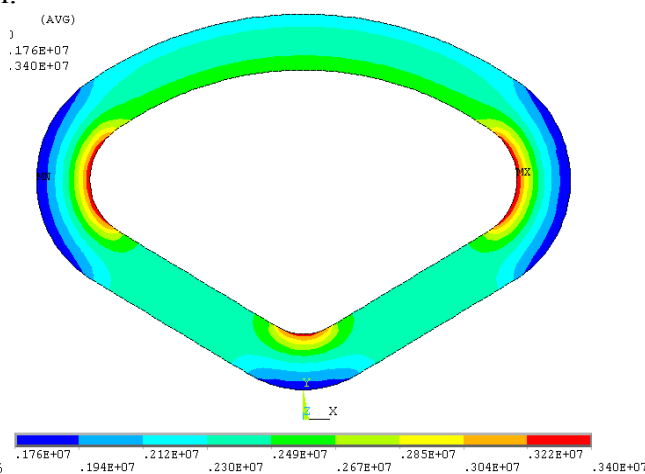


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля в поперечном сечении изоляции

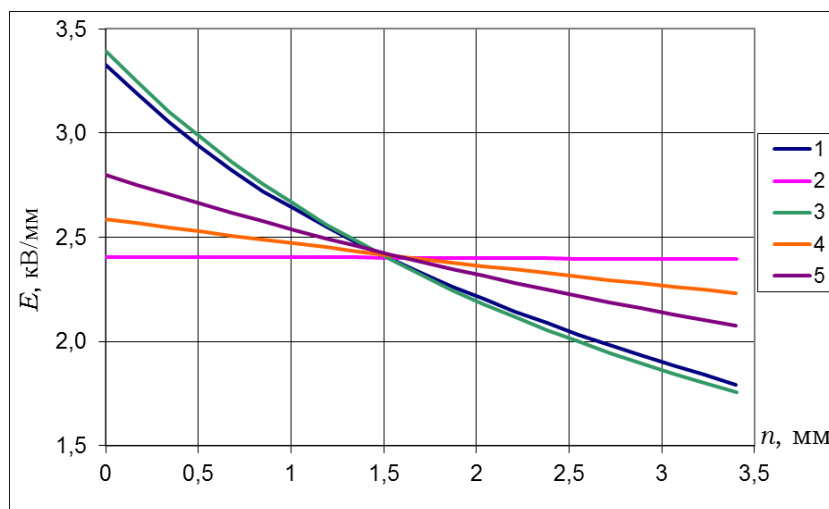


Рис. 5. Зависимости напряженности электрического поля по направлениям, указанным на рис. 2.

Из рис.5 видно, что максимальная напряженность электрического поля в сечениях 2 и 4 много меньше, чем в сечениях 1 и 3. Также на рис 5 (кривая 5) приведено распределение напряженности по толщине изоляции для круглой жилы с таким же сечением и толщиной изоляции, как и для секторной токопроводящей жилы. Максимальное значение напряженности для круглой жилы равно 2,8 кВ/мм, что меньше чем у секторной жилы на боковых и нижнем радиусах закругления соответственно на 17,6% и 15,9%.

При уменьшении радиуса нижнего закругления сектора с 3,6 до 3,44 мм, что соответствует снижению на 4,44%, значение напряженности на нижнем и боковом радиусе закругления становятся равными. При этом электрические характеристики кабеля не ухудшаются.

Приведенная к единице длины емкость секторной изолированной жилы, представленной на рис. 2, рассчитанная в среде ANSYS, равняется 0,400 нФ/м при заданной относительной диэлектрической проницаемости, равной 2,0. Емкость круглой изолированной жилы, определяемая по формуле [1,2]

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln(r_2/r_1)} \quad (3)$$

равна 3,698 нФ/м, что на 7,5% меньше, чем для секторной жилы того же сечения и одинаковых толщинах полупроводящих экранов и изоляции.

Подход, который был использован в работе, даёт возможность получать распределение потенциала и напряженности электрического поля в кабелях различной конструкции. Данные исследования могут быть полезны при конструировании новых кабельных изделий и для разработки новых конструкций токопроводящих жил.

Список литературы

1. Основы кабельной техники. Под ред. В.А. Привезенцева. М.: Энергия. 1975. 472 с.
2. Основы кабельной техники. Под ред. И.Б. Пешкова. М.: Издательский центр «Академия». 2006. 432 с.
3. Ковригин Л.А. Основы кабельной техники: учебное пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. 2006 94 с.
4. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
5. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS. М.: Издательский центр «Академия». 2006. 288 с.
6. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС. 2004. 272 с.
7. Зенкевич О.С. Конечные элементы и аппроксимация М.: Мир. 1986. 318 с.
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. – 392 с.
9. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 896.

05.13.18

А.Г. Щербинин, Д.Ю. Корюкин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Электротехнический факультет,
кафедра Конструирования и технологии в электротехнике,
Пермь, ktei@pstu.ru, koryukin-95@mail.ru

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛАХ БОЛЬШИХ СЕЧЕНИЙ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-181-183

В статье рассмотрено математическое моделирование электромагнитных процессов в круглых жилах больших сечений. Получено распределение плотности тока в жилах, приведены результаты расчетов сопротивлений переменному и постоянному току, а также коэффициентов поверхностного эффекта. Поставленная задача решалась методом конечных элементов с использованием программного пакета моделирования Maxwell.

Ключевые слова: сопротивление, плотность тока, поверхностный эффект, математическое моделирование, токопроводящая жила, Maxwell.

Для передачи энергии промышленной частоты на большие расстояния в кабельной технике используют жилы больших сечений. Однако применение таких жил приводит к возникновению поверхностного эффекта. Магнитные поля, возникающие в результате передачи электрического тока, являются причиной вытеснения тока к поверхности токопроводящей жилы, при этом на центральную часть жилы приходится меньшая нагрузка. Из-за явления поверхностного эффекта электрическое сопротивление проводника возрастает, что ведет к дополнительным потерям.

Чтобы определить сопротивления токопроводящих жил силовых кабелей с учетом поверхностного эффекта необходимо решать магнитодинамическую задачу [1,2].

Для решения поставленной задачи были сделаны следующие допущения: изменение магнитного поля происходит в поперечном сечении кабеля; токи смещения не учитываются; поскольку все величины изменяются по гармоническому закону, используется метод комплексных амплитуд. Исходя из принятых допущений, дифференциальные уравнения для комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала A для проводящей и диэлектрической среды выглядит следующим образом:

Проводящая среда

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_\alpha} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_\alpha} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - i\omega\sigma A + J_s = 0 \quad (1)$$

Диэлектрическая среда

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_\alpha} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_\alpha} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0, \quad (2)$$

где A – магнитный потенциал (в двухмерной постановке направлен по координате z); μ_α – абсолютная магнитная проницаемость; σ – удельная электропроводность; J_s – плотность тока, определяемая законом Ома в дифференциальной форме $J_s = -\sigma \nabla \varphi$, величина J_s в пределах одного проводника есть величина постоянная; $J_e = i\omega\sigma A$ – вихревая плотность тока; i – мнимая единица.

Уравнение (1) дополняется уравнением для заданной величины тока в проводнике

$$I = \int_{S_c} J ds = \int_{S_c} (-i\omega\sigma A + J_s) ds, \quad (3)$$

где S_c – площадь поперечного сечения проводника; J – результирующая плотность тока.

Равенство нулю векторного магнитного потенциала на бесконечно удаленной границе реализуется с помощью граничного условия Робина:

$$\frac{\partial A}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} A = 0 \quad (4)$$

Здесь: ρ – расстояние от центра проводника до границы области, на которой задано условие бесконечной границы.

Уравнения (1) – (4) решаются с использованием программного пакета ANSYS Maxwell. Исследования проведены для круглых медных токопроводящих жил с сечениями от 800 до 1600 мм². Удельное электрическое сопротивление меди равняется 1,72·10⁻⁸ Ом·м.

В результате решения поставленной задачи получено распределения векторного магнитного потенциала, напряженности поля и плотности тока в токопроводящей жиле.

На рис. 1 представлено распределение плотности тока в круглой жиле, полученное с использованием программного пакета моделирования Maxwell, построенного на основе метода конечных элементов [2,3]. А на рис. 2 график зависимости плотности тока по радиусу токопроводящей жилы.

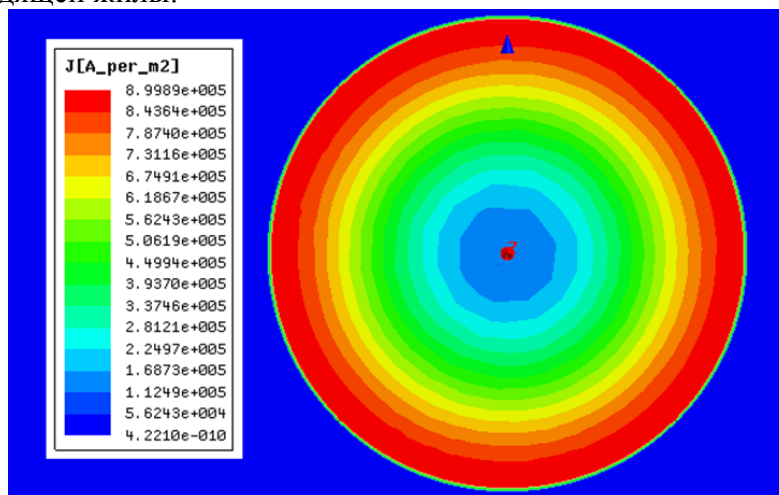


Рис.1. Распределение плотности тока в круглой жиле с сечением 1600 мм²

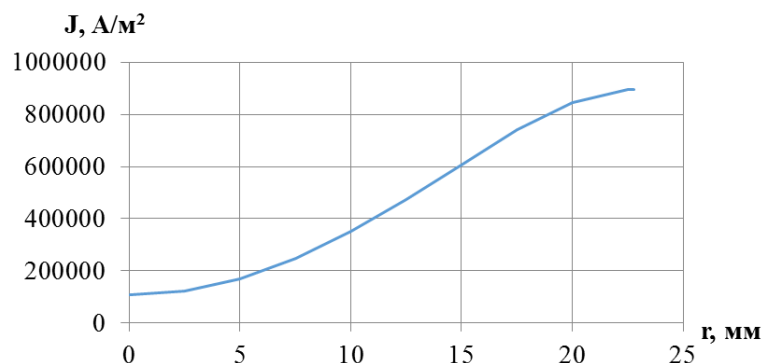


Рис. 2 – График зависимости плотности тока в круглой жиле от радиуса проводника

Из рис. 1 и 2 видно, что для токопроводящих жил больших сечений в результате поверхностного эффекта происходит существенное перераспределение плотности тока.

Сопротивление жилы переменному току, с учетом полученного распределения плотности тока, определяется по формуле:

$$R = \frac{1}{I^2} \int_S \frac{j^2}{\sigma} dS, \quad (5)$$

где I – заданный ток; S – площадь поперечного сечения проводника; j – плотность тока.

Сопротивление жилы постоянному току вычисляется следующим образом:

$$R_0 = \frac{l}{\sigma S}, \quad (6)$$

где l – длина проводника равная 1 м.

Тогда коэффициент поверхностного эффекта с учетом сопротивлений, определяемых по формулам (5) и (6), определяется как:

$$K_{пэ} = \frac{R}{R_0} - 1 \quad (7)$$

Результаты вычислений переменного и постоянного сопротивлений, а также коэффициента поверхностного эффекта, полученные с использованием программного пакета Maxwell, приведены в таблице. Также в таблице представлены значения коэффициентов поверхностного эффекта для токопроводящих жил круглой формы, определенные по ГОСТ Р МЭК 60287-1-1 – 2009. Видно, что коэффициенты поверхностного эффекта для круглых токопроводящих жил, вычисленные по разным методикам практически совпадают.

