

Редакционный совет

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф., председатель
Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф., зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц., секретарь
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редколлегия

Главный редактор
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации
Заместители главного редактора
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф.
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф.
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф.
Зубарев Ю.М. д-р техн. наук, проф.
Зубчанинов В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф.
Колесников К.С. д-р техн. наук, проф., академик РАН
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф.
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф.
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф.
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф., академик РАН
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф.
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф.

Ответственный за выпуск
Григорьева О.Ю.

Адрес редакции

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-47351 от 03 ноября 2011 года

Подписной индекс **29504**
по объединенному каталогу «Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2013

Содержание

Естественные науки

<i>Морозова А.В., Василенко Ю.В., Алисова М.В.</i> Математическая модель квалитметрии и типизации объектов процесса социализации в условиях внешней неопределенности и матрица соответствия ее параметров.....	3
<i>Шадрин И.Ф.</i> Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Ограниченный странный фрактал. Агрегаты (Кластеры).....	13
<i>Корнеев Ю.С., Корнеева Е.Н., Игряшкина Н.А.</i> Расчет и проектирование пускозащитной муфты.....	22
<i>Бабанков В.А.</i> Устройство взрывозащиты для многоходовых газовых топков.....	27
<i>Андрущенко В.А., Головешкин В.А., Мурашкин И.В., Холин Н.Н.</i> Построение приближенного решения задачи о сильном точечном взрыве в однородной атмосфере.....	32
<i>Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Морев П.Г., Грядунов И.М., Голенков В.А.</i> Математическая модель упрочняющей обработки внутренней поверхности деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условия комплексного локального нагружения очага деформации.....	40
<i>Новикова Т.П., Авсеева О.В., Новиков А.И.</i> Математическая модель оптимального распределения работ в сетевых канонических структурах.....	48

Моделирование технологических процессов

<i>Недоступ А.А., Ражев А.О.</i> Компьютерное моделирование процесса выборки орудия рыболовства с помощью барабана фрикционного типа.....	53
<i>Орешин А.Н., Шкарбуль Р.В.</i> Методика оптимизации планирования мониторинга технического состояния ВОЛС, обеспечивающая надежную и точную работу станков с дистанционным числовым программным управлением.....	58
<i>Савин Л.А., Корнаева Е.П., Архипов В.П.</i> Моделирование трехмерного течения в канале цилиндр-конус.....	62

Конструирование, расчеты, материалы

<i>Сергеев И.В., Поляков Р.Н.</i> Подход к разработке алгоритма управления бытового робота-уборщика.....	70
--	----

Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Барботько А.И., Разумов М.С., Поикратов П.А., Пыхтин А.И.</i> Определение длины режущей кромки при проектировании обкаточного инструмента типа долбяк.....	75
<i>Волчкова Е.А., Осипов А.П.</i> К вопросу о глубине резания при шлифовании.....	82
<i>Киричек А.В., Тарасов Д.Е., Митина Т.В.</i> Модель исследования общих закономерностей комбинированного упрочнения статико-импульсной обработкой и цементацией.....	88
<i>Михеев А.В.</i> Повышение энергоэффективности технологии гидроабразивного резания на основе рационального управления технологической системой.....	95
<i>Овсянникова И.В., Сычев Е.А., Тарапанов А.С.</i> Информационное моделирование адаптивного управления электроэрозионной обработкой.....	103

Машины, аппараты, технологии пищевой и легкой промышленности

<i>Корячкин В.П., Гончаровский Д.А., Гончаров Ю.В.</i> Машина для коэкструдирования пищевых продуктов с коническим рассекателем потока начинки.....	108
<i>Черепенько А.А., Черепенько А.П., Жаворонков А.И.</i> Аналитические исследования геометрии рабочей поверхности гладильной подушки после изгиба в процессе эксплуатации.....	115

Приборостроение и биотехнические системы

<i>Шалобаев Е.В., Толочка Р.Т.</i> Терминологические аспекты современной мехатроники.....	122
<i>Демина Ю.А., Демина Е.Г., Преснецова В.Ю., Денисова Т.Г.</i> Моделирование испарителя в виде спирального змеевика многофункциональной экспериментальной модульной системы, предназначенной для задания и контроля технологических параметров изделий приборостроения.....	133
<i>Батенков К.А., Шекотихин С.Н.</i> Постановка задачи синтеза оптимальных рандомизированных дискретных отображений непрерывных каналов связи.....	140
<i>Деулин Б.И.</i> Модернизация твердотельного лазера на органических красителях ЛКИ-301.....	145
<i>Селихов А.В., Пузырев С.Г., Козюра А.В., Некрасов В.И., Шатеев Р.В.</i> Разработка обобщенной математической модели подшипника качения.....	150

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Иванов Б.Р., Лисичкин В.Г., Лисичкин М.А.</i> Оценка достоверности двухпараметрового резонансного контроля.....	159
<i>Андросова Е.Б., Мишин В.В.</i> Метод и средство диагностирования подшипника с учётом виброударного взаимодействия колец и тел качения.....	165



The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year

№ 5 (301) 2013
September-October

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Education Professional Institution
«State University - Education-Scientific-Production Complex»
(State University – ESPC)

Editorial council

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president
Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president
Borzenkov M.I. Candidate Sc.
Tech., Assistant Prof., secretary
Astafichev P.A. Doc. Sc. Law., Prof.
Ivanova T.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.
Novikov A.N. Doc. Sc. Tech., Prof.
Popova L.V. Doc. Sc. Ec., Prof.
Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editorial Committee

Editor-in-chief
Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.,
honored worker of science of Russian
Federation

Editor-in-chief Assistants

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech.,
Prof.

Member of editorial board

Babichev A.P. Doc. Sc. Tech., Prof.
Vdovin S.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Dmitriev A.M. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Corresponding Member of RAS
Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof.
Zubarev Y.M. Doc. Sc. Tech., Prof.
Subchaninov V.G. Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.
Ivanov B.R. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kolesnikov K.S. Doc. Sc. Tech.,
Prof., Academician of RAS
Kopylov Y.R. Doc. Sc. Tech., Prof.
Malinin V.G. Doc. Sc. Ph.-Math., Prof.
Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof.
Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.
Panin V.E. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Academician of RAS
Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.
Smolenzev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Responsible for edition

Grigorieva O.Yu.

Address

302020 Orel,
Naugorskoe Chossee, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency
of supervision in sphere of commun-
ication, information technology and
mass communications. The certificate
of registration PI № FS77-47351 from
03.11.2011

Index on the catalogue of the «Pressa
Rossii» 29504

© State University – ESPC, 2013

Contents

Natural science

<i>Morozova A.V., Vasilenko Yu.V., Alisova M.V.</i> Mathematical model of qualimetry and typification of objects of process of socialization in the conditions of the external vagueness and matrix of accordance her parameters.....	3
<i>Shadrin I.F.</i> The rigid bars on the two-dimensional surface. Limited strange fractal. Units (Clusters)....	13
<i>Korneev YU.S., Korneeva E.N., Igrashkina N.A.</i> Calculation and engineering of the start-protective clutch	22
<i>Babankov V.A.</i> Device explosion protection for multi-ways gas furnaces.....	27
<i>Andrushchenko V.A., Goloveshkin V.A., Murashkin I.V., Cholone N.N.</i> Construction of the approximate solution of the problem of strong point explosion in a homogeneous atmosphere.....	32
<i>Radchenko S.J., Dorohov D.O., Morev P.G., Gryadunov I.M., Golenkov V.A.</i> Mathematical design of hardening process of inner surface of bush-type parts by intensive plastic deformation in complex local loadind terms of deformation zone.....	40
<i>Novikova T.P., Avseeva O.V., Novikov A.I.</i> The mathematical model of optimal distribution works in network canonical structures.....	48

Process modeling

<i>Nedostup A.A., Razhev A.O.</i> Computer simulation of sampling tools fishing with drum type friction.....	53
<i>Oreshin A.N., Shkarbul R.V.</i> Development of planing optimization techniques for monitoring the technical condition of fiber optical transmitting line.....	58
<i>Savin L.A., Kornaeva E.P., Arkhipov V.P.</i> Modeling of free-dimensional fluid flow in the cylinder-cone gap.....	62

Construction, calculation, material

<i>Sergeev I.V., Polakov R.N.</i> The approach to developing control algorithm for a household cleaner robot..	70
--	----

Machine building technology and toolware

<i>Barbotko A.I., Razumov M.S., Ponkratov P.A., Pykhitin A.I.</i> Determination of long cutting edge in designing tool type pinion cutter.....	75
<i>Volchkova E.A., Osipov A.P.</i> To the question about the depth of the cut in the grinding.....	82
<i>Kirichek A.V., Tarasov D.E., Mitina T.V.</i> Model study of general regularities of the combined hardening of the static-pulse processing and cementation.....	88
<i>Mikheev A.V.</i> Increase energy technologies of waterjet cutting on the basis sound management system technology.....	95
<i>Ovsjanikova I.V., Sychev E.A., Tarapanov A.S.</i> Adaptive management information modeling electrical discharge machining.....	103

Machine, apparatus, technology light and food industry

<i>Koryachkin V.P., Goncharovskiy D.A., Goncharov Y.V.</i> Machine for co-extruding food products with cone splitter of staffing flow.....	108
<i>Cherepenko A.A., Cherepenko A.P., Zhavoronkov A.I.</i> Analytical study of geometry surface air after ironing bend conditions.....	115

Instrument making and biotechnological system

<i>Shalobaev E.V., Tolochka R.T.</i> Terminological aspects modern mechatronics.....	122
<i>Demina Y.A., Demina E.G., Presnecova V.Y., Denisova T.G.</i> Modelling evaporator in the form of the spiral coil multifunctional experimental modular system intended for the task and control of technological parameters of products of instrument making.....	133
<i>Batenkov K.A., Schekotikhin S.N.</i> Synthesis problem statement of optimal randomized continuous channel discrete mapping.....	140
<i>Deulin B.I.</i> Modernization of solid state organic dye laser LCI-301.....	145
<i>Selihov A.V., Puzyrev S.G., Kozjura A.V., Nekrasov V.I., Shateev R.V.</i> Developmet of common mathematical model of ball bearing.....	150

Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Ivanov B.R., Lisichkin V.G., Lisichkin M.A.</i> Reliability estimation of two-parameter resonance control.....	159
<i>Androsova E.B., Mishin V.V.</i> Method and means for diagnostic bearings with vibro-impact by interaction rings and rolling elements.....	165

The journal is on the List of the peer-reviewed journals and editions stated by the High Attestation Commission at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the publication of the main scientific results of the thesis for the academic degree.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 3:001.891.573

А.В. МОРОЗОВА, Ю.В. ВАСИЛЕНКО, М.В. АЛИСОВА

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАЛИМЕТРИИ И ТИПИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ПРОЦЕССА СОЦИАЛИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И МАТРИЦА СООТВЕТСТВИЯ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

В статье анализируется опыт разработки математической модели квалиметрии и типизации многопараметрических социальных объектов процесса социализации, учитывающей условия внешней неопределенности при реализации этого процесса, который основан на процедуре формализации информационных пространств системы факторов/факторных кластеров и системы характеристик/кластеров характеристик, которые приобретаются социальным объектом в процессе социализации.

Представленная коллективом авторов модель квалиметрии и типизации многопараметрических социальных объектов процесса социализации является основой для разработки технологии квалиметрического оценивания уровня сформированности социально-профессиональных компетенций специалистов для инновационного машиностроительного производства.

Ключевые слова: алгоритм, квалиметрия, модель, социальный объект.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ЕЕ АКТУАЛЬНОСТЬ И НОВИЗНА

Проведенный анализ теоретико-методологических подходов к определению процесса социализации и ее подпроцессов, позволяет сделать вывод о том, что социализация как процесс усвоения социальных и культурных норм, освоения социальных ролей, является результатом объектно-субъектного взаимодействия, порождающим изменения в структуре личности под воздействием внешних и внутренних факторов, и изменяющим ее [8]. Используемое в современной социологии понятия социализационной нормы и социализационного дифференциала [5, 10], не выявляют механизма определения ее количественных характеристик, а поэтому не позволяют оценить эффективность социализационного процесса в отношении конкретного индивида. Сравнение социализируемых индивидов между собой осуществляется с применением качественных показателей, и осуществляется, как правило, с высокой степенью субъективности, что не позволяет им оптимизировать структуру своей активности при участии в тех или иных социальных процессах.