Таблица

Результаты вычислений сопротивлений и коэффициентов поверхностного эффекта

	$S, \text{мм}^2$	800	1000	1200	1400	1600
Круглая жила	$R \cdot 10^{-5}, \text{Ом/м}$	2,49	2,12	1,87	1,70	1,57
	$R_0 \cdot 10^{-5}, \text{Ом/м}$	2,15	1,72	1,44	1,23	1,07
	$K_{пэ}$	0,16	0,23	0,30	0,38	0,46
ГОСТ Р МЭК 60287-1-1 – 2009 (для круглых жил)	$K_{пэ}$	0,16	0,23	0,30	0,38	0,46

Таким образом, предложенная методика позволяет определять сопротивления переменному току токопроводящих жил, имеющих форму любой сложности и производить разработку новых конструкций токопроводящих жил с целью снижения сопротивления и, как следствие, тепловых потерь.

Список литературы

1. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. Москва: Физматлит, 2012. 430 с.
2. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 895 с.
3. Бате К.Ю. Методы конечных элементов. М.: Физматлит, 2010. 1022 с.

05.13.00

А.Г. Щербинин д.т.н., С.В. Стариков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Электротехнический факультет,
кафедра Конструирование и технологии в электротехнике,
Пермь, ktei@pstu.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАСЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-184-186

В работе представлен обзор компьютерной программы для автоматизации расчётов геометрических параметров и тепловых сопротивлений кабельных изделий. Рассмотрены основные расчётные модули программы и их внешний вид. Описаны возможные условия применения данной компьютерной программы и её модулей по отдельности.

Ключевые слова: компьютерная программа, разработка, геометрические параметры, тепловые сопротивления, расчётные модули, условия применения.

Введение

В процессе эксплуатации кабельных изделий происходит нагрев из-за потерь активной мощности в жиле и других элементах. Предельно допустимые токовые нагрузки зависят от допустимой температуры нагрева кабеля или провода в процессе эксплуатации, при которой изоляция не будет подвергаться ускоренному старению или снижению механической прочности и эластичности [1].

Под допустимой температурой нагрева кабеля понимают температуру токопроводящей жилы, при которой нагрев изоляции не будет превышать значений, установленных ПУЭ. Тепловой расчёт кабеля сводится к определению температуры токоведущей жилы с учетом потерь тепловой энергии во всех его элементах (основная изоляция, защитная оболочка, броня, окружающая среда)[2].

В процессе проведения теплотехнических расчётов по определению температуры кабеля, находящегося под нагрузкой, необходимо уделить особое внимание расчёту тепловых сопротивлений. Величина теплового сопротивления изоляции зависит как от геометрических размеров кабеля, так и от его конструкции.

Как правило, при проектировании кабельных изделий большое количество времени тратится на расчёт геометрических параметров и определение тепловых сопротивлений разрабатываемого кабельного изделия.

В связи с этим ставится задача разработки программного обеспечения, позволяющего без значительных затрат труда и времени производить расчёт тепловых сопротивлений элементов кабеля и окружающей среды, а также его геометрических параметров.

Обзор интерфейса программы

Для решения поставленной задачи была разработана компьютерная программа, позволяющая производить автоматизированный расчёт геометрических параметров, а также внутреннего и внешнего тепловых сопротивлений кабелей, проложенных на воздухе, в каналах и земле.

Программа имеет простой и интуитивно понятный интерфейс, что позволяет затрачивать минимум времени при вводе исходных данных.

Языком программирования для разработки был выбран язык VB.NET. К положительным сторонам данного языка можно отнести:

– высокая скорость создания приложений с графическим интерфейсом для программной среды Microsoft Windows;

- простой синтаксис, позволяющий очень быстро освоить язык;
- подсветка синтаксиса для облегчения поиска ошибок.

Основным модулем программы является конфигуратор кабельного изделия. Данный модуль позволяет создать любую конфигурацию кабельного изделия благодаря добавлению элементов в дерево элементов.

Внешний вид конфигуратора изменяется динамически, при вводе исходных данных. Программа сама подстраивается под вводимые данные и изменяет элементы интерфейса.

Внешний вид модуля конфигуратора геометрии кабельного изделия представлен на рисунке 1.

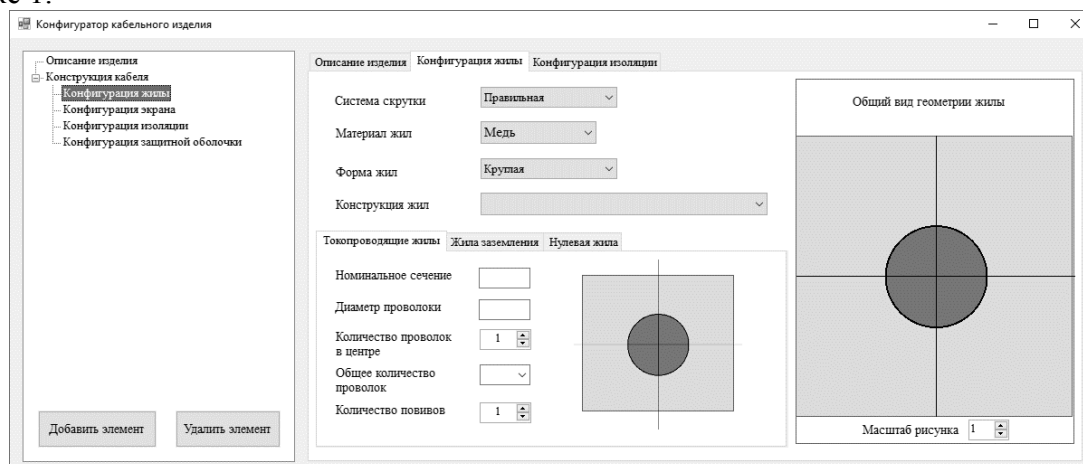


Рис. 1. Внешний вид модуля конфигуратора геометрии кабельного изделия.

В правой части модуля представлен элемент генерации изображения кабельного изделия в реальном времени, с учетом выбранных элементов конструкции и их размеров.

Следующим окном программы является модуль определения тепловых сопротивлений. Расчет производится на основе данных переданных из предыдущего модуля, таких как геометрические параметры и материалы, из которых они состоят. Программа автоматически загружает электротехнические параметры материалов из внутренней базы данных. Это позволяет пользователю не искать необходимые коэффициенты и параметры в справочниках.

Внешний вид модуля так же изменяется динамически, при вводе исходных данных. Программа сама подстраивается под вводимые данные и изменяет элементы интерфейса на основе геометрических параметров кабеля.

Внешний вид модуля расчета тепловых сопротивлений представлен на рисунке 2.

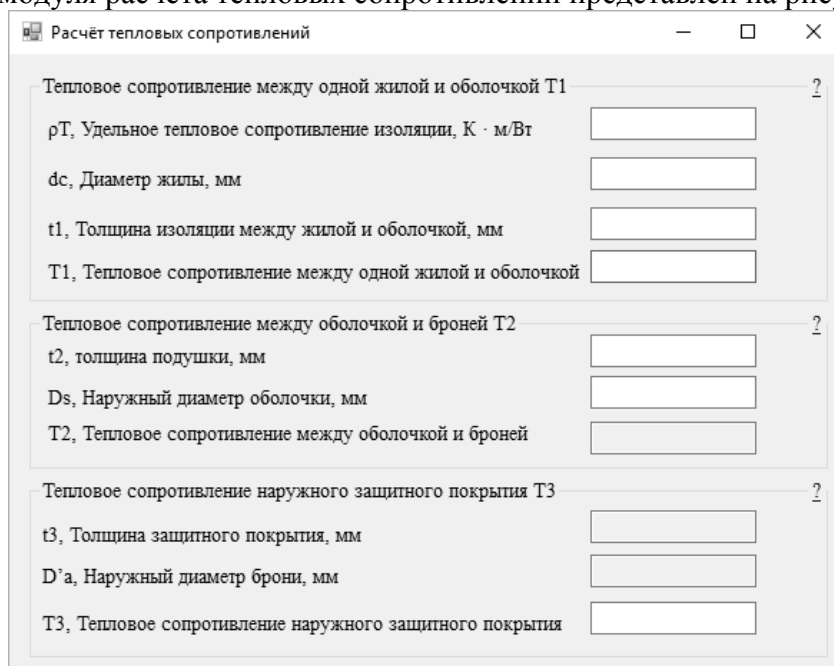


Рис. 2. Внешний вид модуля по определению тепловых сопротивлений

Также данный модуль имеет справочное окно, вызываемое при нажатии на «знаки вопроса» синего цвета, для более детального ознакомления с тем или иным пунктом данного ГОСТа.

Интерфейс справочного окна изображен на рисунке 3.

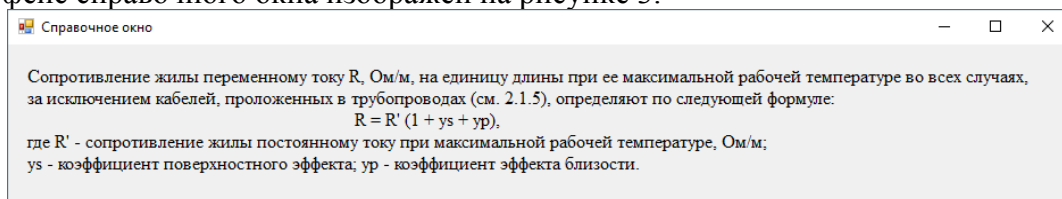


Рис. 3. Справочное окно модуля

Разработанная компьютерная программа предназначена для решения следующих задач:

- определению геометрических параметров каждой жилы;
- определению толщин изоляции каждой жилы и их общих оболочек;
- определению толщин брони и металлических оболочек;
- определению расстояния между жилами;
- изображение внешнего вида каждого из элементов и всего кабельного изделия в целом;

В большинстве случаев расчёт теплового сопротивления основной изоляции, защитной оболочки, брони и окружающей среды в программе производится в автоматическом режиме после ввода исходных данных кабеля, выбора материалов, из которого состоят его элементы. После выполнения вычислений программа выводит сообщение о результатах расчёта если все вычисления произведены, осуществляется переход на вкладку «Результаты расчёта теплового сопротивления», где сведены результаты всех предшествующих расчётов и значение результирующего теплового сопротивления, составляющее сумму тепловых сопротивлений отдельных элементов кабеля.

В дальнейшем программа будет совершенствоваться. Планируются следующие изменения:

- 1) будет создана база данных марок кабелей;
- 2) появится возможность расчета потерь в элементах кабеля;
- 3) будет реализован алгоритм расчёта потерь в жилах кабеля.

Разрабатываемая программа позволяет значительно сократить время при проведении расчётов геометрических параметров и тепловых сопротивлений кабельных изделий. Также данная программа может использоваться на производстве при разработке и проектировании инженерами–проектировщиками, а также при проведении лабораторных работ и курсовом проектировании студентами электротехнических специальностей.

Список литературы

1. ГОСТРМЭК60287-1-1–2009 «Кабели электрические. Вычисление номинальной токовой нагрузки. Часть 1–1. Уравнения для расчёта номинальной токовой нагрузки (100%-й коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения».
2. Зализный, Д.И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля/ Д.И. Зализный, С.Н. Прохоренко // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2012.–№5.– С. 25–34.
3. ГОСТРМЭК60287-2-1–2009. «Кабели электрические. Вычисление номинальной токовой нагрузки. Часть 2–1. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления».

05.13.18

А.Г. Щербинин д.т.н., И.А. Титов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
 электротехнический факультет, кафедра Конструирование и технологии в электротехнике,
 Пермь, ktei@pstu.ru

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ ШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА

DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-187-189

В данной статье рассмотрено изотермическое течение ньютоновских вязких жидкостей в винтовом канале экструдера с помощью одномерных плоских и осесимметричных моделей. Целью исследования является проведение сравнительного анализа между плоской и осесимметричной моделями.

Ключевые слова: экструдер, скорость, вязкость, жидкость.

Рассмотрим построение одномерных плоской и осесимметричной математических моделей изотермического течения ньютоновской жидкости в винтовом канале экструдера с постоянной глубиной канала (рис. 1).

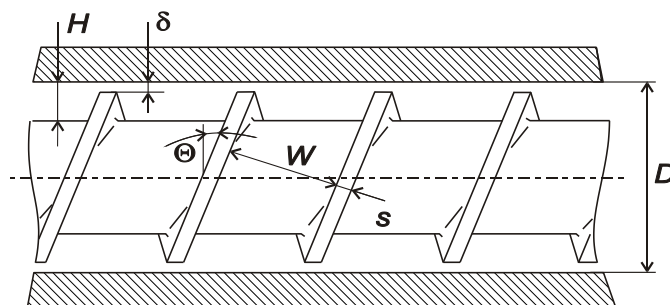


Рис. 1. Схема винтового канала экструдера

При построении математических моделей используется принцип обращенного движения [1].

Проведем сравнение одномерных аналитических моделей изотермического течения ньютоновской жидкости в каналах, представленных на рис. 2 а и 2 б. Рассмотрим только продольное течение жидкости в соответствующих каналах. Будем считать, что в плоской и осесимметричной моделях $V_{x0}=0$, а угловая скорость определяется по формуле $\omega_0=V_{\varphi 0}/R_2$.

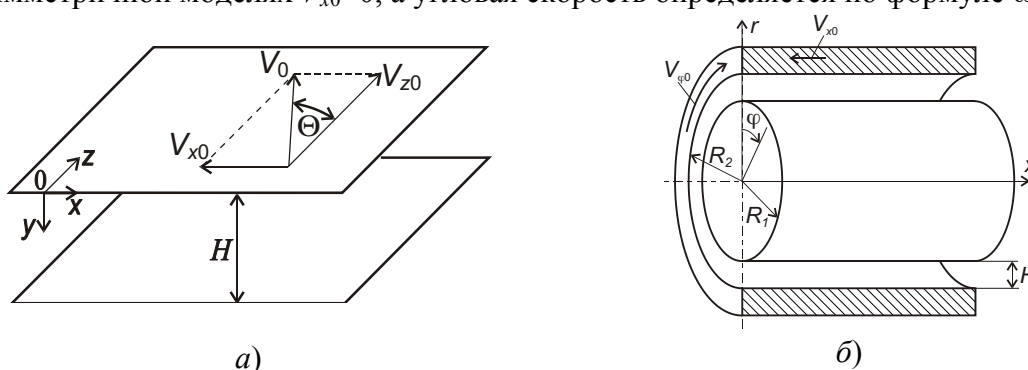


Рис. 2. Схемы моделей винтового канала экструдера

Для плоской модели аналитическим решением уравнения движения будет следующее выражение [1]

$$\frac{V_z}{V_{z0}} = \xi - 3\xi(1 - \xi) \frac{H^2}{6\mu V_{z0}} \frac{dP}{dz}, \quad (1)$$

где V_z – продольная составляющая скорости движения; $V_{z0}=V_0\cos\Theta$; P – давление; $\xi=y/H$; H – высота канала; μ – вязкость.

Объемный расход определяется по формуле

$$Q_{P_3}^{Пл1} = Q_{Вн}^{Пл1} + Q_{Нп}^{Пл1} = \frac{V_{z0}HW}{2} + \frac{H^3W}{12\mu} \left(-\frac{dP}{dz} \right), \quad (2)$$

где $Q_{Вн}^{Пл1}$ – вынужденная составляющая; $Q_{Нп}^{Пл1}$ – напорная составляющая.

Для осесимметричной модели (рис. 2 б) профиль скоростей определится по следующей формуле [2]

$$\Omega = \frac{\xi^2 - a^2}{\xi^2(1-a^2)} - \frac{1}{\alpha} \left[\frac{a^2(1-\xi^2)}{\xi^2(1-a^2)} \ln a - \ln \xi \right]. \quad (3)$$

$$\text{где } \xi = \frac{r}{R_2}; \quad \xi = \frac{r - R_1}{R_2 - R_1}; \quad a = \frac{R_1}{R_2}; \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_0}; \quad \alpha = \omega_0 \left(\frac{2\mu}{dP/d\varphi} \right).$$

Расход жидкости в кольцевом зазоре вычисляется по формуле

$$Q_{P_3}^{Ос1} = W \int_{R_1}^{R_2} \omega(r) r dr = W \int_{R_1}^{R_2} V_\varphi(r) dr, \quad (4)$$

где $V_\varphi = r\omega$ – окружная скорость.

Интегрирования выражения (4) дает

$$Q_{P_3}^{Ос1} = Q_{Вн}^{Ос1} + Q_{Нп}^{Ос1} = \left(\frac{1}{2} + \frac{a^2}{1-a^2} \ln a \right) \omega_0 R_2^2 W + \\ + \left(\frac{1-a^2}{4} - \frac{a^2 (\ln a)^2}{1-a^2} \right) \left[\frac{R_2^2 W}{2\mu} \left(-\frac{dP}{d\varphi} \right) \right]. \quad (5)$$

Градиент давления по окружной координате определяется по формуле

$$\frac{dP}{d\varphi} = \frac{R_1 + R_2}{2} \frac{dP}{dz}. \quad (6)$$

Сравнение плоской и осесимметричной аналитических моделей течения ньютоновской жидкости проведем для следующих исходных данных: внутренний диаметр цилиндра – 63,5 мм ($R_2=31,75$ мм); ширина канала – $W=54$ мм; линейная скорость $V_{z0}=V_{\varphi 0}=0,127$ м/с; угловая скорость вращения внешнего цилиндра $\omega_0=V_{\varphi 0}/R_2=3,99$ рад/с; плотность материала $\rho=810$ кг/м³; вязкость расплава полимера $\mu=15260$ Па·с.

В табл. 1 приведены варьируемые параметры. Изменение H в осесимметричной модели осуществляется путем изменения R_1 при неизменном значении радиуса R_2 .

Таблица 1. Варьируемые параметры

H , мм	$a = R_1/R_2$	H/W	W/H	$dP/dz \big _{Q_{P_3}^{Пл1}=0}$, МПа/м
9,525	0,7	0,176	5,67	127,9
6,350	0,8	0,118	8,50	287,9
3,175	0,9	0,059	17,0	1151,5

Результаты сравнения вынужденных составляющих расхода для плоской и осесимметричной моделям представлено в табл. 2. Из табл. 2 видно, что вынужденная составляющая расхода для осесимметричной модели получается больше вынужденной составляющей для плоской модели. При увеличении глубины канала H (при уменьшении параметра a) данное расхождение возрастает до 5%.

Таблица 2. Вынужденное течение

H , мм	a	$Q_{Вн}^{Пл1} \cdot 10^5$, м ³ /с	$Q_{Вн}^{Ос1} \cdot 10^5$, м ³ /с	$\frac{Q_{Вн}^{Ос1} - Q_{Вн}^{Пл1}}{Q_{Вн}^{Пл1}} \cdot 100, \%$
9,525	0,7	3,260	3,419	4,88
6,350	0,8	2,173	2,245	3,31
3,175	0,9	1,087	1,105	1,67

На рис. 3 построены эпюры скоростей в безразмерных координатах, а в табл. 3 приведены результаты вычисления расходов при течении под давлением при безразмерном градиенте давления $A = \frac{dP}{dz} / \frac{dP}{dz} \Big|_{Q_{\text{Пл}}^{\text{Пл}}=0} = 0,5$. Из рис. 3 видно, что зависимости скорости, построенные

по осесимметричной модели, отличаются от параболического профиля плоской модели тем больше, чем меньше величина a .

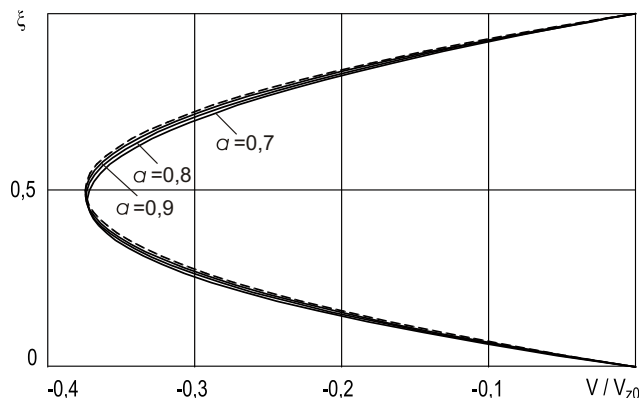


Рис. 3. Профили скоростей при напорном течении по высоте канала в безразмерных координатах при: — плоская модель; — осесимметричная модель

Таблица 3. Течение под давлением

$H, \text{мм}$	a	$Q_{\text{Нп}}^{\text{Ос1}} \cdot 10^7, \text{м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{Нп}}^{\text{Пл1}} \cdot 10^7, \text{м}^3/\text{с}$	$\frac{Q_{\text{Нп}}^{\text{Ос1}} - Q_{\text{Нп}}^{\text{Пл1}}}{Q_{\text{Нп}}^{\text{Пл1}}} \cdot 100, \%$
9,525	0,7	-162,32	-163,00	-0,42
6,350	0,8	-108,49	-108,67	-0,17
3,175	0,9	-54,32	-54,34	-0,04

Введем обозначение $B = Q_{\text{Пл}} / Q_{\text{Нп}}^{\text{Пл1}}$ и построим кривые B в зависимости от безразмерного градиента давления A для режима заданного давления (рис. 4). Из рис. 4 видно, что для осесимметричной модели при увеличении кривизны канала в заданном диапазоне разница с плоской моделью растет незначительно.

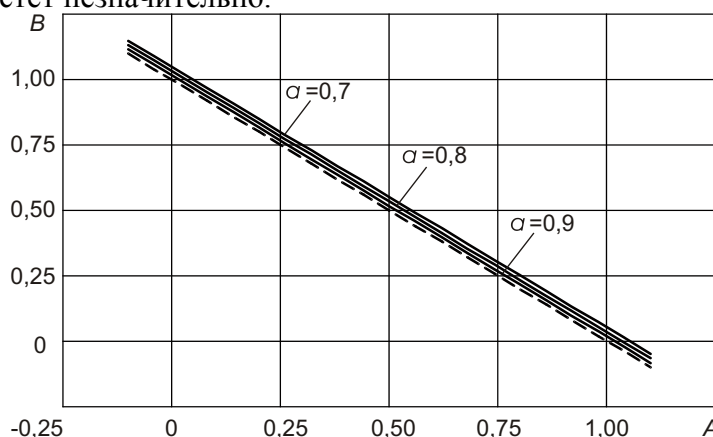


Рис. 4. Изменение безразмерного результирующего расхода от безразмерного градиента давления — — — плоская модель; — — — осесимметричная модель

Таким образом, представленные результаты показывают, что в указанном диапазоне изменения геометрического параметра a плоская модель достаточно хорошо описывает изотермическое течение ньютоновской жидкости в винтовых каналах экструдера.

Список литературы

1. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1984. 628 с.
2. Янков В.И., Первадчук В.П., Боярченко В.И. Процессы переработки волокнообразующих полимеров (методы расчета). М.: Химия, 1989, 320 с.