Разработанный авторами подход, позволяет формализовать информационные пространства [7], описывающие две системы показателей (систему факторов, раскрывающей степень воздействия факторов на социальный объект, и систему характеристик, которые приобретает социальный объект в процессе социализации и характеризующих уровень сформированности его собственных характеристик). На основе формализованных информационных пространств был сформирован аксиоматический базис и матрица соответствий компонентов этих информационных подпространств, на базе которых можно разработать математическую модель квалиметрии и типизации многопараметрических социальных объектов процесс социализации [1, 2, 3].

РЕШЕНИЕ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ

1. Пусть на p -ый объект (МСО) воздействует совокупность факторов $D_i, i = \overline{1:n}$, степень воздействия которых отображается в n -мерном информационном пространстве N точкой $N_p(q_{p1}; q_{p2}; \dots; q_{pr}; \dots; q_{pn})$.

Для каждого фактора $D_i, i = \overline{1:n}$, установлены значение q_i^{\min} , называемое пороговым значением для фактора D_i , такое, что если на p -ый объект оказывается такая степень воздействия q_{pi} фактора D_i что выполняется условие $q_{pi} < q_i^{\min}$, то воздействие фактора D_i на p -ый объект считается незначительным, и в этом случае полагают, что $q_{pi} = 0$.

Пусть совокупный уровень воздействия факторного кластера $A_j, j = \overline{1:m}$, определяется подмножеством факторов $D_{jg} \subset \{D_i\}, i = \overline{1:n}, g = \overline{1:t}$ (рис. 1). Каждый фактор D_{jg} имеет уровень значимости $\alpha_{jg}, g = \overline{1:t}$, который показывает, какую долю анализируемый фактор D_{jg} привносит в совокупное воздействие на МСО той части m -мерного ($m \rightarrow \infty$) информационного пространства M , которая составляет факторный кластер $A_j, j = \overline{1:m}$.

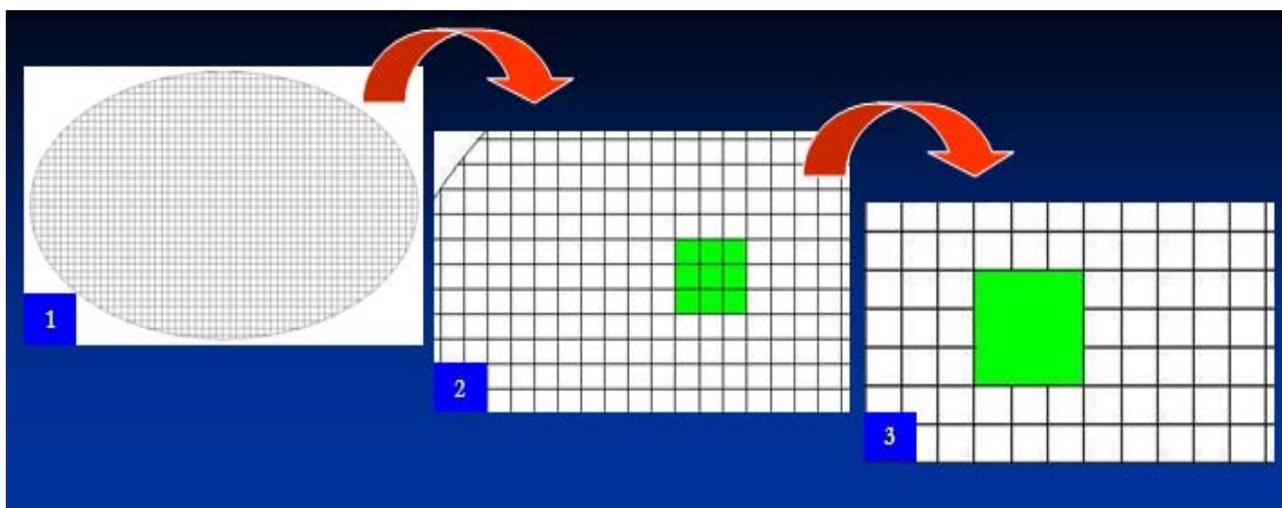


Рисунок 1 – Модель формирования m -мерного ($m \rightarrow \infty$) информационного пространства M множества факторных кластеров A_j (позиция 3) на базе n -мерного ($n \rightarrow \infty$) информационного пространства N (позиция 1) совокупности факторов D_i (позиция 2) - (фрагмент 1)

Для каждого фактора $D_{jg}, g = \overline{1:t}$, входящего во множество $D_{jg} \subset \{D_i\}, i = \overline{1:n}, g = \overline{1:t}$ с уровнем значимости $\alpha_{jg}, g = \overline{1:t}$, в составе факторного кластера $A_j, j = \overline{1:m}$, обладает следующими свойствами: $0 \leq \alpha_{jg} \leq 1$ и $\sum_{g=1}^t \alpha_{gj} = 1$.

Совокупная степень воздействия факторного кластера $A_j, j = \overline{1:m}$ на МСО может определяться несколькими способами, например:

- по уровню максимального значения среди всех имеющихся значений степени воздействия факторов, входящих в совокупность $D_{jg} \subset \{D_i\}, i = \overline{1:n}, g = \overline{1:t}$ и определяющих совокупную степень воздействия факторного кластера $A_j, j = \overline{1:m}$, т.е.:

$$s_{pj} = \max\{q_{pjg}; g = \overline{1:t}\} \quad (1)$$

- по уровню минимального значения среди всех имеющихся значений степени воздействия факторов, входящих в совокупность $D_{jg} \subset \{D_i\}, i = \overline{1:n}, g = \overline{1:t}$ и определяющих совокупную степень воздействия факторного кластера $A_j, j = \overline{1:m}$, т.е.:

$$s_{pj} = \min\{q_{pjg}; g = \overline{1:t}\} \quad (2)$$

– по уровню достижения среднего значения среди всех имеющихся значений степени воздействия факторов, входящих в совокупность $D_{jg} \subset \{D_i\}, i = \overline{1:n}, g = \overline{1:t}$ и определяющих совокупную степень воздействия факторного кластера $A_j, j = \overline{1:m}$, скорректированного по уровню значимости α_{jg} для каждого фактора D_{jg} , входящего в состав факторного кластера A_j , и рассчитываемый по формуле средней арифметической взвешенной, т.е.:

$$s_{pj} = \frac{\sum_{g=1}^t \alpha_{jg} \cdot q_{pjg}}{t} \quad (3)$$

Уровень значимости α_{jg} для каждого фактора мини-уровня $D_{jg}, g = \overline{1:t}$, входящего в состав факторного кластера $A_j, j = \overline{1:m}$, определяется экспертно-аналитическим путем с учетом сложившейся в анализируемый период времени социодинамики внешней среды и суперпозиционного воздействия на МСО со стороны макро- и мезо-факторов, образующих по отношению к анализируемому объекту **систему «условий внешней неопределенности»**.

Таким образом, с помощью выражений (1) - (3) решается проблема установления количественной зависимости между степенью воздействия S_j факторного кластера $A_j, j = \overline{1:m}$ от совокупности координат $q_i, i = \overline{1:n}$ точки N_i информационного пространства N , характеризующих степень воздействия каждого фактора на многопараметрический социальный объект. Такая зависимость может быть представлена в общем виде:

$$s_j = f(q_1; q_2; \dots; q_i; \dots q_n) \quad (4)$$

2. В соответствии с формулой (7) из [8] существует многопараметрическая зависимость между уровнем сформированности H_k социальной характеристики B_k МСО, $k = \overline{1:l}$, и степенью воздействия q_i факторов $D_i, i = \overline{1:n}$, как координат точки N_i информационного пространства N , на этот социальный объект. Тогда, используя табличный метод задания функции, можно установить вид такого функционального соответствия в форме прямоугольной матрицы, сформировав, таким образом, **матрицу соответствия параметров модели** квалиметрии и типизации многопараметрических социальных объектов. Пример такой матрицы соответствия, сформированной на основе условных данных, представлен в таблице 1, причем знак «+» на пересечении строки фактора и столбца социальной характеристики указывает на то, что данный фактор оказывает воздействие на МСО, следствием чего является приобретение объектом в процессе его социализации соответствующей социальной характеристики.

Если полученную матрицу соответствия (таблица 1) заполнить значениями долевых коэффициентов α_{jg} , характеризующих уровни значимости факторов $D_{jg}, g = \overline{1:t}$, в составе факторных кластеров $A_j, j = \overline{1:m}$, то получим аналитическую матрицу соответствия системы социальных характеристик многопараметрического социального объекта (МСО) и системы факторов, оказывающих воздействие на анализируемый объект. Пример фрагмента аналитической матрицы соответствия системы социальных характеристик многопараметрического социального объекта (МСО) и системы факторов, оказывающих воздействие на анализируемый объект представлен в таблице 2.

Таблица 1 – Фрагмент матрицы соответствия системы социальных характеристик многопараметрического социального объекта (МСО) и системы факторов, оказывающих воздействие на анализируемый объект

Система факторов (Ф) и факторных кластеров (ФК)		Система социальных характеристик (СХ) и кластеров социальных характеристик (КСХ) МСО									
		КСХ-01				КСХ-02					
		СХ-01-01	СХ-01-02	СХ-01-03	...	СХ-02-01	СХ-02-02	СХ-02-03	СХ-02-04	СХ-02-05	...
ФК-01 «.....»											
Ф-01-01	«.....»	+			..			+			..
Ф-01-02	«.....»			+	..		+		+		..
Ф-01-03	«.....»		+		..			+		+	..
...	...										
ФК-02 «.....»											
Ф-02-01	«.....»		+		..		+	+		+	..
Ф-02-02	«.....»	+			..	+	+				..
...	...										
...											

Таблица 2 – Фрагмент аналитической матрицы соответствия системы социальных характеристик многопараметрического социального объекта (МСО) и системы факторов, оказывающих воздействие на анализируемый объект

Система факторов (Ф) и факторных кластеров (ФК)		Система социальных характеристик (СХ) и кластеров социальных характеристик (КСХ) МСО									
		КСХ-01				КСХ-02					
		СХ-01-01	СХ-01-02	СХ-01-03	...	СХ-02-01	СХ-02-02	СХ-02-03	СХ-02-04	СХ-02-05	...
ФК-01 «.....»											
Ф-01-01	«.....»	0,05	0,00	0,00	..		0,00	0,05	0,00	0,00	..
Ф-01-02	«.....»	0,00	0,00	0,10	..		0,15	0,00	0,25	0,00	..
Ф-01-03	«.....»	0,00	0,05	0,00	..		0,00	0,30	0,00	0,05	..
...	...										
ФК-02 «.....»											
Ф-02-01	«.....»	0,00	0,20	0,00	..		0,30	0,05	0,00	0,15	..
Ф-02-02	«.....»	0,15	0,00	0,00	..	+	0,20	0,00	0,00	0,00	..
...	...										
...											

Если совокупность факторов D_{jg} , $g = \overline{1:t}$, формирует определенный факторный кластер A_j , $j = \overline{1:m}$, то каждая социальная характеристика B_k , $k = \overline{1:l}$, формируется как интегративное информационное подпространство, определяемое уровнем воздействия на МСО совокупности факторных кластеров A_j , $j = \overline{1:m}$, причем каждый факторный кластер имеет различную степень воздействия на формирование каждой социальной характеристики МСО B_k , $k = \overline{1:l}$, в результате его социализации. Этот процесс можно условно интерпретировать с помощью модели, представленной на рисунке 2.