АННОТАЦИИ
ABSTRACTSБ.Н. Иванов, В.С. Минкин, К.Г. Николаев, В.С. Желтухин,
Р.Х. ШагимуллинГНОСЕОЛОГИЧЕСКИЕ КОРНИ РАЦИОНАЛЬНОЙ
МЕТОДОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ*Ключевые слова: методология, терминология, электрестность, закон сохранения, вещественно-волновая природа, строение вещества.**Любое серьезное исследование базируется на соответствующей методологии. Глубина, границы применения и ценность последней определяются её гносеологическими корнями.*B.N. Ivanov, V.S. Minkin, K.G. Nikolaev, V.S. Zheltyhin,
R.Kh. ShagimullinEPISTEMOLOGICAL BASES OF THE RATIONAL
METHODOLOGY OF ELECTRICAL MATERIALS
STUDY*Keywords: methodology, terminology, electratest conservation law, material-wave nature, the structure of matter.**Any serious research is based on the appropriate methodology. The depth, boundaries of application and the value of the latter are determined by its epistemological bases.*

В.Д. Петелина

О ПОСТРОЕНИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВОЗМУЩЕННОГО
ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА*Ключевые слова: система дифференциальных уравнений возмущенного движения тела, регуляризирующая независимая переменная, возмущение, многочлен, приближение.**Статья посвящена определению возмущений 2-го и более высоких порядков от Луны в прямоугольных координатах и составляющих скорости движения космического аппарата. Строится специальная система дифференциальных уравнений возмущенного движения, правые части этой системы представляются конечными многочленами относительно независимой регуляризирующей переменной. Это позволяет построить единый алгоритм для определения возмущений 2-го и более высоких порядков в виде конечных многочленов относительно некоторых регуляризирующих переменных, которые выбираются на каждом этапе приближения.*

V.D. Petelina

ABOUT CREATION OF A SPECIAL SYSTEM OF
DIFFERENTIAL EQUATIONS OF PERTURBED
MOVEMENT OF A SPACECRAFT*Keywords: system of differential equations of perturbed movement, regularizing an independent variable, perturbation, polynomial, approximation.**This paper is devoted to the definition of second-order and higher-order perturbations from the Moon in rectangular coordinates and components of speed of movement of the spacecraft. A special system of differential equations of the perturbed motion is constructed, the right-hand sides of this system are represented by finite polynomials with respect to an independent regularizing variable. This allows us to construct a single algorithm for determining second-order and higher-order perturbations in the form of finite polynomials with respect to some regularizing variables that are chosen at each approximation step.*

А.Ш. Султанов

О ПЛОСКО-РАДИАЛЬНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ К
СКВАЖИНЕ В ПЛАСТЕ*Ключевые слова: возмущение давления, скорость фильтрации, функции Бесселя, Макдональда, преобразование Лапласа.**В работе исследуется неустановившийся плоско-радиальный поток жидкости к скважине в пласте бесконечной протяженности, не имеющем внешней границы. В условиях такого потока давление в любой точке зависит только от радиуса r и от времени t . Получены аналитические выражения скорости фильтрации $u(t)$ через стенку скважины радиуса a и возмущения суммарного давления $p(t)$ на границе скважины.*

A.Sh. Sultanov

ABOUT RADIAL TWO-DIMENSIONAL FLUID FLOW
MOVING TO THE WELL DRILLED IN RESERVOIR*Keywords: pressure disturbance, Bessel's function, Macdonald function, Laplace transformation.**This investigation deals with unstable radial two-dimensional fluid flow moving to the well drilled in the reservoir of the infinite extension without the external boundaries. Under such flow conditions the pressure depends only on radius – “ r ” and on time – “ t ” at any point of the flow. We obtained the analytical formulas of the filtration rate $u(t)$ through the wall of the borehole of the a -radius, and the total pressure $p(t)$ disturbance at the boundary of the well.*Ю.В. Швец, Н.В. Миллер, Н.И. Попова, И.А. Трефилова
УТОЧНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО НЕРАВЕНСТВА ДЛЯ ОДНОЙ
НЕПОЛНОЙ ФУНКЦИИ*Ключевые слова: несобственный интеграл первого рода, гамма-функция, степенные оценки, интегральные неравенства, неулучшаемые оценки, неполная гамма-функция.**В работе изучается несобственный интеграл первого рода с переменным нижним пределом*

$$S(x, p) = \frac{P}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_x^\infty e^{-t^{2p}} dt, \text{ где}$$

 *$\Gamma(k)$ — гамма-функция Эйлера, $p \in \mathbb{N}$. Ранее было показано [1], что для любого $x \in \mathbb{R}$ и $m \in [1; \sqrt[2p]{3}]$ выполняется интегральное неравенство $S^3(x, p) < S(mx, p)$. В данной статье установлено, что границы для параметра m в этом неравенстве являются неулучшаемыми.*Y.V. Shvets, N.V. Miller, N.I. Popova, I.A. Trefilova
REFINEMENT OF INTEGRAL INEQUALITY FOR ONE
INCOMPLETE FUNCTION*Keywords: improper integral of the first kind, gamma function, degree evaluations, integral inequalities, unimprovable estimates, incomplete gamma function. The paper deals with the improper integral of the first kind with variable lower limit*

$$S(x, p) = \frac{P}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} \int_x^\infty e^{-t^{2p}} dt,$$

 *$\Gamma(k)$ — Euler gamma function, $p \in \mathbb{N}$. It was formerly stated that for $x \in \mathbb{R}$ and $m \in [1; \sqrt[2p]{3}]$ integral inequality $S^3(x, p) < S(mx, p)$ is done. It was ascertained in this article that the limits for parameter m in this inequality are unimprovable.*А.Е. Филатова, В.Ю. Долуда, В.Г. Матвеева, Э.М. Сульман
ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ГИДРИРОВАНИЯ
НИТРОБЕНЗОЛА ДО АНИЛИНА В ПРИСУТСТВИИ Ru-
СОДЕРЖАЩЕГО КАТАЛИЗАТОРА*Ключевые слова: нитробензол, анилин, каталитическое*A.E. Filatova, V.Yu. Doluda, V.G. Matveeva, E.M. Sulman
RESEARCH CATALYTIC HYDRATION OF
NITROBENZENE TO ANILINE IN THE PRESENCE OF
Ru-CONTAINING CATALYSTS*Keywords: nitrobenzene, aniline, catalytic hydrogenation,*

гидрирование, гетерогенный катализ, кинетическая модель.

В данной работе представлены результаты исследования процесса каталитического гидрирования нитробензола до анилина в присутствии Ru-содержащих гетерогенных катализаторов. Подобраны оптимальные параметры процесса. Предложена адекватная кинетическая модель реакции.

В.В. Харьков, А.Н. Николаев

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ РЕАКЦИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ

Ключевые слова: термолабильность, кинетическая кривая, вихревая камера.

Проводится анализ факторов, таких как технологические характеристики процесса концентрирования и физико-химические свойства материалов, определяющих необратимые изменения их химического строения при изменении температуры. Рассматриваются подходы к квантово-химическому расчету свойств молекулярных систем, их реактивной активности. Предлагается проводить процесс обезвреживания термолабильных жидкостей во взвешенном слое в вихревой камере с тангенциально-лопаточным завихрителем газа.

Е.И. Шиманская, Э.М. Сульман, В.П. Молчанов

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ГИДРОГЕНОЛИЗА ЛИГНИНА С ПОЛУЧЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ БИОТОПЛИВ В ПРИСУТСТВИИ Pd И Ru-СОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИЗАТОРОВ

Ключевые слова: лигнин, гидрогенолиз, сверхсшитый полистирол, биотопливо.

В данной работе представлены результаты исследования процесса каталитического гидрогенолиза лигнина в присутствии Pd- и Ru-содержащих гетерогенных катализаторов. Подобраны оптимальные параметры процесса.

В.И. Ампилов, Д.А. Степанисчева

МЕТОД КОНСТРУИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ КАРКАСНО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОБВОДОВ

Ключевые слова: каркас, поверхность, аппроксимация, компьютерная модель.

В статье предложена модификация метода аэродинамического контура, которая позволяет существенно расширить область его применения. Приводится сравнительный анализ различных методов аппроксимации параметров управления формой, даются необходимые рекомендации.

С.М. Белобородов, М.Л. Цельмер

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИЕЙ ПРИ СБОРКЕ РОТОРОВ

Ключевые слова: центробежный компрессор, ротор, уравнивающая сборка, информационное сопровождение изделий, балансировка, динамическая устойчивость.

В данной статье обоснована актуальность и рассматриваются условия разработки методики уравнивающей сборки роторов, с управлением векторами локальных дисбалансов и эксцентриситетов. Разработана и изложена методика уравнивающей информационно обеспеченной сборки роторов. Методика позволяет решить практические противоречия высокой точности сборки и изготовления со снижением трудоемкости и себестоимости производства.

С.М. Белобородов, М.Л. Цельмер, С.Д. Дубина, Е.В. Мехоношина МИНИМИЗАЦИЯ ВНЕШНЕГО ДИСБАЛАНСИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИНАМИКУ ГИБКОГО РОТОРА

Ключевые слова: ротор, вибрация, дисбаланс, сборка.

Проведен анализ результатов исследований и расчетов. Полученные результаты позволяют подтвердить заявленный уровень эксплуатационной надежности за счет минимизации влияния внешнего дисбалансирующего воздействия. На основании исследований разработан показатель виброустойчивости валопровода.

heterogeneous catalysis, kinetic model.

This paper presents the results of a study of the process of catalytic hydrogenation of nitrobenzene to aniline in the presence of Ru-containing heterogeneous catalysts. Optimum parameters of the process are selected. An adequate kinetic model of the reaction is proposed.

V.V. Kharkov, A.N. Nikolaev

KINETICS HIGHLIGHTS OF THERMAL DECOMPOSITION DURING MATERIALS CONCENTRATION IN SUSPENDED DROP LAYER

Keywords: thermal sensitivity, kinetic curve, vortex chamber.

The paper represents an analysis of the factors causing irreversible changes in the material chemical structure under changes of temperature, such as technology parameters of concentration and physicochemical characteristics of the material. Approaches to quantum chemical calculations of the properties and reactivity of the molecular systems are studied. Using of a vortex chamber with tangent blade diffuser for concentration of thermolabile liquids in the suspended drop layer is offered.

E.I. Shimanskaya, E.M. Sulman, V.P. Molchanov STUDY ON CATALYTIC HYDROGENOLYSIS OF LIGNIN WITH BIOFUELS OBTAINING IN THE PRESENCE OF Pd AND Ru-CONTAINING CATALYSTS

Keywords: lignin, hydrogenolysis, supersewn polystyrene, biofuels.

This paper presents the results of a study of the process of catalytic hydrogenolysis of lignin in the presence of Pd - and Ru-containing heterogeneous catalysts. The optimum process parameters were chosen.

V.I. Ampilov, D.A. Stepanishcheva

METHOD OF CONSTRUCTING COMPLEX FRAMING AND KINEMATIC CONTOURS

Keywords: carcass, surface, approximation, computer model.

The article proposes modification of the aerodynamic contour method, which allows significantly expansion for its field of application. Comparative analysis of various methods for the shape control parameters approximation is given. Necessary recommendations are provided.

S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer

THE TASK OF INFORMATION MANAGEMENT IN THE ASSEMBLY OF ROTORS

Keywords: centrifugal compressor, rotor, balancing assembly, information support of the products, balancing, dynamic stability.

In this article the urgency and the conditions are developing methods of balancing rotors assembly, control of the vectors of local imbalances and eccentricities. Developed and sets out the methodology for balancing the information provided rotors assembly. The technique allows solving a practical contradiction to high precision assembly and fabrication to reduce the complexity and cost of production.

S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer, S.D. Dubina, E.V. Mekhonoshina

MINIMIZING EXTERNAL DISBALANCING IMPACT ON THE DYNAMICS OF FLEXIBLE ROTOR

Keywords: rotor, vibration, disbalance, assembly.

The mathematical modeling of the dynamic state of the rotor, experimental studies of the dynamic state and dynamic calculation of critical speeds of shafting. Analyzed research results and calculations. The obtained results allow providing the stated level of operational reliability by

С.М. Белобородов, М.Л. Цельмер, С.В. Жданов, Л.Н. Бутымова
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ВАЛОПРОВОДА

Ключевые слова: ротор, вибрация, дисбаланс, сборка.

Проведено экспериментальное исследование влияния на динамическое состояние валопровода следующих факторов: монтажные дисбалансы привода, пусковой режим работы агрегата, превышение рабочего диапазона, изменение перекоса валов. Определены закономерности влияния этих факторов. Сформулированы рекомендации по минимизации их влияния на динамически устойчивую работу валопровода.

С.М. Белобородов, М.Л. Цельмер, В.Я. Модорский
АНАЛИЗ И МИНИМИЗАЦИЯ АВАРИЙНОЙ
ВИБРОАКТИВНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РОТОРОВ

Ключевые слова: ротор, вибрация, дисбаланс, сборка.

Проведен анализ аварийной виброактивности ротора. Определены причины виброактивности высокоскоростных роторов. Сформулированы рекомендации по минимизации ее влияния на устойчивую работу за счет резерва динамической устойчивости валопровода.

Л.В. Беляев, А.В. Жданов
ПОРИСТОСТЬ ОБЪЕМНЫХ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ
СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВ
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Ключевые слова: селективное лазерное спекание, твердость, пористость, плотность, нержавеющая сталь.

В статье приводятся экспериментальные данные о параметрах качества объемных деталей из нержавеющей стали, полученных методом селективного лазерного спекания. Даны результаты измерения твердости пористости, плотности для различных значений положения фокальной точки при технологическом процессе спекания объемных деталей. Определено оптимальное значение фокусного расстояния равно +2 мкм.

М.Г. Маликов, Л.В. Беляев, А.В. Жданов
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА
СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Ключевые слова: стрелочный перевод, электромеханический привод, ролик-винтовой механизм.