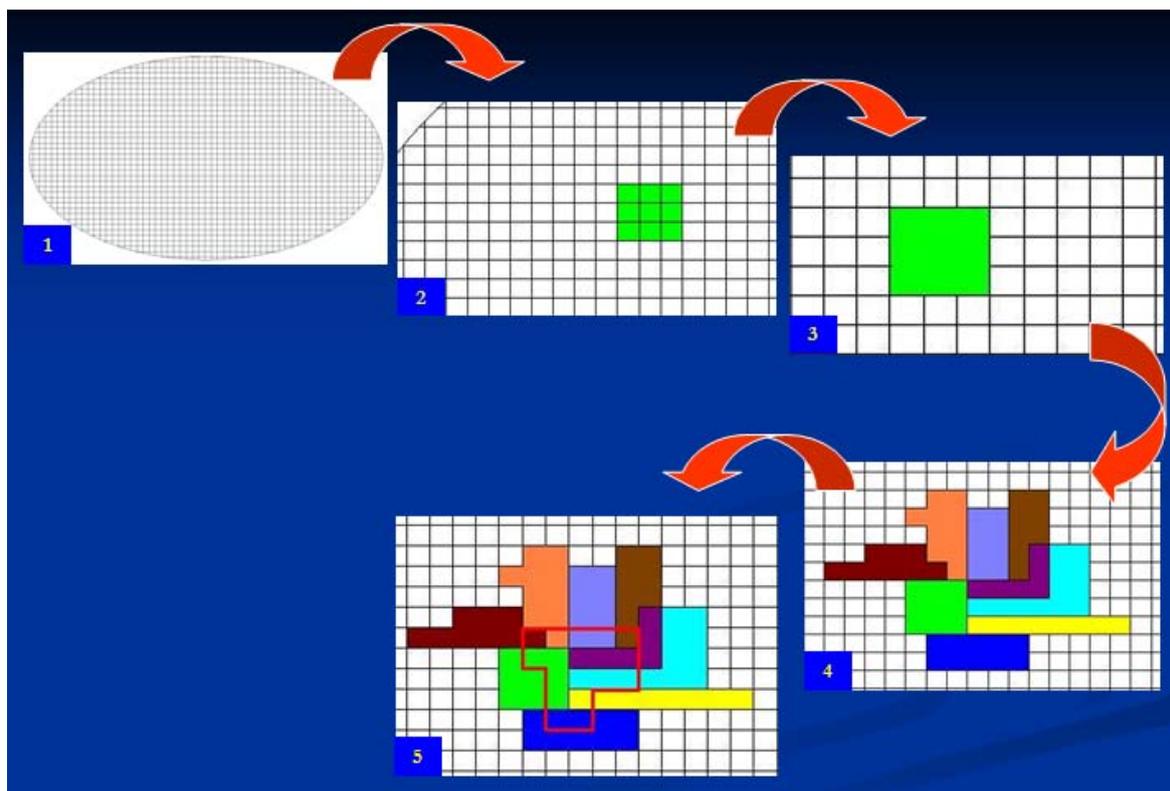


Рисунок 2 – Модель формирования подпространства социальной характеристики B_k , $k = \overline{1:l}$, (позиция 5) многопараметрического социального объекта на основе воздействия подмножества нескольких факторных кластеров A_j (позиция 4), формируемых на базе информационных пространств совокупности факторов D_i (позиция 2 и 3) - (фрагмент 2)

Пусть матрица соответствия устанавливает, что социальная характеристика B_k , $k = \overline{1:l}$, формируется под воздействием определенного подмножества факторных кластеров. Принципиально важным является тот факт, что любой факторный кластер A_j оказывает различное влияние на процесс формирования каждой социальной характеристики B_k . Таким образом, становится актуальным введение системы коэффициентов β_{jk} , которые характеризуют степень влияния факторного кластера A_j при формировании социальной характеристики B_k анализируемого МСО, причем целесообразно использовать такие значения β_{jk} , что $0 \leq \beta_{jk} \leq 1$ и $\sum_{k=1}^l \beta_{jk} = 1$. При этом для каждой социальной характеристики B_k , $k = \overline{1:l}$, возможны ситуации, когда факторный кластер A_j не оказывает влияния на ее формирование. В этом случае $\beta_{jk} = 0$: например, на фрагменте из таблицы 1 это соответствие фактора Ф-01-

01 и социальной характеристики СХ-01-02, фактора Ф-02-02 и социальной характеристики СХ-02-03 и т.д.

Если же во всем столбце, соответствующем анализируемой социальной характеристике, матрицы соответствия параметров модели отсутствуют знаки «+» с каждой строке, соответствующей совокупности факторов, сходящих в определенный факторный кластер, то это интерпретируется как отсутствие влияния данного факторного кластера на формирование анализируемой социальной характеристики. Например, в таблице 1: столбце, соответствующем социальной характеристике СХ-02-01 отсутствуют знаки «+» во всех строках, соответствующих факторному кластеру ФК-01; следовательно, этот факторный кластер не оказывает влияния на МСО при формировании его социальной характеристики СХ-02-01 в процессе социализации.

Кроме того, для подсистемы факторных кластеров $A_{j'k}$, $j' = \overline{1:m'}$ и $k = \overline{1:l}$, где $m' \leq m$, которые оказывают влияние на формирование социальной характеристики B_k , целесообразно установить пороговое значение β_k^{\min} такое, что если $\beta_{j'k} \leq \beta_k^{\min}$, то считается, что факторный кластер $A_{j'}$ оказывает незначительное влияние на формирование социальной характеристики B_k , поэтому можно положить $\beta_{j'k} = 0$.

3. В соответствии с качественными уровнями социализационного дифференциала [5] для каждой социальной характеристики B_k , $k = \overline{1:l}$, установим несколько уровней сформированности. Например:

- H_k^{\min} - пороговый уровень; характеризует такой уровень сформированности социальной характеристики B_k МСО, который позволяет говорить о том, что преодолен уровень «несоциализированного индивида» в отношении анализируемой социальной характеристики;

- H_k^v - продвинутый уровень; характеризует такой уровень сформированности социальной характеристики B_k МСО, который позволяет говорить о том, что индивид превошел низкий социальный уровень социализируемости в отношении анализируемой социальной характеристики;

- H_k^w - высокий уровень; характеризует такой уровень сформированности социальной характеристики B_k МСО, который позволяет говорить о том, что индивид превошел средний социальный уровень социализируемости в отношении анализируемой социальной характеристики.

Значения параметров H_k^{\min} , H_k^v и H_k^w определяются экспертно-аналитическими методами, как правило, с применением прикладного программного обеспечения (например, системы поддержки принятия решений «Expert Decide»). Кроме того, исходя из цели конкретного исследования, в ряде случаев целесообразно устанавливать или только значения порогового и высокого уровней, или, наоборот, вводить еще один дополнительный уровень, например, «повышенный».

В этой связи, уровень сформированности h_k , $k = \overline{1:l}$, социальной характеристики B_k для p -го объекта, на который в ходе процесса социализации осуществляет воздействие факторный кластер A_j , характеризуемый степенью воздействия s_{pj} , который имеет долевой уровень β_{jk} влияния на формирование социальной характеристики B_k , будет составлять $\beta_{jk} \cdot s_{pj}$ (рис. 3).

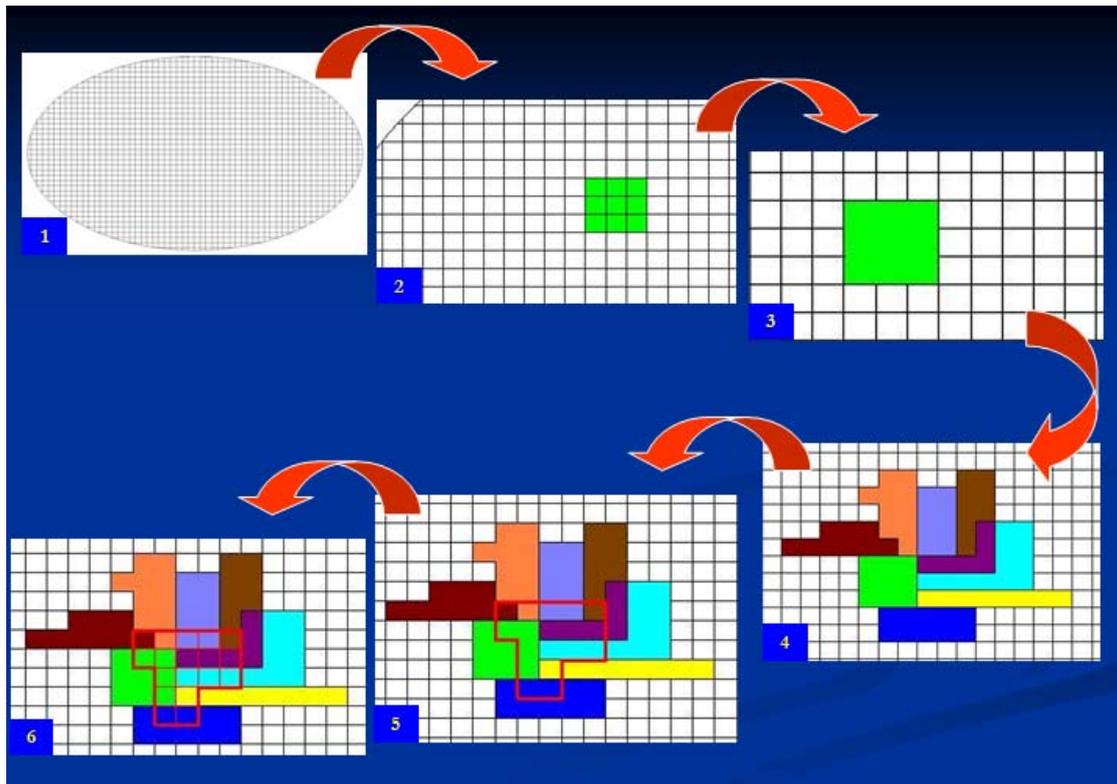


Рисунок 3 – Модель формирования социальной характеристики B_k МСО (позиции 5 и 6) посредством долевого влияния степеней воздействия факторных кластеров A_j (позиция 4), формируемых на базе информационных пространств подмножества факторов D_i (позиции 2 и 3) - (фрагмент 3)

Если в формировании социальной характеристики B_k МСО участвует подмножество факторных кластеров A_j , $j' = \overline{1:m'}$, то для p -го объекта уровень сформированности h_{pk} компетенции B_k можно охарактеризовать несколькими способами, например:

- по уровню достижения максимального значения среди всех имеющихся уровней степень воздействия кластерных факторов $A_j \subset \{A_j\}$, $j = \overline{1:m}$, $j' = \overline{1:m'}$ и оказывающих суперпозиционное влияние на уровень сформированности социальной характеристики B_k , $k = \overline{1:l}$, т.е.:

$$h_{pk} = \max \{s_{pj'k}; j' = \overline{1:m'}\} \quad (5)$$

- по уровню достижения минимального значения среди всех имеющихся уровней степень воздействия кластерных факторов $A_j \subset \{A_j\}$, $j = \overline{1:m}$, $j' = \overline{1:m'}$ и оказывающих суперпозиционное влияние на уровень сформированности социальной характеристики B_k , $k = \overline{1:l}$, т.е.:

$$h_{pk} = \min \{s_{pj'k}; j' = \overline{1:m'}\} \quad (6)$$

- по уровню достижения среднего значения среди всех имеющихся уровней степень воздействия кластерных факторов $A_j \subset \{A_j\}$, $j = \overline{1:m}$, $j' = \overline{1:m'}$, скорректированных по степени влияния $\beta_{j'k}$ факторного кластера A_j на формирование социальной характеристики B_k , $k = \overline{1:l}$, и оказывающих суперпозиционное влияние на уровень ее сформированности, т.е.:

$$h_{pk} = \frac{\sum_{j'=1}^{m'} \beta_{j'k} \cdot s_{pj'k}}{m'} \quad (7)$$

Полученные соотношения представляют *математическую модель квалиметрии и типизации объектов процесса социализации* позволяют осуществлять количественную оценку уровней сформированности социальных характеристик социализируемых МСО, а также реализовывать задачи квалиметрического анализа, дифференцируя рассматриваемую совокупность социальных объектов по наличию какого-либо приоритетного признака (социальной характеристики) и выявляя потенциальную возможность проведения впоследствии их типической группировки.

Таким образом, сформированная математическая модель решает еще и задачу типизации анализируемых МСО по наличию приоритетных компонентов, преодолевающих установленные пороговые уровни, в структуре значений $h_{p1}; h_{p2}; \dots; h_{pv}; \dots; h_{pl}$. Она позволяет исследуемый объект либо ассоциировать с определенным типом социальных объектов, либо установить его принадлежность к определенной социальной группе, либо выделить явного или латентного лидера этой группы.

ВЫВОД

1. При разработке аксиоматического базиса математической модели квалиметрии и типизации многопараметрических социальных объектов процесс социализации индивида характеризуется двумя системами показателей: системой факторов, раскрывающей степень воздействия факторов на социальный объект, и системой характеристик, которые приобретает социальный объект в процессе социализации и характеризующих уровень сформированности его собственных характеристик. Между ними можно установить зависимость сначала в форме матрицы соответствий, а затем в виде математической вариативной модели, описывающей эту зависимость.

2. При задании определенных начальных условий, учитывающих специфику использования модели для конкретного подпроцесса, в обеих системах целесообразно осуществлять кластеризацию. Вариативность модели обеспечивается использованием в составе модели долевых коэффициентов уровня значимости каждого фактора в составе факторного кластера и степени влияния факторного кластера при формировании социальной характеристики объекта социализации и определяемых экспертным путем, исходя из особенностей формирования и развития социализирующей среды.