В статье рассмотрены конструкции существующих электроприводов стрелочных переводов, приведена их классификация. Проанализированы их преимущества и недостатки. Предложена конструкция электромеханического привода стрелочного перевода для высокоскоростных железнодорожных магистралей на базе асинхронного электродвигателя и ролик-винтового механизма.

В.И. Митряйкин, И.Н. Сидоров, Е.В. Кротова, Т.А. Зайцева
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЧНОСТИ ЛОПАСТИ ВИНТА ВЕРТОЛЕТА С УДАРНЫМИ
ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

Ключевые слова: композитная лопасть несущего винта вертолета, рентгеновский компьютерный томограф, ударные повреждения, теория предельного равновесия, метод вариации упругих постоянных.

В статье представлены результаты исследования на рентгеновском компьютерном томографе повреждений возникающих в лопасти несущего винта вертолета "Ансат" при ударных воздействиях. Анализ полученных томограмм позволил определить размеры повреждений. Приведены результаты расчета напряженно-деформированного и предельного состояния лопасти при различных режимах полета с учетом повреждения лопасти в комлевом сечении.

Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова, А.А. Грехов
АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ

minimizing the influence of external disbalancing impact.

S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer, S.V. Zhdanov, L.N. Butymova
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHAFTING
DYNAMIC STATUS

Keywords: rotor, vibration, disbalance, assembly.

There is carried out experimental investigation of mentioned below factors affecting upon shafting dynamic status: drive assembly disbalance, starting conditions of unit operation, operating range excess, shafts' misalignment correction. There are specified mechanisms of these factors influence. There are defined proposals to minimize those effects upon shafting dynamic stability.

S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer, V.Ya. Modorskii
ANALYSIS AND MINIMIZATION OF HIGH-SPEED
ROTOR ABNORMAL VIBRATION

Keywords: rotor, vibration, disbalance, assembly.

There is analyzed rotor's abnormal vibration. There are revealed causes of high-speed rotors' vibration. There are specified recommendations on minimization of its effect on reliable operation due to reserve of shafting dynamic stability.

L.V. Belyaev, A.V. Zhdanov
POROSITY OF THREE-DIMENSIONAL SAMPLES
OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING OF
STAINLESS STEEL POWDERS

Keywords: selective laser sintering, hardness, porosity, density, stainless steel.

The article presents experimental data about the quality parameters of the stainless steel three-dimensional parts obtained by the selective laser sintering procedure. The results of the porosity hardness measurement and density for different values of the focal point position during the engineering process of the three-dimensional parts sintering were given. The optimal determined value of the focal length is 2 μm .

M.G. Malikov, L.V. Belyaev, A.V. Zhdanov
DEVELOPMENT OF ELECTROMECHANICAL DRIVE
OF RAILROAD SWITCH FOR HIGH-SPEED
RAILWAYS

Keywords: railroad switch, electromechanical drive, roller screw mechanism.

The constructions of existing electric drives of railroad switch are considered in the article, and their classification is given. Their advantages and disadvantages are analyzed. The design of an electromechanical railroad switch for high-speed railways based on asynchronous electric motor and roller-screw mechanism is proposed.

V.I. Mitryaikin, I.N. Sidorov, E.V. Krotova, T.A. Zaytseva
DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS
OF THE HARDENING STRENGTH OF A HELICOPTER
SCREW WITH IMPAIRED DAMAGES

Keywords: helicopter main rotor composite blade, X-ray computer tomograph, shock injuries, limit equilibrium theory, elastic constants variation method.

The article presents the results of the X-ray computer tomograph investigation of damages of the Ansat helicopter in the main rotor blades under shock impacts. The analysis of the obtained tomograms made it possible to determine the dimensions of the lesions. The results of calculating the stress-strain and limiting state of the blade are given for various flight calculations, taking into account damage to the blade in the sectional area.

E.V. Poyarkova, L.S. Dinmukhametova, A.A. Grekhov
THE ANALYSIS OF THE INFORMATIONAL DIAGNO-

ПАРАМЕТРОВ ПРИ МАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Ключевые слова: магнитный неразрушающий контроль, напряженность магнитного поля, малоцикловая усталость, диагностика, комбинированные сварные элементы.

В работе представлены результаты анализа изменения показателей напряженности магнитного поля в различных точках комбинированных сварных соединений сталей 09Г2ФБ и 17Г1СУ в зависимости от степени накопления малоцикловой усталостной повреждаемости. Показано, что при диагностике разнородных сварных соединений недопустимо использование известных ранее закономерностей для оценки напряженно-деформированного состояния и степени усталости материала по изменению магнитных свойств. Обоснована возможность идентификации зоны предразрушения в конкретных линейных областях разнородных сварных элементов по результатам анализа изменения анизотропии напряженности магнитного поля с увеличением уровня накопления повреждений.

И.М. Пышный

ВЫБОР ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ БАНДАЖА ИСХОДЯ ИЗ КРИТЕРИЯ МАКСИМАЛЬНОГО РЕСУРСА ПО ПРОКАТУ

Ключевые слова: промышленные локомотивы, колесные пары, прокат, износ бандажей, повышение ресурса.

В статье приводится сравнительный анализ изнашивания бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 промышленного предприятия ЗАО «Железнодорожник» на основе методов теории вероятности и математической статистики исходя из критерия максимального ресурса бандажей колесных пар до обточки.

И.М. Пышный, А.Е. Саланов

ВЫБОР ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ БАНДАЖА ИСХОДЯ ИЗ КРИТЕРИЯ МАКСИМАЛЬНОГО РЕСУРСА ПО ИЗНОСУ ГРЕБНЯ

Ключевые слова: промышленные локомотивы, колесные пары, износ гребня бандажа, повышение ресурса.

В статье приводится сравнительный анализ изнашивания бандажей колесных пар тепловозов ТГМ4 и ТГМ23 промышленного предприятия ЗАО «Железнодорожник» на основе методов теории вероятности и математической статистики исходя из критерия максимального ресурса бандажей колесных пар до обточки.

И.Н. Фролова, А.А. Сарбаев, И.О. Пантелеев, С.К. Сахаровский ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ НА ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Ключевые слова: программный модуль, САПР ТП, технологическая система, средства технологического оснащения, обнаружение столкновений, формообразование.

В работе изложено описание программного модуля выбора коротежей средств технологического оснащения для представленной технологической системы. Подробно разобрана работа алгоритма обнаружения столкновений для проверки на возможность формообразования заданных поверхностей. Продемонстрировано формирование полного и неполного множества возможных решений выбора коротежей средств технологического оснащения.

И.М. Щигарцов, А.Т. Кулаков, Е.П. Барыльникова
ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМОВ
ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ЭНЕРГООБМЕНА
Ключевые слова: поршневой двигатель, эффективные показатели работы, коэффициент преобразования энергии, показатель политропы.

STIC PARAMETERS FOR MAGNETIC CONTROL OF COMBINED WELDED ELEMENTS OF METAL CONST-RUCTIONS MADE FROM LOW-ALLOYED STEELS

Keywords: magnetic nondestructive testing, magnetic field strength, low cycle fatigue, diagnostics, combined welded elements.

This paper presents the results of an analysis of the changes in the magnetic field strengths at various points in the combined welded joints of 09G2FB and 17G1SU steels, depending on the degree of low-cycle fatigue damage accumulation. It is shown that in the diagnostics of dissimilar welded joints it is inadmissible to use the previously known regularities for estimating the stress-strain state and the degree of fatigue of the material from the change in magnetic properties. The possibility of identifying the pre-destruction zone in dissimilar welded elements is based on the analysis of the change in the anisotropy of the magnetic field strength as the damage is accumulated in specific linear regions is substantiated.

I.M. Pyshny

SELECTION OF THE SURFACE PROTECTION SURFACE OF THE BANDAGE BASED ON THE CRITERIA OF THE MAXIMUM RESOURCE ROLLED

Keywords: industrial locomotives, wheel pairs, prokat, wear of tires, increase of resource.

The article gives a comparative analysis of wear of tires of diesel locomotives TGM4 and TGM23 of the industrial enterprise ZAO "Zheleznodorozhnik" on the basis of methods of probability theory and mathematical statistics proceeding from the criterion of the maximum service life of wheel sets before turning.

I.M. Pyshny, A.E. Salanov

SELECTING THE PROFILE OF THE SURFACE OF THE SKINING OF THE BANDAGE ACCORDING TO THE CRITERIA OF THE MAXIMUM RESOURCE FOR THE WEAR OF RIDGE

Keywords: industrial locomotives, wheel pairs, roller wear, wear of tires, increase of resource.

The article gives a comparative analysis of wear of tires of diesel locomotives TGM4 and TGM23 of the industrial enterprise ZAO "Zheleznodorozhnik" on the basis of methods of probability theory and mathematical statistics proceeding from the criterion of the maximum service life of wheel sets before turning.

I.N. Frolova, A.A. Sarbaev, I.O. Panteleev, S.K. Sakharovsky

THE APPLICATION OF THE COLLISION DETECTION ALGORITHM TO SELECT THE MEANS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR THE MACHINING OPERATION

Keywords: software module, CAPP system, technological system, technological equipment, the collision detection, shaping.

The article deals with the description of the software module for selecting tuples of the means of technological equipment for shown technological system. The work of the collision detection algorithm has been analyzed in detail to test the possibility of shaping the given surfaces. It demonstrates the formation of a complete and incomplete set of possible solutions for the selection of tuples of technological equipment.

I.M. Shchigartsov, A.T. Kulakov, E.P. Barylnikova
INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF
MECHANISMS OF PISTON ENGINES ON THE
PROCESSES OF ENERGY EXCHANGE
Keywords: piston engine, effective performance, energy conversion factor, polytropic index.

В работе рассматриваются проблемы эффективности термодинамических процессов расширения газов в поршневых двигателях в зависимости от кинематических характеристик механизмов и условий теплообмена рабочих газов с окружающей средой. Проведен сравнительный анализ уравнений расширения рабочих газов в цилиндрах двигателей в различных фазах процесса. Предложены критерии оценки принимаемых конструктивных решений.

Р.Н. Голых, В.Н. Хмельев, А.В. Шалунов, Г.А. Боброва, В.А.

Нестеров, Г.А. Титов, Р.С. Доровских
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ
ОБЛАСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МАКСИМАЛЬНО ЭФФЕКТИВНОЕ
ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, вязкость, неньютоновские жидкости.

В статье представлена феноменологическая модель формирования кавитационной области в жидких средах. Анализ модели позволил установить оптимальные интенсивности воздействия, обеспечивающие максимальную эффективность изменения свойств веществ и материалов.

В.В. Корепанов

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАСТИН С
ДЕФЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Ключевые слова: композиционные материалы, дефекты, расслоение, численное моделирование.

В работе исследуется многослойная пластина из равнопрочного углепластика, с толщиной каждого слоя 0.2 мм. Рассмотрены различные варианты статического нагружения пластины. Для каждого вида нагружения проводился численный расчет напряженно-деформированного состояния без учета и с учетом дефектов в виде расслоений. При моделировании дефекта рассматривалась модель расслоения с учетом контактного взаимодействия.

И.В. Нелин, Д.А. Охотников

РАДИОСИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ

Ключевые слова: сверхширокополосные радиосистемы, пульсовая волна, измерение дыхания и сердцебиения.

Современные радиосистемы стремительно расширяют частотную полосу своих сигналов, что позволяет создавать системы с большей разрешающей способностью, а значит, предметы для радионаблюдения могут быть достаточно небольшого размера – соизмеримыми с телом человека. Широкое распространение в медицинской области начинают приобретать сверхширокополосные (СШП) радиосистемы. В статье рассмотрены области применения современных малогабаритных медицинских радиосистем.

А.А. Талипов, К.С. Мельник

СПЕЦИФИКА ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН,
ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ОДНО- И
ДВУХФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ

Ключевые слова: фотонно-кристаллическое волокно, фотон, специальные условия синхронизма.

Фотонно-кристаллические волокна являются перспективной средой для генерации сигнального и холостого фотонов с низкими спектральными корреляциями. В работе рассмотрены и проанализированы особенности таких микроструктурированных волокон, а также определены основные условия генерации однофотонных состояний в источниках с использованием нелинейных волокон.