3. Совокупность анализируемых МСО формируется на основе их выделения из всей совокупности имеющихся социальных объектов по наличию какого-либо приоритетного признака. Вариативность значений показателей, описывающих уровень сформированности собственных характеристик каждого анализируемого МСО, создает возможность формирования их типической группировки, применяя методы квалиметрии социальных объектов.

4. Разработанную математическую модель квалиметрии и типизации объектов процесса социализации, представленную в форме совокупности аналитических зависимостей, целесообразно применить к решению частных исследовательских задач, например, оценивания качества реализации процесса профессиональной социализации молодых специалистов с целью их последующего отбора при формировании кадровой базы современного наукоемкого производства [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-01-00147 а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азгальдов, Г.Г. Квалиметрия жизни [Текст] / Г.Г. Азгальдов, В.Н. Бобков, В.Я. Ельмеев, Ю.С. Перевощиков, В.А. Беляков. – Ижевск: Издательство Института экономики и управления УдГУ, 2006. – 820 с.
2. Васильев, В.И. Статистический анализ многомерных объектов произвольной природы [Текст] / В.И. Васильев, В.В. Красильников и др.. – М.: Издательство ИКАР, 2004. - 382 с.
3. Волкова, В.Н. Основы теории систем и системного анализа [Текст] / В.Н.Волкова, А.Л. Денисов. - Спб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. - 513 с.
4. Морозова, А.В. Применение квалиметрических методов в оценке специалиста технического профиля // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии [Текст] / А.В. Морозова. – 2010. - № 5(283). – С. 105-110.

5. Морозова, А.В. Управление профессиональной социализацией студентов в условиях многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров для машиностроения. Монография [Текст] / А.В. Морозова; Под ред. д.т.н., проф. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 230 с.

6. Морозова, А.В. Применение квалиметрических методов в оценке специалиста технического профиля // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии [Текст] / А.В. Морозова. – 2010. - № 5(283). – С. 105-110.

7. Морозова, А.В. Аксиоматический базис модели квалиметрии и типизации многопараметрического социального объекта в процессе социализации и матрица соответствия ее параметров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии [Текст] / А.В. Морозова, Д.Е. Тарасов, М.В. Алисова. – 2013. - № 4. – С. 8-15.

8. Рудинский, И.Д. Основы формально-структурного моделирования систем обучения и автоматизации педагогического тестирования знаний [Текст] / И.Д. Рудинский. - М.: Горячая линия - Телеком, 2004. - 204 с.

9. Спасибенко, С.Г. Социализация человека // Социально-гуманитарные знания [Текст] /. - 2002. - № 5. - С. 101-122.

10. Ковалева, А.И. Концепция социализации молодежи: нормы, отклонения, социализационная траектория // Социологические исследования [Текст] / А.И. Ковалева. - 2003. - № 1. - С. 109-114.

Морозова Анна Валентиновна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»

Кандидат социологических наук, заместитель директора по НИР Технологического института им. Н.Н. Поликарпова

Тел.: (4862) 555524

E-mail: notiostu@gmail.com

Василенко Юрий Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

Кандидат технических наук, директор Технологического института имени Н.Н. Поликарпова

E-mail: vyuv-post@yandex.ru

Алисова Марина Владимировна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

заведующий лабораторией «Вычислительная техника и программирование»

302030, г. Орел, ул. Московская, 34

E-mail: prtiostu@gmail.com

A.V. MOROZOVA, Yu.V. VASILENKO, M.V. ALISOVA

**MATHEMATICAL MODEL OF QUALIMETRY AND TYPIFICATION
OF OBJECTS OF PROCESS OF SOCIALIZATION IN THE CONDITIONS
OF THE EXTERNAL VAGUENESS AND MATRIX
OF ACCORDANCE HER PARAMETERS**

In the article experience is analysed of development of mathematical model of qualimetry and typification of many-parameters social objects of process of socialization, taking into account the terms of external vagueness during realization of this process, that is based on procedure of formalization of informative spaces of the system of factors/of factor clusters and system of descriptions/of clusters of descriptions that is acquired by a social object in the process of socialization.

Presented by the collective of authors a model of qualimetry and typification of many-parameters social objects of process of socialization is basis for development of technology of qualimetry of evaluation of level of formed of socially-professional competences of specialists for an innovative machine-building production.

Keywords: *algorithm, qualimetry, model, social object.*

BIBLIOGRAPHY

1. Azgal'dov, G.G. Kvalimetrija zhizni [Tekst] / G.G. Azgal'dov, V.N. Bobkov, V.Ja. El'meev, Ju.S. Perevoshnikov, V.A. Beljakov. – Izhevsk: Izdatel'stvo Instituta jekonomiki i upravlenija UdGU, 2006. – 820 s.

2. Vasil'ev, V.I. Statisticheskij analiz mnogomernyh ob#ektov proizvol'noj prirody [Tekst] / V.I. Vasil'ev, V.V. Krasil'nikov i dr.. – М.: Izdatel'stvo IKAR, 2004. - 382 s.

3. Volkova, V.N. Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza [Tekst] / V.N.Volkova, A.L. Denisov. - Spb.: Izd-vo SPbGTU, 2001. - 513 s.
4. Morozova, A.V. Primenenie kvalimetriceskikh metodov v ocenke specialista tehničeskogo profilja // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii [Tekst] / A.V. Morozova. – 2010. - № 5(283). – S. 105-110.
5. Morozova, A.V. Upravlenie professional'noj socializaciej studentov v uslovijah mnogourovnevoj praktikoorientirovannoj sistemy podgotovki kadrov dlja mashinostroenija. Monografija [Tekst] / A.V. Morozova; Pod red. d.t.n., prof. A.V. Kiricheka. – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. – 230 s.
6. Morozova, A.V. Primenenie kvalimetriceskikh metodov v ocenke specialista tehničeskogo profilja // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii [Tekst] / A.V. Morozova. – 2010. - № 5(283). – S. 105-110.
7. Morozova, A.V. Aksiomatičeskij bazis modeli kvalimetrii i tipizacii mnogoparametričeskogo social'nogo ob#ekta v processe socializacii i matrica sootvetstvija ee parametrov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii [Tekst] / A.V. Morozova, D.E. Tarasov, M.V. Alisova. – 2013. - № 4. – S. 8-15.
8. Rudinskij, I.D. Osnovy formal'no-strukturnogo modelirovanija sistem obuchenija i avtomatizacii pedagogičeskogo testirovanija znanij [Tekst] / I.D. Rudinskij. - M.: Gorjachaja linija - Telekom, 2004. - 204 s.
9. Spasibenko, S.G. Socializacija čeloveka// Social'no-gumanitarnye znanija [Tekst] /. - 2002. - № 5. - S. 101-122.
10. Kovaleva, A.I. Koncepcija socializacii molodezhi: normy, otklonenija, socializacionnaja traektorija // Sociologičeskie issledovanija [Tekst] / A.I. Kovaleva. - 2003. - № 1. - S. 109-114.

Morozova Anna Valentinovna

FSBEI HVT «State University – ESPC»

Can.Sc. soc., Deputy Director of the Institute for scientific research works Polikarpov Technological Institute

Tel.: (4862) 555524

E-mail: niotiostu@gmail.com

Vasilenko Yuriy Valerievich

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Can.Sc. tech., Director of the Polikarpov Technological Institute

Тел.: (4862) 555524

E-mail: vyuv-post@yandex.ru

Alisova Marina Vladimirovna

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Manager by a laboratory « Computing engineering and programming »

Tel.: (4862) 555553

E-mail: prtiosu@gmail.com

И.Ф. ШАДРИН

ЖЁСТКИЕ СТЕРЖНИ НА ДВУМЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ. ОГРАНИЧЕННЫЙ СТРАННЫЙ ФРАКТАЛ. АГРЕГАТЫ (КЛАСТЕРЫ)

Для изучения локальной структуры в системе твёрдых стержней, находящихся на двумерной (2d) поверхности, было использовано компьютерное моделирование методом Монте-Карло. При анализе физических характеристик спонтанно возникающих структур из стержней (агрегаты, кластеры) обнаружены две области линеаризации этих характеристик по критериям кластерообразования: поперёк ориентации агрегата – в двойных логарифмических координатах, в продольном направлении ориентации – в полулогарифмических координатах. Агрегат (кластер) из стержней в поперечном направлении относительно оси ориентации является сложным и ограниченным фракталом, а в продольном направлении его физические характеристики имеют сложную экспоненциальную зависимость.

Ключевые слова: жёсткие стержни, агрегат, кластер, структурообразование, объёмное взаимодействие, характеристики кластеров, фрактал, скейлинг.

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование поведения двумерных твёрдых анизотропных молекул играет важную роль в понимании жидкокристаллического поведения на плоской поверхности. В отсутствие сил притяжения фазовое поведение и локальная структура однородных систем определяются балансом энтропии. Двумерные системы стержней с жёстким потенциалом взаимодействия привлекают исследователей широкой распространённостью в природе и своей простотой для аналитических и экспериментальных исследований. Экспериментально и теоретически исследуются, например, системы с вирусными частицами [1-4], псевдожидкие состояния системы стержней и сфер (вибро-оживлённые) [5-7] и компьютерное моделирование [8]. Как правило, в данных работах приводятся и аналитические выкладки по анализу проведённых исследований.

Наша работа направлена на изучение и описание локальной структуры в 2d-системах анизотропных частиц и уточнение морфологических структур, возникающих в этих системах, посредством введения структурообразующего элемента – агрегата (кластера) [9-12]. Под агрегатом (кластером) мы понимаем образование из рядом расположенных стержней, пространственное расположение которых удовлетворяет определённым критериям. Агрегаты (кластеры) можно обнаруживать и при низких, и при высоких концентрациях стержней. Некоторые мезофазы в системах жёстких стержней и их сосуществование в 2d-системах анизотропных частиц можно описать через иерархию агрегатов различной степени «плотности и упорядоченности».

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Нами исследовалась континуальная двумерная система твёрдых стержней (дископрямоугольников) с осевыми отношениями $L/D = 6; 15; 30$ (L, D – длина и диаметр стержня соответственно), между которыми имеется только объёмно-топологическое взаимодействие, что является характерным для лиотропных жидкокристаллических систем. Для уменьшения граничных эффектов использовались периодические граничные условия. Для проведения расчётов нами была выбрана система из $N = 1600$ стержней и исследовались три характерных области концентрации: низкая – (10%); средняя – (30%) и плотная – (50%) [11, 12]. Анализ образующейся локальной структуры стержней удобно проводить по критериям, приведенным в работах [9, 12]; в данной статье мы используем адаптированные геометрические критерии агрегатообразования к физически интерпретируемым в терминах агрегации (кластерообразования) модифицированной теории Асакуры-Оосавы [5] и работ, непосредственно использующих энтропийное взаимодействие [5, 7] (depletion interacting).

На рисунке 1 изображены кластеры (агрегаты) для различных значений параметров критерия кластерообразования (ПКК). Рисунок 1а показывает кластер с наибольшими значениями ПКК ($\gamma = 1.0; \beta = 1.0$), то есть наиболее «рыхлый» из исследованных нами типов кла-

стерев. На рисунке 1б показан более компактный тип кластеров со значениями ПКК ($\gamma = 0.4$; $\beta = 0.4$). Параметр ПКК γ – это параметр, контролирующий близость стержней в поперечном (перпендикулярном) направлении оси стержней, и мы называем его поперечной компонентой ПКК. Соответственно параметр ПКК β , контролирующий близость центров стержней в продольном (параллельном) направлении оси стержней, – продольной компонентой ПКК.

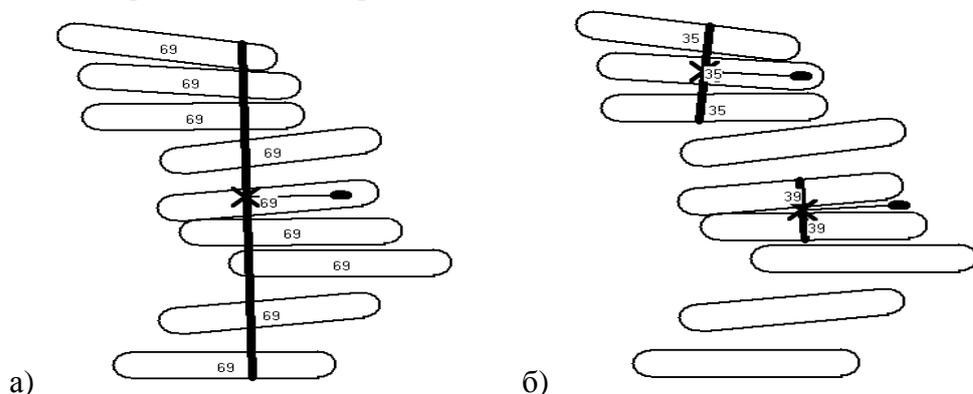


Рисунок 1 – Кластеры с разными значениями ПКК: а) $\gamma = 1.0$; $\beta = 1.0$; б) $\gamma = 0.4$; $\beta = 0.4$; при осевом отношении стержней $L/D = 6$. Крестиком обозначен центр тяжести кластера.

Директор ориентации кластера (с точностью $-\pi, \pi$) – тонкая линия, выходящая из центра тяжести кластера, имеет на конце отрезка утолщение. Толстая линия, перпендикулярная директору ориентации кластера, проходящая через центр тяжести кластера и касающаяся внешних стенок стержня, – поперечная ширина кластера и она же – «поперечная ось». Цифры в центре стержней – порядковый номер кластера

Директор ориентации кластера – это направление наибольшей степени ориентации кластера, определяется с точностью $-\pi, \pi$. Поперечная ось кластера – это перпендикуляр, проходящий через центр масс кластера к директору ориентации кластера. Поперечный размер кластера – это расстояние по поперечной оси кластера между внешними поверхностями наружных стержней кластера. Отклонение центров стержней от поперечной оси – это среднеквадратичное расстояние от поперечной оси кластера и центра стержней.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рисунке 2 приведены нормированные гистограммы двумерного распределения поперечной ширины кластера для двух разных значений ПКК, по 40960 измерений в системе 1600 стержней. На рисунке 2а показаны гистограммы с наибольшими значениями ПКК ($\gamma = 1.0$; $\beta = 1.0$), а на рисунке 2б – гистограммы с меньшими значениями ПКК ($\gamma = 0.4$; $\beta = 0.4$).

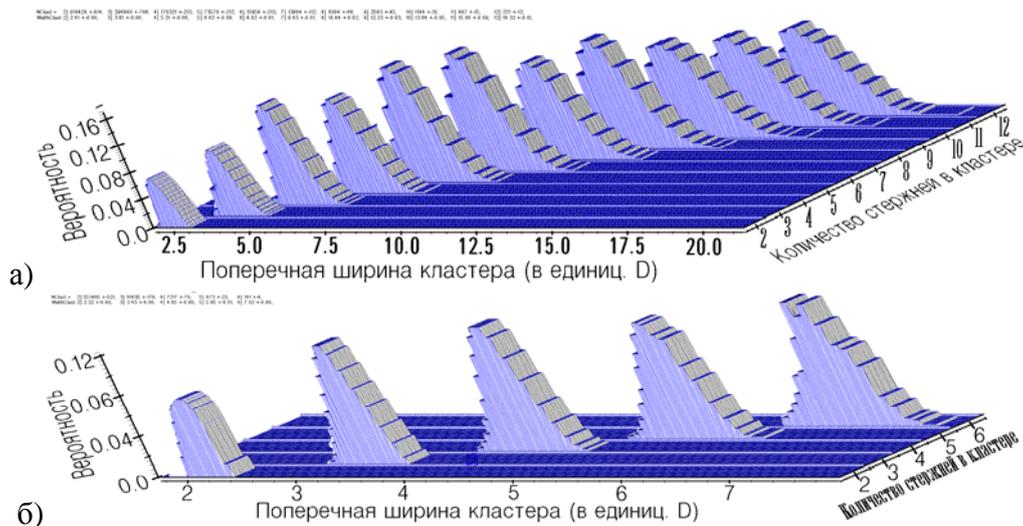


Рисунок 2 – Гистограммы нормированных распределений средней поперечной ширины кластера с разными значениями ПКК а) $\gamma = 1.0$ и $\beta = 1.0$; б) $\gamma = 0.4$ и $\beta = 0.4$. Количественная статистика показана в тексте.

На рисунках 3÷7 изображены измеренные средние физические характеристики кластеров в функции параметра ПКК γ , линейризующихся в двойных логарифмических координатах, то есть имеющие степенную зависимость для всех анализируемых осевых отношений стержней $L/D = 6; 15; 30$, и характерных концентраций системы стержней.

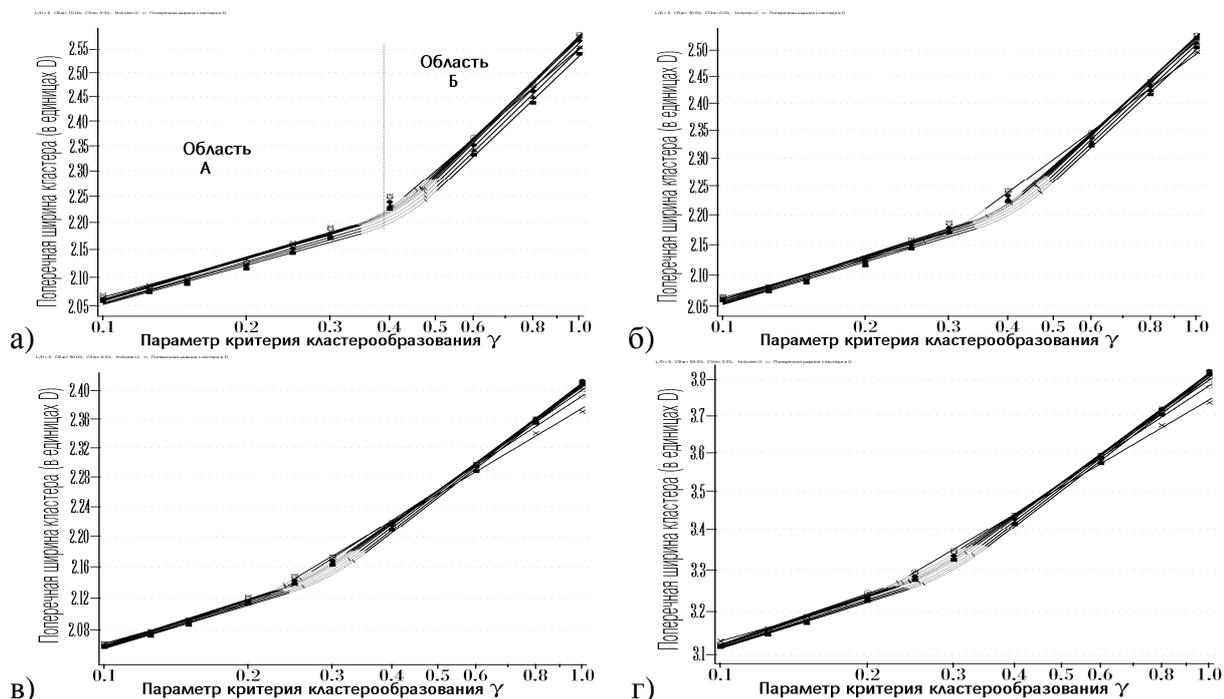


Рисунок 3 – Зависимость поперечной ширины кластера, состоящего: (а, б, в) из двух стержней и (г) из трёх стержней, в функции параметра ПКК γ при осевом отношении стержней $L/D = 6$ и различных концентрациях стержней: а) = 10%; б) = 30%; в, г) = 50%. Параметр β имеет значения: \times -0.1; \circ -0.15; \triangle -0.2; \square -0.25; \diamond -0.3; ∇ -0.4; \bullet -0.6; \blacktriangle -0.8; \blacksquare -1.0.

Область линейризации «А» – для малых значений параметра ПКК γ , область «Б» – для больших значений. В этих областях мы имеем функциональную зависимость:

$$Y(\gamma) = a_0 * \gamma^{a_1}, \quad (1)$$

где $Y(\gamma)$ – измеренная физическая характеристика кластера; a_0, a_1 – константы, определяемые по расчётным данным численного эксперимента.

Области линейризации «А» и «Б» (рис. 3, 4) отображаются двумя толстыми прямыми. Переходный интервал между областями линейризации данных «сшит гладко» полиномом третьей степени. Подгонка параметров прямых, области линейризации и полинома «гладкой сшивки» с условием монотонности в переходной области произведены по методу наименьших квадратов. На графиках переходный интервал отображается тонкой линией и в области наибольшей кривизны помечен пересечением коротким отрезком линии.

На (рис. 3а – 3в) показана средняя поперечная ширина кластера, состоящего из двух стержней, а на (рис. 3г) – состоящего из трёх стержней для осевого отношения стержня $L/D = 6$. Максимальная величина средней ширины кластера имеет тенденцию уменьшаться с увеличением концентрации системы стержней; дополнительно, для плотной концентрации стержней происходит смещение переходной области в сторону уменьшения. Данное поведение характерно для всех исследованных осевых отношений стержней (рис. 3, 4). Как видно из графиков, средняя поперечная ширина кластера слабо зависит от продольной компоненты ПКК β .

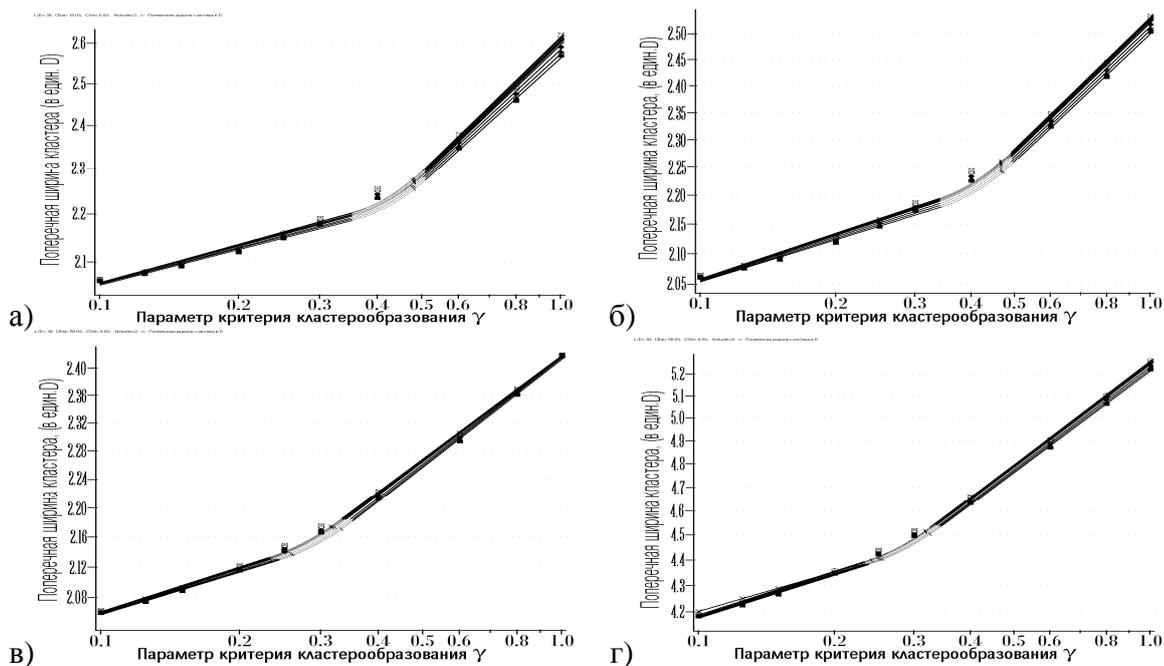


Рисунок 4 – Зависимость поперечной ширины кластера, состоящего: (а, б, в) из двух стержней и (г) из четырёх стержней, в функции параметра ПКК γ при осевом отношении стержней $L/D = 30$ и различных концентрациях стержней: а) = 10%; б) = 30%; в, г) = 50%.