В.Н. Хмельев, Р.Н. Голых, В.В. Педдер, А.В. Шалунов, В.А.

Нестеров, Г.А. Боброва, Р.С. Доровских, В.А. Шакура
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСТРАЦИИ РАНЕВОГО СОДЕРЖИМОГО
НА БАЗЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЖИМОВ И

In this paper, problems of the effectiveness of thermodynamic processes of gas expansion in piston engines are considered, depending on the kinematic characteristics of the mechanisms and conditions for heat exchange of working gases with the environment. A comparative analysis of the equations of expansion of working gases in engine cylinders in different phases of the process is carried out. The criteria for the evaluation of constructive decisions are proposed.

R.N. Golykh, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, G.A.

Bobrova, V.A. Nesterov, G.A. Titov, R.S. Dorovskikh
MODELING OF FORMATION OF CAVITATION AREA
FOR DETERMINING INFLUENCE MODES
PROVIDING MAXIMUM EFFICIENCY OF
CHANGING OF SUBSTANCES AND MATERIALS
PROPERTIES

Keywords: ultrasonic, cavitation, viscosity, non-newtonian liquids.

The paper presents phenomenological modes of cavitation area formation in liquids. Analysis of model allows to evaluate optimum influence intensities providing maximum efficiency of changing of substances and materials properties.

V.V. Korepanov

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF
MULTILAYERED COMPOSITE PLATES WITH
DEFECTS UNDER STATIC LOADING

Keywords: composite materials, defects, delamination, numerical simulation.

In the paper, a multilayered plate of an equally resistant carbon fiber reinforced plastic was considered, with a thickness of each layer equal to 0.2 mm. Various static loading cases are studied. For each type of loading, a numerical calculation of the stress-strain state was performed for healthy and delaminated plates. Contact interaction between adjacent surfaces in the zone of delamination was taken into account.

I.V. Nelin, D.A. Okhotnikov

RADIO SYSTEMS IN MEDICINE

Keywords: ultra-wideband radio systems, pulse wave, measurement of respiration and palpitation.

Modern radio systems are rapidly expanding the frequency band of their signals, which makes it possible to create systems with greater resolution, which means that subjects for radio monitoring can be quite small - commensurate with the human body. Wide use in the medical field is beginning to acquire ultra-wideband (UWB) radio systems. In the article the areas of application of modern small-sized medical radio systems are considered.

A.A. Talipov, K.S. Melnik

SPECIFICITY OF PHOTONIC CRYSTAL FIBERS
USED IN PHOTON PAIRS GENERATION

Keywords: photonic crystal fibers, photon, special matching conditions.

Photonic crystal fibers are a perspective medium for the generation of signal and idler photons with low spectral correlations. In this paper, the features of such microstructured fibers are considered and analyzed, also the main conditions for the single-photon states generation in sources with nonlinear fibers are determined.

V.N. Khmelev, R.N. Golykh, V.V. Pedder, A.V. Shalunov,

V.A. Nesterov, G.A. Bobrova, R.S. Dorovskikh, V.A. Shakura

PROVIDING OF REQUIRED RATE OF ULTRASONIC
EXTRACTION OF WOUND CONTENTS BY

УСЛОВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Ключевые слова: ультразвук, раневая инфекция, расклинивающее давление, капиллярный эффект.

В работе представлены результаты теоретических исследований обратного ультразвукового капиллярного эффекта, предназначенного для экстракции раневого содержимого из послеоперационных ран. Проведённые исследования позволили установить, что для обеспечения наибольшей скорости экстракции и безопасности для человека амплитуда ультразвуковых колебаний не должна превышать 90 мкм.

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Р.С. Доровских, Р.Н. Голых

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВТОРОСТЕПЕННЫХ МОД КОЛЕБАНИЙ НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Ключевые слова: ультразвуковой дисковый излучатель, коагуляция, пеногашение, мода колебаний, равномерность распределения.

Статья посвящена исследованию влияния второстепенных мод колебаний на равномерность распределения рабочей кольцевой моды ультразвуковых дисковых излучателей. В статье рассматриваются методы, позволяющие уменьшить количество вторичных мод колебаний в исследуемом диапазоне частот, которые могут оказать влияние на равномерность распределения колебаний кольцевой моды при наложении их друг на друга.

Р.В. Цветков, В.В. Епин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЕКТОРНОМ ГИДРОНИВЕЛИРЕ

Ключевые слова: гидростатический нивелир, уровень жидкости, переходные процессы.

В работе представлены методика и результаты экспериментальных исследований переходных процессов в многосекторном гидронивелире. Проведено сравнение результатов экспериментов с численными расчетами на основе предложенной ранее модели. Показано, что модель позволяет удовлетворительно оценивать характер переходных процессов в многосекторных гидростатических нивелирах.

И.А. Акимов, В.Н. Абузаров

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ТРЕТЬЕМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С РАЗЛИЧНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Ключевые слова: ограждающие конструкции, полимеризация, нестационарная теплопроводность, математические модели теплообмена, многослойные конструкции.

В работе представлено математическое моделирование нестационарной теплопроводности в ограждающих конструкциях на этапе полной полимеризации.

И.А. Акимов, Е.О. Каракулина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ЭТАПЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Ключевые слова: композиционные материалы, метод изотермических поверхностей, многослойная конструкция, полимеризация, автоклав.

В данной работе представлены результаты изучения теплопередачи в многослойных композитных конструкциях с сотовым наполнителем на этапе стабилизации температуры при автоклавном формовании изделия.

Р.Г. Асадуллаев, В.В. Ломакин, Н.П. Путивцева, О.С. Резниченко, Ю.Ю. Белоконов

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ОЦЕНКИ ПРОЕКТНЫХ РИСКОВ ПРИ СОЗДАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СФЕРЫ ГОСУДАРСТВЕННЫХ УСЛУГ

Ключевые слова: информационная система, анализ риска, алгоритм

THEORETICAL EVALUATION OF INFLUENCE MODES AND CONDITIONS

Keywords: ultrasound, wound infection, disjoining pressure, capillary effect.

The work presents results of theoretical studies of converse ultrasonic capillary effect for extraction of wound contents from wounds after surgery. The studies evaluated that amplitude of ultrasonic oscillations should be more than 90 micron for maximum extraction rate and safety for human.

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SECONDARY MODES OF OSCILLATIONS ON THE UNIFORMITY OF THE DISTRIBUTION OF OSCILLATIONS OF ULTRASONIC DISK RADIATORS

Keywords: ultrasound disk radiators, coagulation, defoaming, oscillation mode, the uniformity of distribution. The article is devoted to investigation of the influence of secondary vibration modes in the uniformity of the working ring disk mode ultrasonic radiators. Article considers methods, allowing reduce quantity secondary mode in investigated frequency range, which can render influence on distribution fluctuations sought annular mode at imposition their friend on friend.

R.V. Tsvetkov, V.V. Epin

RESEARCH OF THE FLUID MOTION IN MULTISEGMENT HYDROSTATIC LEVEL

Keywords: hydrostatic level system, liquid level, transient process.

This paper presents the methodology and results of experimental studies of transient processes in a multisegment hydrostatic level. The results of the experiments are compared with numerical calculations based on the model proposed earlier. This model allows us to satisfactorily evaluate the nature of transients in multi-segment hydrostatic level.

I.A. Akimov, V.N. Abuzyarov

MATHEMATICAL MODELING OF NON-STATIONARY THERMAL CONDUCTIVITY IN THE THIRD STAGE OF PRODUCTION OF MULTILAYER STRUCTURES BY THE POLYMERIZATION METHOD WITH DIFFERENT THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENTS

Keywords: enclosing structures, polymerization, non-stationary thermal conductivity, mathematical models of heat transfer, multilayer structures.

The paper presents mathematical modeling of non-stationary thermal conductivity in enclosing structures during the full polymerization stage.

I.A. Akimov, E.O. Karakulina

MODELING OF THE HEAT TRANSMISSION PROCESS AT THE STAGE OF STABILIZATION OF TEMPERATURE IN THE MANUFACTURE OF COMPOSITE CONSTRUCTIONS WITH A CELLULAR FILLER

Keywords: composite materials, isothermal surface method, multilayer structure, polymerization, autoclave. This paper presents the results of the study of heat transfer in multilayer composite structures with a honeycomb core during the temperature stabilization phase during autoclave molding of the article.

R.G. Asadullaev, V.V. Lomakin, N.P. Putivzeva, O.S. Reznichenko, Y.Y. Belokon

DEVELOPING OF TOOLS FOR PROJECT RISKS ASSESSMENT DURING CREATION OF INFORMATION SYSTEM FOR PUBLIC SERVICES

Keywords: information system, risk analysis, risk

мониторинга риска, проектный риск.

В работе представлены результаты формального представления средств оценки рисков в процессе реализации проектов по разработке информационных систем. Разработан алгоритм мониторинга рисков на различных стадиях реализации проекта. Проведен теоретико-множественный анализ рисков и факторов, на основании которого разработаны средства оценки состояния как отдельно взятых типов проектных рисков, так и основных групп рисков.

Е.Н. Белоусова, Ф.С. Жафярова
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫМ ИМУЩЕСТВОМ

Ключевые слова: государственное имущество, федеральная собственность, система управления, органы исполнительной власти.

В работе рассмотрены проблемы управления государственным имуществом в Российской Федерации. Изложены способы устранения недостатков существующей на сегодняшний день информационной системы управления государственной собственностью. Приведены экономические эффекты, которые достигнуты в результате внедрения предложенных решений.

Д.В. Бережной, М.Р. Шамим, И.С. Балафендиева
ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КЛИНЧ-СОЕДИНЕНИЙ

Ключевые слова: упругопластическое деформирование, клинч-соединение, метод конечных элементов.

В работе дана постановка задачи упругопластического поведения трехмерных конструкций в рамках геометрически нелинейного подхода к описанию деформирования. Реализована конечно-элементная методика расчета контактного взаимодействия между элементами трехмерных конструкций с учетом трения в зоне контакта. На основе предложенной методики решена задача деформирования клинч-соединений в процессе их изготовления и эксплуатации. Даны практические рекомендации для выбора параметров нагружения в процессе создания клинч-соединений.

Д.В. Бережной, М.Р. Шамим, А.А. Саченков
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
МНОГОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ
НАГРУЖЕНИИ

Ключевые слова: многослойные оболочки, контактная задача, термосиловое нагружение, метод конечных элементов.

В настоящей работе в рамках геометрически нелинейного описания деформирования проводится расчет элемента обтекателя, представляющего собой многослойную оболочку из углепластика, при термосиловом нагружении. Исследуется влияние граничных условий, в том числе с учетом контактного взаимодействия оболочки с оснасткой, на процесс деформирования оболочки вплоть до момента потери устойчивости. Результаты показывают приемлемость применения предложенной методики для нелинейного расчета многослойных тонкостенных конструкций с учетом их контактного взаимодействия с оснасткой. Отмечено, что учет контактного взаимодействия может привести к принципиально иным результатам.

Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский
АНАЛИЗ РАБОТЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В
ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЯХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ
КОМПРЕССОРОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Ключевые слова: лабиринтные уплотнения, работа газодинамических сил, колебания ротора, развертка ЛУ ГПА, геометрические характеристики.

В уплотнениях лабиринтного типа рабочая среда герметизируется за счет дросселирования ее при движении в осевом направлении через последовательно расположенные сужения и расширения.

monitoring algorithm, project risk.

The paper presents the results of a formal presentation of risk assessment tools which arise in the process of implementation information systems development projects. The algorithm for monitoring risks at various stages of project implementation is developed. The set-theoretic analysis of risks and factors is carried out. Based on the results of the analysis, the tools for assessing the status of individual types of project risks and main risk groups is developed.

E.N. Belousova, F.S. Zhafyarova
PERFECTION OF INFORMATION SYSTEM OF STATE
PROPERTY MANAGEMENT

Keywords: state property, federal property, management system, executive authorities.

The paper considers the problems of state property management in the Russian Federation. The ways of eliminating the shortcomings of existing information system for managing state property are described. The economic effects that are achieved as a result of the implementation of the proposed solutions are presented.