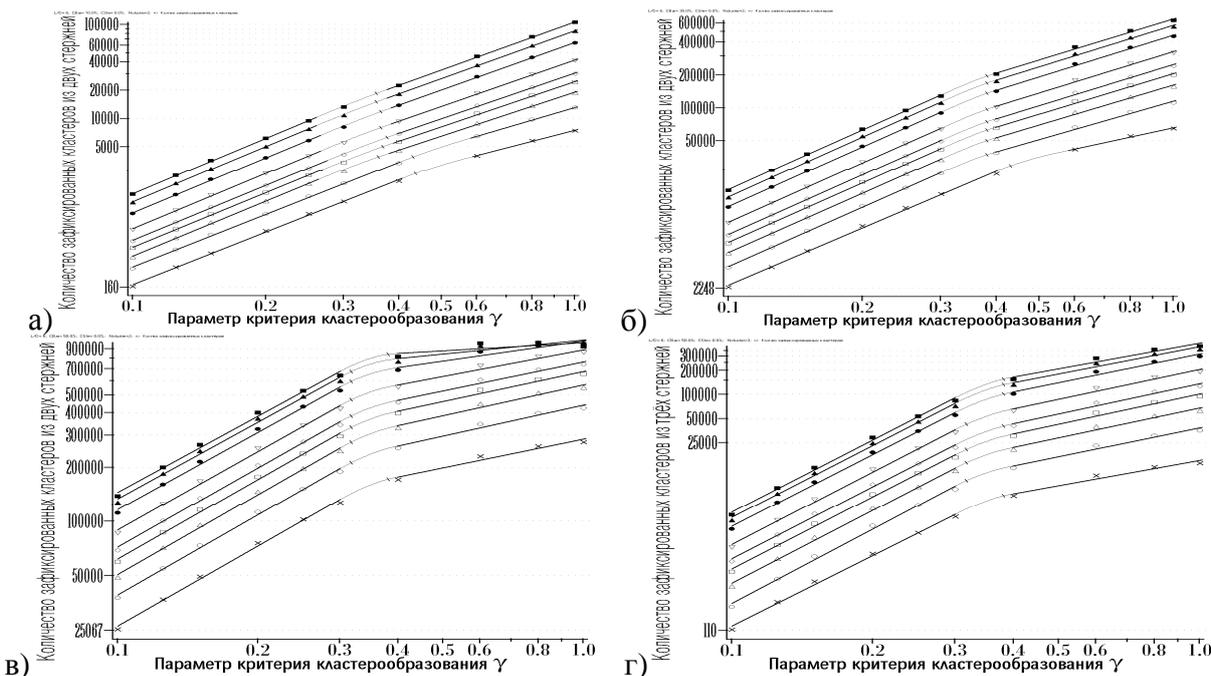


Рисунок 5 – Зависимость количества зафиксированных кластеров: (а, б, в) из двух стержней и (г) из трёх стержней, в функции параметра ПКК γ при осевом отношении стержней $L/D = 6$ и различных концентрациях стержней: а) = 10%; б) = 30%; в, г) = 50%

На графиках показаны характеристики кластеров, состоящих в основном из двух стержней (для низких концентраций стержней), потому что для кластеров, состоящих из большего числа стержней, для малых значений ПКК статистика мала или они не обнаружены, в виду ограниченности счётной траектории [10]. Для большой концентрации стержней 50% показаны характеристики кластера из четырёх стержней и для малых значений ПКК. Надёжность (достоверность) статистически обработанных данных иллюстрируют графики (рис. 5), показывающие количество зарегистрированных кластеров в функции поперечного параметра ПКК γ . Количественные характеристики числа зарегистрированных кластеров, как и другие измеренные характеристики кластеров, имеют функциональное поведение, соглас-

но ур. 1. Завал в поведении прямых при больших значениях ПКК (рис. 5в) дополнительно подтверждает, что система стержней при 50% концентрации становится насыщенной для «рыхлых» кластеров [11].

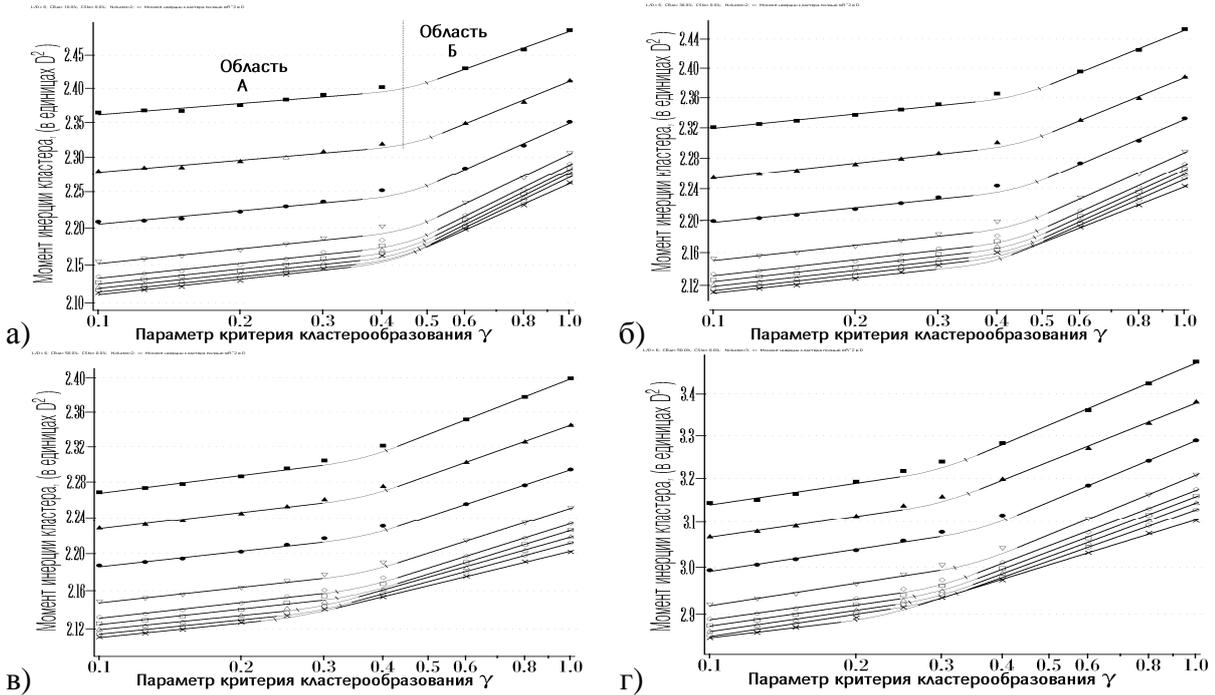


Рисунок 6 – Зависимость момента инерции кластера, состоящего: (а, б, в) из двух стержней; (г) из трёх стержней, в функции параметра ПКК γ при осевом отношении стержней $L/D = 6$ и различных концентрациях стержней: а) = 10%; б) = 30%; в, г) = 50%.

Весьма важной физической характеристикой кластера является момент его инерции. Поведение момента инерции в функции параметра ПКК γ показано на (рис. 6, 7). Графики подтверждают, что момент инерции имеет степенную зависимость. Для больших осевых отношений разница в наклонах прямых в области «А» и «Б» проявлена в меньшей степени.

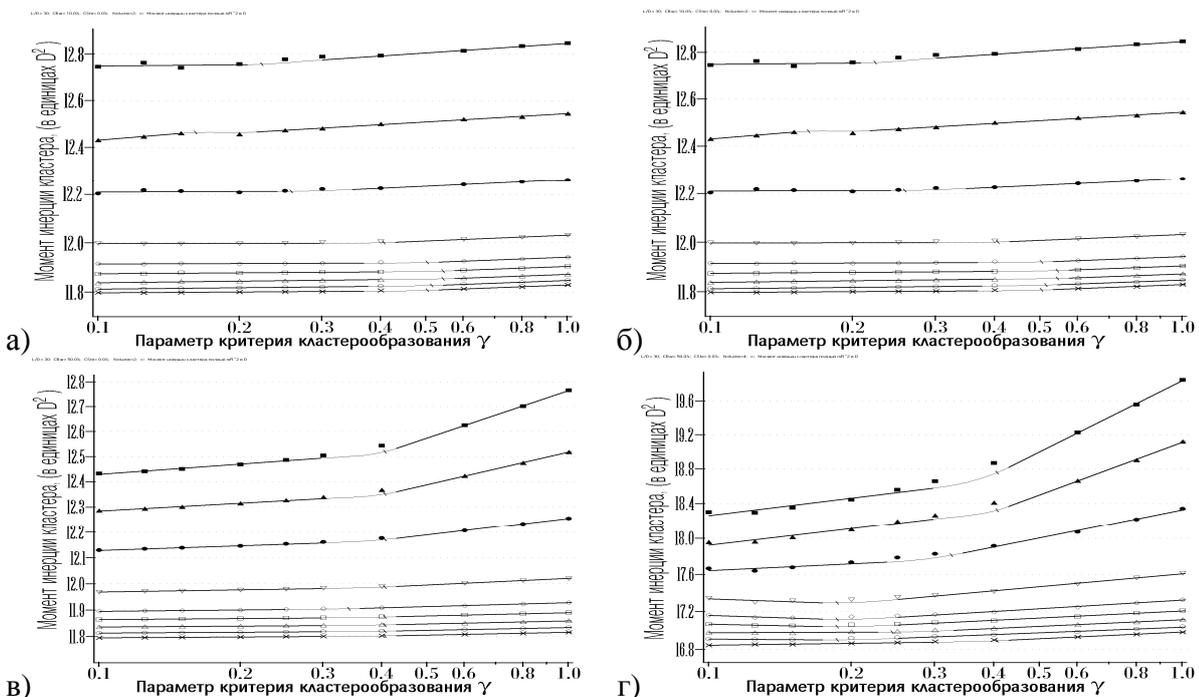


Рисунок 7 – Зависимость момента инерции кластера, состоящего: (а, б, в) из двух стержней и (г) из четырёх стержней, в функции параметра ПКК γ при осевом отношении стержней $L/D = 30$ и различных концентрациях стержней: а) = 10%; б) = 30%; в, г) = 50%.

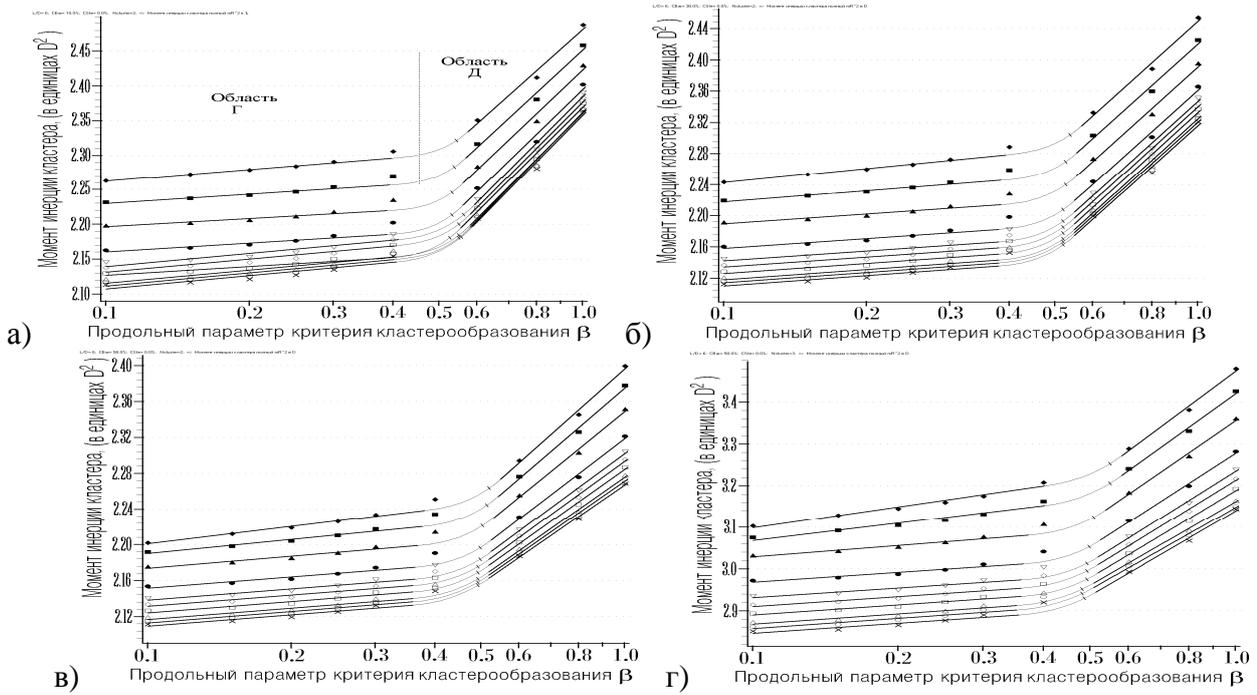


Рисунок 8 – Зависимость момента инерции кластера, состоящего: (а, б, в) из двух стержней; (г) из трёх стержней, в функции параметра ПКК β при различных значениях параметра χ имеющего значения: \times -0.1; \circ -0.125; \triangle -0.15; \square -0.2; \diamond -0.25; ∇ -0.3; \bullet -0.4; \blacktriangle -0.6; \blacksquare -0.8; \blacklozenge -1.0, при осевом отношении стержней $L/D = 6$ и различных концентрациях: а) = 10%; б) = 30%; в) = 50%

Выше мы описывали поведение момента инерции в функции поперечной компоненты ПКК, а в функции параметра ПКК β поведение момента инерции имеет свои особенности. На (рис. 8, 9) выявлены две области, линеаризующиеся в полулогарифмических координатах по параметру ПКК β :

$$Y(\beta) = b_0 + b_1 * Ln(\beta), \tag{3}$$

где $Y(\beta)$ – измеренная характеристика кластера; b_0, b_1 – константы, определяемые по расчётным данным численного эксперимента.

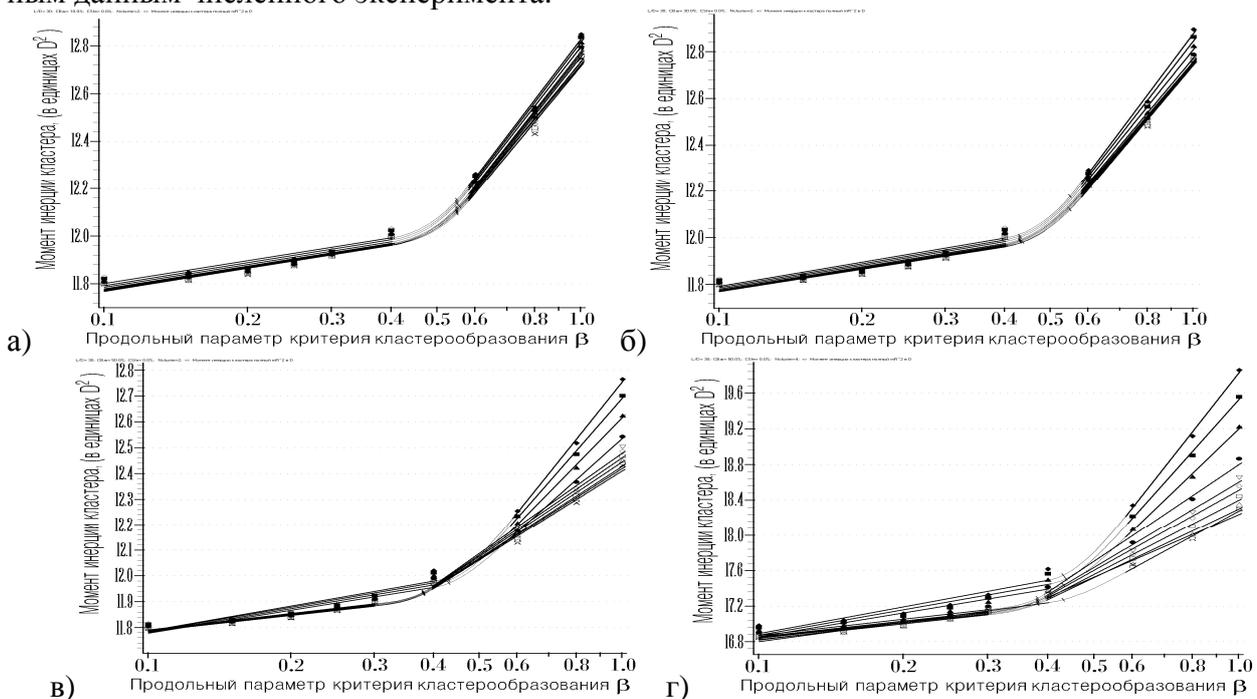


Рисунок 9 – Зависимость момента инерции кластера, состоящего: (а, б, в) из двух стержней и (г) из четырёх стержней, в функции параметра ПКК β при различных значениях параметра χ при осевом отношении стержней $L/D = 30$ и различных концентрациях: а) = 10%; б) = 30%; в) = 50%.

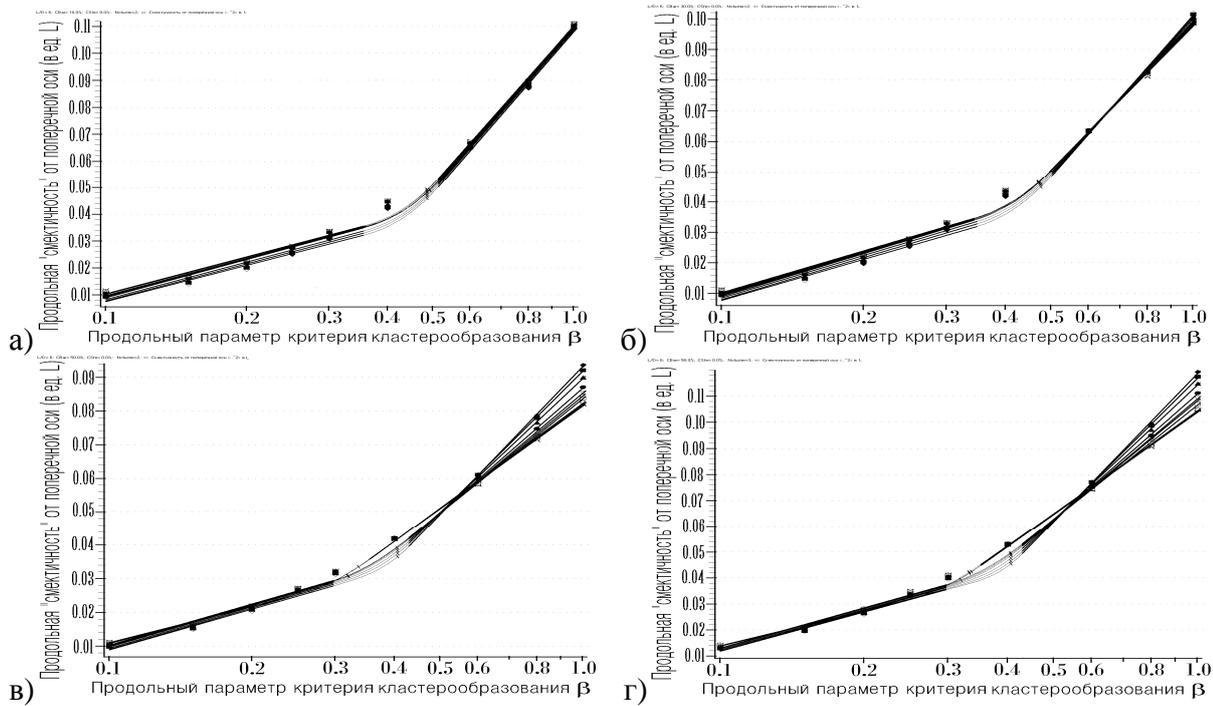


Рисунок 10 – Среднеквадратичное отклонение центров стержней от «поперечной оси» кластера, состоящего: (а, б, в) из двух стержней; (г) из трёх стержней, в функции параметра ПКК β при различных значениях параметра χ , при осевом отношении стержней $L/D = 6$ и различных концентрациях: а) = 10%; б) = 30%; в, г) = 50%.

Области линеаризации «Г» и «Д» на (рис. 8, 9) отображаются двумя толстыми прямыми. Переходный интервал между областями «Г» и «Д» линеаризации данных «сшит» непрерывно и гладко полиномом третьей степени. Подгонка параметров прямых, области линеаризации и полинома «гладкой сшивки» с условием монотонности в переходной области произведены по методу наименьших квадратов. На графиках (рис. 8, 9) переходный интервал отображается тонкой линией и в области наибольшей кривизны помечен пересечением коротким отрезком линии.

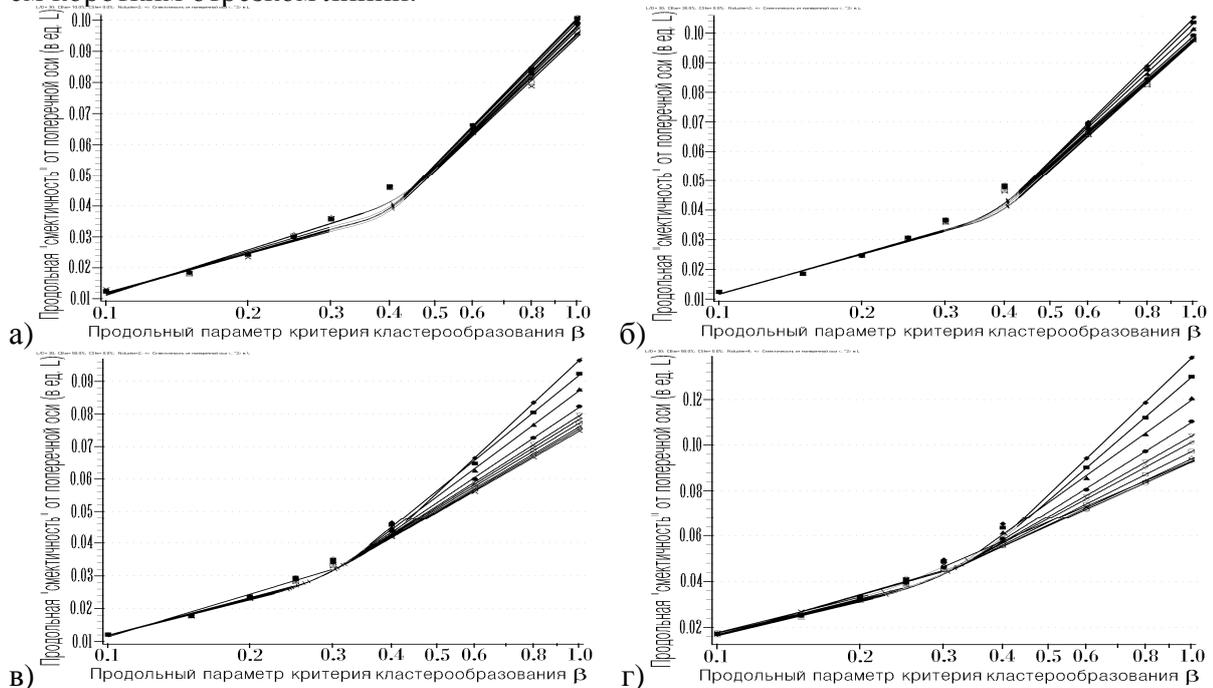


Рисунок 11 – Среднеквадратичное отклонение центров стержней от «поперечной оси» кластера, состоящего: (а, б, в) из двух стержней; (г) из четырёх стержней, в функции параметра ПКК β при различных значениях параметра χ , при осевом отношении стержней $L/D = 30$ и различных концентрациях: а) = 10%; б) = 30%; в, г) = 50%.

Среднеквадратичное отклонение центров стержней от «поперечной оси» показано на (рис.10, 11), при повышении концентрации стержней в системе происходит поджатие кластера и в продольном направлении. Для всех анализируемых осевых отношений стержней наблюдаются одинаковые закономерности в концентрационной зависимости и значительные численные совпадения в относительных единицах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые численные эксперименты показали, что в системе 2d-стержней измеренные физические характеристики средних величин, спонтанно возникающих структур из стержней (агрегаты, кластеры), описываются универсальными функциональными зависимостями от параметров кластерообразования (ур. 1, 2) в широком диапазоне осевых отношений и концентраций стержней в системе. Причём для поперечных (соответствующий ПКК γ) и продольных (ПКК β) измеренных физических характеристик кластеров имеются свои особенности поведения. Например, поведение поперечной ширины, момента инерции и других измеренных характеристик в функции поперечной компоненты ПКК γ имеет две области степенной зависимости на масштабах диаметра стержня (рис. 3–7). Это позволяет говорить о фрактальном характере поведения этих измеренных физических характеристик, но в ограниченных пределах. Переходная область в степенной зависимости для низкой и средней концентрации системы стержней равна примерно 40% диаметра стержня, при большой концентрации стержней – примерно 30%.

Эти же измеренные физические характеристики в функции продольной компоненты ПКК β имеют уже две области экспоненциальной зависимости (рис. 8–11) на пространственных масштабах, примерно равных полудлине стержней. Переходная область в экспоненциальных зависимостях примерно равна 20% длины стержней.