D.V. Berezhnoi, M.R. Shamim, I.S. Balafendieva
CONSTRUCTION OF NUMERICAL METHODS FOR
CALCULATION OF CLINCH CONNECTIONS

Keywords: elastoplastic deformation, clinch connection, finite element method

The formulation of the problem of elastoplastic behavior of three-dimensional structures in the framework of a geometrically nonlinear approach to deformation description is given. A finite-element technique for calculating the contact interaction between the elements of three-dimensional structures is implemented, taking into account friction in the contact zone. On the basis of the proposed methodology, the problem of deformation of clinch joints in the process of their manufacture and operation is solved. Practical recommendations for the choice of loading parameters in the process of creation of clinch joints are given.

D.V. Berezhnoi, M.R. Shamim, A.A. Sachenkov
NUMERICAL MODELING OF THE DEFORMATION
OF A MULTILAYER SHELL WITH THERMAL FORCE
LOADING

Keywords: multilayer shell, contact problem, thermal force loading, finite element method

In the present work, based on a geometrically nonlinear deformation description, calculation is made of the fairing element, which is a multilayer shell of carbon plastic, under thermal force loading. The influence of boundary conditions is studied, including taking into account the contact interaction of the shell with the tooling, on the process of shell deformation up to the moment of loss of stability. The results show the acceptability of the proposed method for nonlinear calculation of multi-layer thin-walled structures, taking into account their contact interaction with the rigging. It is noted that taking into account the contact interaction can lead to fundamentally different results.

L.N. Butymova., V.Ya. Modorskii
ANALYSIS WORK OF GAS-DYNAMIC FORCES IN
THE LABYRINTH SEAL OF CENTRIFUGAL
COMPRESSORS GAS TRANSMISSION UNITS

Keywords: labyrinth seals, the work of gas dynamic forces, oscillations of the rotor, the development of LS GTU, geometric characteristics.

In labyrinth seals, the working medium is sealed by throttling it when moving through successively located constrictions and expansions. However, it was shown in

Однако чтобы обеспечить азровиброустойчивость, необходимо учитывать процессы движения рабочей среды, протекающие в окружном направлении лабиринтного уплотнения (ЛТУ) при вибрациях ротора. Публикации, связанные с вибрационными процессами в ЛТУ, рассматривают влияние прецессии, геометрических характеристик ЛТУ и не учитывают влияние газодинамических сил. В данной работе показано как колебания ротора в зазоре ЛТУ моделируются нелинейной динамической квазидвумерной газодинамической моделью развертки зазора ЛТУ с подвижными границами. В этой работе показано как колебания ротора в зазоре ЛТУ моделируются нелинейной динамической квазидвумерной газодинамической моделью развертки зазора ЛТУ с подвижными границами. Также проведен анализ работы газодинамических сил в ЛТУ центробежных компрессоров ГПА.

Л.А. Галиуллин

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, диагностика, программирование, контроллер, модель.

Спроектирована автоматизированная система диагностики на базе объектно-ориентированного подхода. Для проверки качества сборки и проведения диагностики ДВС, оборудованных электронным контроллером, предложено внедрение на заводе-производителе технического комплекса, обеспечивающего автоматическое управление технологическими режимами работы ДВС. Предложена разработка автоматизированная система диагностики, позволяющая эффективно производить диагностику двигателя.

С.В. Данилова, А.И. Офилова, Н.А. Андреева

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ЛОГИСТИЧЕСКИМИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ В ИНТЕРНЕТ- ТОРГОВЛЕ

Ключевые слова: бизнес-процессы, логистика, интернет-торговля. В работе исследованы основные тенденции и факторы развития логистических бизнес-процессов. Определены пути повышения эффективности работы интернет-магазина. Рассмотрены общие правила и особенности идентификации бизнес-процессов в логистических системах. Сделан вывод об эффективности процессного подхода в силу его гибкости при моделировании бизнес-процессов в интернет-магазинах и предприятиях в целом.

В.О. Каледин, А.Д. Ульянов, Вл.О. Каледин

КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ СДВИГОВОЙ БАЛКИ ТИМОШЕНКО С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ВЫГОРАНИЯ МАТЕРИАЛА

Ключевые слова: балка, сдвиговая жесткость, выгорание, смещение линии приведения, температурные деформации.

Рассмотрен конечный элемент балки конечной сдвиговой жесткости с прямоугольным сечением при поперечном изгибе силами, приложенными на торцах, и начальными (температурными) деформациями, постоянными вдоль ее оси. Температура, модули упругости, модули сдвига и коэффициенты линейного температурного расширения (КЛТР) переменны в сечении и постоянны вдоль оси в пределах элемента. Подобные модели используются при проектировании балочных конструкций из композитов, работающих при высоких температурах, поэтому жесткостные и прочностные характеристики материала исследуемого объекта изменяются вследствие его выгорания. Положение линии приведения задано, эта линия параллельна оси балки и не обязательно проходит через центры жесткости сечений. Определяются деформации, зависящие от линейных перемещений точек линии приведения на торцах и углов поворота торцевых сечений, удовлетворяющие уравнениям равновесия балки и физическому закону Дюамеля-Неймана.

С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский, К.А. Баркалов, В.П. Гергель, Ю.А.

Лаптева, Е.А. Козин

ИНТЕГРАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ GLOBALIZER

that the wave processes occurring in the circumferential direction of the labyrinth seals during the vibrations of the rotor contribute to the formation of gas dynamic oscillatory processes. Author's publications, which describe vibrational processes in LS, consider the influence of precession, the geometric characteristics on vibrational processes in LS, but influence gas-dynamic forces not take account. In this paper shown how the rotor oscillations in the LS gap are modeled by a nonlinear dynamic quasi-two-dimensional gas dynamic model of the LS scan with movable boundaries. We analyzed the work of gas dynamic forces in the LS GTU.

L.A. Galiullin

DEVELOPMENT OF THE DIAGNOSTIC SYSTEM OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Keywords: internal combustion engine, diagnostics, programming, controller, model.

An automated diagnostic system based on the object-oriented approach was designed. To test the quality of assembling and diagnosing ICE equipped with an electronic controller, it is proposed to introduce a technical complex at the manufacturing plant that provides automatic control of the technological modes of operation of the engine. The development of an automated diagnostic system that allows to effectively diagnose an engine is proposed.

S.V. Danilova, A.I. Ofilova, N.A. Andreeva

PROCESS APPROACH TO MANAGEMENT OF LOGISTIC BUSINESS PROCESSES IN INTERNET- TRADE

Keywords: business processes, logistics, Internet-trade. The main tendencies and factors of development of logistics business processes are investigated. The ways of increasing the efficiency of the online store are determined. General rules and features of identification of business processes in logistics systems are considered. A conclusion is made about the effectiveness of the process approach due to its flexibility in modeling business processes in online stores and enterprises in general.

V.O. Kaledin, A.D. Ulyanov, V.I.O. Kaledin

THE FINIT ELEMENT MODEL OF THE TIMOSHENKO BEAM WITH TEMPERATURE DEFORMATION AND THERMAL DESTUCTION OF MATERIAL

Keywords: beam, shear stiffness, burnout, offset of the reduction line, temperature deformation.

The finite element of the finite shear stiffness beam with rectangular section under transverse bending is considered. Forces are applied at the both face sections and there are temperature deformations. The material characteristics with temperature deformations are variable in cross section and constant along the axis. Similar models are used in design of beam structures from composites that are exposed to high temperature. The stiffness and strength characteristics of the material of the object under investigation change due to its burnout. The position of the reduction line is given. This line is parallel to the axis of the beam and does not necessarily pass through the centers of rigidity of the sections. It is required to find deformations that depends on the linear displacements of the points at the ends and the angles of rotation of the end sections. They must satisfy the equilibrium equations of the beam and the Duhamel-Neumann physical law.

S.L. Kalyulin., V.Ya. Modorskii, K.A. Barkalov, V.P.

Gergel, Yu.A. Lapteva, E.A. Kozinov

INTEGRATION OF THE GLOBALIZER AND ANSYS

**И ANSYS ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ
КАПЛИ В ПОТОКЕ ГАЗА**

Ключевые слова: малогабаритная климатическая аэродинамическая труба, глобальная оптимизация, полет капли, численное моделирование, поток газа.

Применительно к вопросам исследования процессов обледенения в малогабаритной климатической аэродинамической трубе, представлены результаты оптимизационных 3D расчетов полета капли от впрыска до рабочей зоны в динамике. Отыскивается максимальная температура потока газа при заданной температуре капли, которая соответствует минимальному энергопотреблению при его охлаждении. Осуществлена интеграция программных систем Globalizer и ANSYS Workbench. При этом ANSYS использован как инструмент расчета значений критериев оптимизации, а Globalizer – как инструмент поиска оптимальных параметров.

В.А. Лысов, В.С. Янё, А.В. Кузьмин, А.В. Щеголев, М.В. Иванюк, Е.В. Баширова

**АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОСНОВА И ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОТОБРАЖЕНИЯ
ПЛОСКОГО КРИВОЛИНЕЙНОГО КОНТУРА ГЛАДКОЙ
СОВОКУПНОСТЬЮ ДУГ ОКРУЖНОСТЕЙ**

Ключевые слова: аппроксимация, дуга окружности, регламентирующая касательная, опорная точка, гладкая кривая. Обобщён опыт приложения в решении производственных задач гладких непрерывных аппроксимирующих кривых, образованных дугами окружностей. Разработан результативный алгоритм расчёта и построения. Представлен графический интерактивный интерфейс в режиме реального времени. Приведены практические результаты.

Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский
**О ВОЗМОЖНОСТИ ЧИСЛЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОПРАВОЧНЫХ АЭРОУПРУГИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ
НЕСТАЦИОНАРНОГО РАСЧЕТА РОТОРА ЦЕНТРОБЕЖНОГО
КОМПРЕССОРА ГПА**

Ключевые слова: центробежный компрессор; нестационарный расчет компонент НДС; BFSI расчет.

В рамках работы созданы физическая и математическая модели вибрационных процессов ротора компрессора газоперекачивающего агрегата (ГПА), учитывающие в динамике аэродинамическую и инерционную нагрузки, опоры жесткого типа, технологические дисбалансы, геометрические и физико-механические характеристики конструкции. В ходе исследования получены результаты BFSI расчета и нестационарного расчета по оценке компонент напряженно-деформированного состояния. Обнаружено, что вибрации ротора зависят от взаимовлияния в системе «газ–конструкция».

В.А. Столярчук

УЧЕБНАЯ САПР С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ

Ключевые слова: методика обучения, учебная САПР, открытое программное обеспечение, алгоритмы оптимизации.

В статье описывается концепция и реализация открытой учебной САПР, используемой в качестве объекта разработки для студентов, специализирующихся в области создания подобных программных автоматизированных систем. Приведен перечень задач, которые решает САПР, а также её структура.

Д.Н. Тимофеев, В.В. Шведенко, О.В. Щекокихин
**ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

Ключевые слова: метрическая система, показатели, интегрированная информационная система, архитектура информационной системы.

В статье рассматривается интеграция информационного обеспечения на основе метрической системы показателей

**SOFTWARE FOR OPTIMIZATION OF COOLING
PROCESSES IN THE GAS FLOW**

Keywords: small-size climatic wind tunnel, global optimization, droplets flying, numerical simulation, gas flow.

With regard to the research of icing processes in a small-sized climatic wind tunnel, the 3D optimized calculations results of the droplets flying from injection to the working zone in dynamics are presented. The maximum temperature of the gas flow at a given droplet temperature is found, which corresponds to the minimum energy consumption when it is cooled. The integration of the software systems Globalizer and ANSYS Workbench is implemented. In this case, ANSYS is used as a tool for calculating the values of optimization criteria, and Globalizer is used as a tool for finding optimal parameters.

V.A. Lysov, V.S. Yanyo, A.V. Kuzmin, A.V. Schegolev, M.V. Ivanyuk, E.V. Bashirova

**ALGORITHMIC FOUNDATION AND SOFTWARE OF
THE AUTOMATED DISPLAY FLAT CURVED
CONTOUR OF A SMOOTH SET ARCS OF CIRCLES**

Keywords: approximation, radial arc, regulate tangent, mounting point, smooth curve.

It summarizes the experience of application in solving production problems smooth continuous approximating curves formed by arcs of circles. The effective algorithm of calculation and construction has been developed. A graphical interactive interface in real time has been provided.

The practical findings have been stated.

Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский
**О ВОЗМОЖНОСТИ ЧИСЛЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДЕТЕРМИНАЦИИ УЛУЩЕНИЯ АЭРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО
РАСЧЕТА РОТОРА ЦЕНТРОБЕЖНОГО
КОМПРЕССОРА ГПА**

Keywords: centrifugal compressor; non-stationary calculation of stress-strain state components; BFSI calculation.

In this paper, the physical and mathematical models of the vibration processes of the compressor rotor of the gas transmittal unit (GTU) are developed, taking into account the aerodynamic and inertial loads, rigid type supports, technological imbalances, geometric and physico-mechanical characteristics of the design in dynamics. During the study, the results of the BFSI calculation and nonstationary calculation for the evaluation of stress-strain components were obtained. It is found that the vibrations of the rotor depend on the mutual influence in the "gas-construction" system.

В.А. Столярчук

OPEN SOURCE TRAINING CAD

Keywords: teaching methodology, educational CAD, open source software, optimization algorithms.

The article describes the concept and implementation of an open source training CAD, used as an object of development for students specializing in the creation of such software automated systems. A list of tasks that CAD solves, as well as its structure, is given.

Д.Н. Тимофеев, В.В. Шведенко, О.В. Щекокихин
**ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ
ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

Keywords: metric system, indicators, integrated information system, information system architecture.

The article deals with the integration of information support on the basis of the metric system of enterprise performance indicators, which includes general

деятельности предприятия, которая включает в себя общеуправленческий и функциональные блоки. В работе предложена ее структура. Рассмотрен вариант ее исполнения в виде архитектурного решения.

В.А. Харитонов, С.В. Леонтьев, А.Д. Курзанов
**КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
 ПАРАМЕТРАМИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ
 НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА**

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, рецептурно-технологические параметры, управление технологическим процессом, интеллектуальная система, экспертная система.

В статье представлена концепция автоматизированной системы подбора рецептурно-технологических параметров производства изделий из неавтоклавного газобетона. Отмечено, что реализация такой системы возможна при обосновании выбора управляющих параметров, разработке экспертной системы, формирующей новый вектор управляющих воздействий на основе результатов предыдущего цикла производства, а также при внедрении в технологический процесс автоматических средств контроля процесса вспучивания. Представлен лабораторный прототип установки, позволяющий в режиме онлайн фиксировать параметры подъема массива.

В.Н. Хмельев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.С. Клепов, В.Е. Бажин
**МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЕРЦИОННЫХ
 ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ НА БАЗЕ МОДЕЛИ ДИСКРЕТНОЙ ФАЗЫ**

Ключевые слова: циклон, частицы, эффективность, газоочистка.

В данной статье описывается метод расчета эффективности инерционных пылеуловителей, благодаря которой можно повысить их эффективность, что приведет к меньшим выбросам мелкодисперсных частиц в атмосферу.

М.А. Черноскутов
**АЛГОРИТМ ПОИСКА ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ СООБЩЕСТВ НА
 ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАВНОУДАЛЕННЫХ ВЕРШИН**

Ключевые слова: алгоритмы на графах, поиск сообществ в графах, перекрывающиеся сообщества.

Поиск сообществ в графах является актуальной задачей анализа крупных сетей. На данный момент существует множество различных работ, посвященных решению данной проблемы. Поиск пересекающихся сообществ – сложная задача, необходимая для анализа реальных данных. В работе представлен алгоритм, позволяющий находить перекрывающиеся сообщества в графе с помощью анализа его подграфов и поиска в них клик.

В.А. Щапов, С.Р. Латыпов
**СПОСОБЫ ЗАПУСКА ЗАДАЧ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ В
 ИЗОЛИРОВАННЫХ ОКРУЖЕНИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ
 ТЕХНОЛОГИИ КОНТЕЙНЕРНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ DOCKER**

Ключевые слова: Docker, Slurm, HPC, Linux, Контейнерная виртуализация.

В статье рассматриваются способы запуска задач на суперкомпьютере при использовании контейнерной виртуализации Docker для их изоляции. Первый способ основан на использовании протокола SSH, является простым в реализации, но имеет сложности с обеспечением безопасности суперкомпьютера. Второй способ основан на отображении Slurm-окружения внутри контейнеров, что позволяет использовать входящий в состав Slurm механизм запуска параллельного приложения, а также решает проблемы с безопасностью, так как позволяет запускать приложения в контейнерах сразу с ограниченными правами. Описываются требования к базовым образам пользовательских контейнеров задач. Представленные результаты тестирования производительности показывают отсутствие наблюдаемого влияния контейнерной виртуализации на эффективность работающих задач. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-37-00069.

management and functional blocks. The paper proposes its structure. The variant of its execution in the form of an architectural solution is considered.

V.A. Kharitonov, S.V. Leontev, A.D. Kurzanov
**THE CONCEPT MODEL OF NON-AUTOCRAVED
 AERATED CONCRETE PRODUCTION PARAMETERS
 AUTOMATED CONTROL**

Keywords: non-autoclaved aerated concrete, prescription-technological parameters, technological process control, intelligence system, expert system.

The concept of non-autoclaved aerated concrete production prescription-technological parameters selection automated system are presented in the article. It was noticed the realization of such system is possible if the control parameters selection will be substantiated, expert system which must generate a new control parameters array based on the previous production cycle results will be developed and automatic expansion process control tools will be implemented into technological process. The laboratory prototype of device which can define the parameters of the array rise was presented.

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, V.S. Klepov, V.E. Bazhin

**METHOD OF CALCULATION OF EFFICIENCY OF
 INERTIAL DUST SOILS ON THE BASIS OF THE
 MODEL OF DISCRETE PHASE**

Keywords: cyclone, particles, efficiency, gas cleaning.

This article describes a method for calculating the efficiency of inertial dust collectors, due to which it is possible to increase their efficiency, which will result in smaller emissions of finely dispersed particles into the atmosphere.

M.A. Chernskutov
**OVERLAPPING COMMUNITY DETECTION BASED
 ON EQUIDISTANT VERTICES CLUSTERING**

Keywords: graph algorithms, community detection, overlapping communities.

Community detection in graphs is an urgent task of analyzing large networks. At the moment, there are many different studies devoted to solving this problem. Overlapping community detection is a complex task, which is necessary for the analysis of real-world data. The paper presents an algorithm to find overlapping communities in a graph by analyzing its subgraphs and searching for cliques in them.

V.A. Shchapov, S.R. Latypov
**THE TECHNIQUES OF RUNNING TASKS ON A
 SUPERCOMPUTER IN ISOLATED ENVIRONMENT
 WITH USING DOCKER CONTAINERS**

Keywords: Docker, Slurm, HPC, Linux, Container virtualization.

The paper discusses the techniques of running tasks on a supercomputer in Docker container for their isolation. The first method, which is based on the use of the SSH protocol, can be easily implemented but involves certain difficulties in providing security of the supercomputer. The second method is based on imaging the Slurm-environment inside the containers, which makes it possible to use the mechanism of running a parallel application incorporating Slurm-environment, and also solves the security problems, since it allows running applications in containers with limited rights. The requirements to the basic images of users' task containers are described. The results of testing the workability of the technique show the absence of visual effect of container virtualization on the efficiency of the running tasks. The work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No 16-37-00069).

А.Г. Щербинин, А.И. Кабирова
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ КАБЕЛЯ С ЖИЛАМИ СЕКТОРНОЙ ФОРМЫ

Ключевые слова: сектор, токопроводящая жила, напряжение, силовой кабель, напряженность электрического поля, математическое моделирование.

Исследовано электрическое поле кабелей с отдельно экранированными жилами секторной формы. Рассмотрен силовой кабель марки АПвП с тремя алюминиевыми жилами секторной формы с изоляцией из сшитого полиэтилена сечением 240 мм². В ходе исследования получено распределение потенциала и напряженности электрического поля в поперечном сечении изоляции. Проведен анализ зависимости напряженности от радиусов закругления частей секторной жилы.

А.Г. Щербинин, Д.Ю. Корюкин
ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛАХ БОЛЬШИХ
СЕЧЕНИЙ

Ключевые слова: сопротивление, плотность тока, поверхностный эффект, математическое моделирование, токопроводящая жила, Maxwell.

В статье рассмотрено математическое моделирование электромагнитных процессов в круглых жилах больших сечений. Получено распределение плотности тока в жилах, приведены результаты расчетов сопротивлений переменному и постоянному току, а также коэффициентов поверхностного эффекта. Поставленная задача решалась методом конечных элементов с использованием программного пакета моделирования Maxwell.

А.Г. Щербинин, С.В. Стариков
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАСЧЁТА
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕПЛОВЫХ
СОПРОТИВЛЕНИЙ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Ключевые слова: компьютерная программа, разработка, геометрические параметры, тепловые сопротивления, расчётные модули, условия применения.

В работе представлен обзор компьютерной программы для автоматизации расчётов геометрических параметров и тепловых сопротивлений кабельных изделий. Рассмотрены основные расчётные модули программы и их внешний вид. Описаны возможные условия применения данной компьютерной программы и её модулей по отдельности.

А.Г. Щербинин, И.А. Титов
ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО
ТЕЧЕНИЯ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ
ШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА

Ключевые слова: экструдер, скорость, вязкость, жидкость.

В данной статье рассмотрено изотермическое течение ньютоновских вязких жидкостей в винтовом канале экструдера с помощью одномерных плоских и осесимметричных моделей. Целью исследования является проведение сравнительного анализа между плоской и осесимметричной моделями.

A.G. Shcherbinin, A.I. Kabirova
MATHEMATIC SIMULATION ELECTRICAL FIELD
CONDUCTOR SEGMENTAL CABLE

Keywords: sector, electric conductor, voltage, power cable, electrostatic field intensity, mathematic simulation.

The electric field of sector cables with the screened conductor cable is investigational. A power three-conductor aluminium segmental cable of brand of APvP is Considered with an isolation from the sewn together polyethylene by a section 240sq.mm. Distribution of potential and tension of electric-field in the crossrunner of isolation is got during research. The analysis of dependence of tension from the radiuses of rounding of parts of sectoral conductor is conducted.

A.G. Shcherbinin, D.Y. Koryukin
MATHEMATICAL MODELLING OF
ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN CONDUCTIVE
CORES OF LARGE SECTIONS

Keywords: resistance, current density, surface effect, mathematical modeling, conductive core, Maxwell.

In this article is consider mathematical modeling of electromagnetic processes in round cores of large sections. Received distribution of current density in conductor, adduced the results of calculations of resistances of AC and DC, also surface effect coefficients. The assigned task was solved by the finite elements method using the «Maxwell» simulation software package.

A. Shcherbinin, S. Starikov
DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE FOR
AUTOMATION OF THE PROCESSES OF
CALCULATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS
AND THERMAL RESISTANCE OF CABLE
PRODUCTS OF ANY CONFIGURATIONS, IN
ACCORDANCE WITH THE METHOD OF
CALCULATION

Keywords: computer program, development, geometric parameters, thermal resistance, calculation modules, application conditions.

The paper presents an overview of a computer program for the automation of calculations of geometric parameters and thermal resistances of cable products. The main calculation modules of the program and their appearance are considered. The possible conditions for the application of this computer program and its modules separately are described.

A. Shcherbinin, I. Titov
NUMERICAL PROBES OF ISOTHERMAL CURRENTS
OF THE NEWTONIAN LIQUID IN THE PORT
SHNEKOVY EXTRUDER

Keywords: extruder, speed, viscosity, liquid.

In this article the current of viscous fluids in the screw port of an extruder is considered. One-dimensional flat and axisymmetric models are considered. A research objective is carrying out the comparative analysis between flat and axisymmetric models.

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

№5 2017

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 21.10.2017 Формат 60 x 84 1/8. Печать цифровая.

11,6 усл.печ.л. 13,3 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 885.

Учредитель: ООО "Научно-технический вестник Поволжья"

420111, Республика Татарстан, Казань,

ул. Университетская, д.22, оф. 310

Адрес редакции, издателя и типографии совпадают с адресом учредителя

Цена свободная.

© Научно-технический вестник Поволжья

тел.(843) 216-30-35

факс:(843) 238-32-08

Отпечатано с готового оригинал-макета

ООО «Научно-технический вестник Поволжья»