Поведение физических характеристик кластеров (агрегатов) имеет сложную функциональную зависимость в ограниченных пределах пространства, которая, видимо, объясняется функциональным поведением энтропийного взаимодействия стержней на данном масштабе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Howard, J. Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton [Текст] / J. Howard // Sinauer, Sunderland, MA, 2001, pp. 198–283.
2. Doi, M. The Theory of Polymer Dynamics [Текст] / M. Doi, S.F. Edwards // Clarendon, Oxford, 1986.
3. Aranson, I.S. Pattern formation of microtubules and motors: Inelastic interaction of polar rods [Текст] / I.S. Aranson, I.S. Tsimring // Physical Review E 71, 050901 (2005).
4. Ziebert, F. Pattern formation driven by nematic ordering of assembling biopolymers [Текст] / F. Ziebert, W. Zimmermann // Physical Review E 70, 022902 (2004).
5. Galanis, J. Depletion forces drive polymer-like self-assembly in vibrofluidized granular materials [Текст] / J. Galanis, R. Nossala, D. Harries // Soft Matter, 2010, 6, 1026–1034.
6. Daniels, L.J. Dynamics of gas-fluidized granular rods [Текст] / L.J. Daniels, Y. Park, T.C. Lubensky, D.J. Durian // Physical Review E. 79, 041301 (2009).
7. Aranson, I.S. Swirling motion in a system of vibrated elongated particles [Текст] / I.S. Aranson, D. Volfson, S. Lev // Physical Review E 75, 051301 (2007).
8. Bates, M.A. Phase behavior of two-dimensional hard rod fluids [Текст] / M.A. Bates, D. Frenkel // J. of Chemical Physics 2000, V.112, N.22, p.10034-10041.
9. Shadrin, I.F. Computer simulation of a hard-rod system: Structural transitions and clusters [Текст] / I.F. Shadrin, M.R. Sharafutdinov, A.M. Elyashevich // J. Chemical information and computer sciences, 1994, V34, N2, 335-338p.
10. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры [Текст] / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. №3 (293). С.3-9.
11. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры II [Текст] / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. №4 (294). С.14-20.
12. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности и аномальное энтропийное взаимодействие. Агрегаты (кластеры) [Текст] / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. №1 (297). С.29-37.

Шадрин Иван Фёдорович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика»

302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29

E-mail: Ivshadr@mail.ru

I.F. SHADRIN

THE RIGID BARS ON THE TWO-DIMENSIONAL SURFACE. LIMITED STRANGE FRACTAL. UNITS (CLUSTERS)

For study of local frame in system of firm rods being on two-dimensional (2d) surfaces, computer simulations by a Monte-Carlo method has been used. At the analysis of physical performances of spontaneously originating frames from rods (assemblies, clusters) are detected two fields of a linearization of these performances by measure of clustering: across assembly orientation in double logarithmic coordinates, in an orientation lengthwise direction in semi-logarithmic coordinates. The assembly (cluster) from rods is crosswise concerning an orientation axis the complicated and restricted fractal, and in a lengthwise direction its physical performances have the complicated exponential law.

Keywords: the rigid rods, the assembly, a cluster, structure formation, volume interacting, performances of clusters, fractal, scale invariance.

BIBLIOGRAPHY

1. Howard, J. Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton [Tekst] / J. Howard // Sinauer, Sunderland, MA, 2001, pp. 198–283.
2. Doi, M. The Theory of Polymer Dynamics [Tekst] / M. Doi, S.F. Edwards // Clarendon, Oxford, 1986.
3. Aranson, I.S. Pattern formation of microtubules and motors: Inelastic interaction of polar rods [Tekst] / I.S. Aranson, I.S. Tsimring // Physical Review E 71, 050901 (2005).
4. Ziebert, F. Pattern formation driven by nematic ordering of assembling biopolymers [Tekst] / F. Ziebert, W. Zimmermann // Physical Review E 70, 022902 (2004).
5. Galanis, J. Depletion forces drive polymer-like self-assembly in vibrofluidized granular materials [Tekst] / J. Galanis, R. Nossala, D. Harries // Soft Matter, 2010, 6, 1026–1034.
6. Daniels, L.J. Dynamics of gas-fluidized granular rods [Tekst] / L.J. Daniels, Y. Park, T.C. Lubensky, D.J. Durian // Physical Review E. 79, 041301 (2009).
7. Aranson, I.S. Swirling motion in a system of vibrated elongated particles [Tekst] / I.S. Aranson, D. Volfson, S. Lev // Physical Review E 75, 051301 (2007).
8. Bates, M.A. Phase behavior of two-dimensional hard rod fluids [Tekst] / M.A. Bates, D. Frenkel // J. of Chemical Physics 2000, V.112, N.22, p.10034-10041.
9. Shadrin, I.F. Computer simulation of a hard-rod system: Structural transitions and clusters [Tekst] / I.F. Shadrin, M.R. Sharafutdinov, A.M. Elyashevich // J. Chemical information and computer sciences, 1994, V34, N2, 335-338p.
10. Shadrin, I.F. Zhjostkie sterzhni na dvumernoj poverhnosti. Klasteri [Tekst] / I.F. Shadrin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2012. №3 (293). S.3-9.
11. Shadrin, I.F. Zhjostkie sterzhni na dvumernoj poverhnosti. Klasteri II [Tekst] / I.F. Shadrin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2012. №4 (294). S.14-20.
12. Shadrin, I.F. Zhjostkie sterzhni na dvumernoj poverhnosti i anomal'noe jentropijnoe vzaimodej-stvie. Agregaty (klasteri) [Tekst] / I.F. Shadrin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2013. №1 (297). S.29-37.

Shadrin Ivan Fedorovich

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Candidate of physical and mathematical Sciences, associate Professor of the chair of Physics

302020, Orel, Hayropckoe highway, 29 D.

E-mail: Ivshadr@mail.ru

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПУСКОЗАЩИТНОЙ МУФТЫ

В работе рассмотрен метод расчета пускозащитной муфты в зависимости от основных параметров, обеспечивающих заданный темп разгона технологической машины.

Ключевые слова: технологическая машина, муфта, профилирование.

К приводам ряда технологических машин предъявляются довольно жесткие требования по ограничению их ускорения при пуске. Ограничение ускорения, как правило, обусловлено двумя причинами: с одной стороны – работоспособностью самой машины (ограничение по прочности), с другой стороны – требованиями технологического процесса. В ряде случаев для нормального протекания технологического процесса ускорение должно быть ограничено некоторой допускаемой величиной. Задача проектирования состоит в том, чтобы разработать такую конструкцию муфты, которая обеспечивала бы заданный темп разгона машины. Это позволило бы снизить динамические нагрузки в приводе, предохранив тем самым наиболее напряженные узлы привода от поломок, и обеспечить плавный разгон рабочей машины, особенно в случае больших инерционных масс. Решение задачи осложняется тем, что величина фрикционного момента, а, следовательно, и темп движения машины при разгоне, зависят от многих параметров пускозащитной муфты [1] и системы в целом: числа шаров и их массы, геометрии профиля регулирующего диска, величины предварительного поджатия нажимной пружины, ее жесткости, угловой скорости ведомой полумуфты, характеристики исполнительской машины и т.д. По существу, задача проектирования является многопараметрической.

При проектировании муфты определялись размеры двух узлов: фрикционного и регулирующего. Расчет фрикционного узла проводился на износостойкость по условию ограничения давления на фрикционных поверхностях с помощью известных методик [2, 3, 4]. В качестве расчетного принималось среднее значение фрикционного момента при разгоне машины:

$$T_{\phi} = 0,5(T_{\phi \max} + T_c),$$

где $T_{\phi \max}$ – максимальный фрикционный момент, T_c – момент сил сопротивления со стороны рабочей машины; величина этого момента берется с учетом коэффициента запаса сцепления муфты.

Основными параметрами узла регулирования муфты являются число и размеры шаров. Для их определения использовалось условие страгивания рабочей машины с места при следующих предположениях: фрикционный момент муфты при пуске рабочей машины равен моменту сил сопротивления в начале страгивания с учетом запаса сцепления; угловая скорость ведомой полумуфты вместе с рабочим органом исполнительной машины равна нулю; при проектных расчетах в первом приближении можно принять угол контакта шаров с регулирующим диском при пуске рабочей машины равным начальному углу контакта, угловую скорость сепаратора – равной половине угловой скорости ротора электродвигателя, расстояние от оси вращения муфты до центра тяжести шара – равным диаметру сепаратора. Из этого условия получено выражение для определения числа и массы шаров:

$$(z_{ш} m_{ш}) = \frac{\left(\frac{\sum k_{сц} T_{сп}}{\mu z_{тр} D_{ср}} + F_{в \max} \right) (\cos \beta_{к} + f \sin \beta_{к} + f)}{y_{к} \omega_{с}^2 \sin \beta_{к}},$$

где $k_{сц}$ – коэффициент запаса сцепления; $T_{сп}$ – момент сил полезного сопротивления рабочей машины при пуске; μ – коэффициент трения фрикционной пары; $z_{тр}$ – число поверхностей трения; $D_{ср}$ – средний диаметр фрикционных дисков; $y_{к}$ – расстояние от оси вращения муфты до центра тяжести шара; $F_{в \max}$ – максимальная сила сжатия возвратной пружины; $\omega_{с}$ – угловая скорость сепаратора; $\beta_{к}$ – угол контакта шара с регулирующим диском в момент соприкосновения фрикционных поверхностей.

Проверяем условие соседства шаров в сепараторе

$$2(r_c + r) \sin(\pi/z_{ш}) > (2r + \delta),$$

где r_c, r – радиусы сепаратора и шара; δ – зазор между шарами.

При проектировании муфты наиболее ответственным этапом является профилирование регулирующего диска, от формы рабочей поверхности которого зависит плавность разгона технологической машины. Когда момент сил сопротивления машины мало зависит от скорости, профиль регулирующего диска в осевом сечении может быть описан дугой окружности. Такая конструкция диска наиболее технологична.

Для определения параметров профиля регулирующего диска с постоянным радиусом кривизны используется выражения:

$$R = r + \frac{\Delta y}{(\cos \beta_n - \cos \beta_o)}; x_p = (R - r) \sin \beta_o; y_p = y_{min} - (R - r) \cos \beta_o,$$

где $x_p; y_p$ – координаты центра окружности, которой описан профиль регулирующего диска; y_{min} – наименьшее возможное положение центра тяжести шара, зависящее от размеров сепаратора и шаров, $y_{min} = r_c + r$; Δy – перемещение шара в радиальном направлении, $\Delta y = 0,5D_1 - r_c - 2r$; D_1 – наибольший диаметр фрикционных дисков; β_o – начальный угол контакта шара с регулирующим диском; β_n – угол контакта шара с регулирующим диском при передаче максимального крутящего момента, задается в первом приближении из условия самоторможения шаров: $\beta_n > 30^\circ$, максимальное значение β_n в конце разгона целесообразно ограничить $\beta_n = 50^\circ$.

Для нормальной работы регулирующего устройства должно выполняться условие:

$$F_{н min} > N_{фп},$$

где $F_{н min}$ – предварительное усилие поджатия нажимной пружины; $N_{фп}$ – усилие на фрикционных поверхностях при пуске рабочей машины.

$$N_{н min} = 1,1 [k_{шп} (N_{фп} + F_{в max})],$$

где $k_{шп}$ – коэффициент, учитывающий трение в шлицах при движении регулирующего диска относительно ведущей полумуфты, $k_{шп} = 0,9 - 0,95$.

Максимальное усилие нажимной пружины определяется из условия передачи максимального фрикционного момента:

$$F_{н max} = K_{шп} (N_{ср max} + F_{в max}).$$

Максимальное усилие на фрикционных дисках $N_{ср max} = 2T_{ф max} / (\mu z_{тр} D_{ср})$.

Максимальное усилие, которое должна создавать возвратная пружина

$$F_{в max} = K_{в} N_{ср max},$$

где $k_{в} = 0,1 - 0,15$.

Поскольку перемещение нажимного диска невелико (порядка 0,5-1,0мм), то величина $F_{в max}$ не должна сильно отличаться от предварительного усилия поджатия возвратной пружины $F_{в min}$, поэтому принимаем: $F_{в min} = (0,8 - 0,9)F_{в max}$. Все остальные расчеты параметров возвратной и нажимной пружин проводим по известным методикам [5, 6]. Приведенный выше расчет выполнен для регулирующего диска с постоянным радиусом кривизны, который обеспечивает плавный разгон машины в том случае, если момент сил сопротивления рабочей машины мало зависит от скорости.

В некоторых случаях момент сил сопротивления есть функция угловой скорости рабочего органа технологической машины (например, увеличивается с ростом скорости рабочего органа машины), и ускорение достигает своего максимального значения не в конце, а на промежуточном участке разгона. Поэтому рабочая поверхность регулирующего диска должна быть спрофилирована таким образом, чтобы ускорение в процессе всего разгона оставалось примерно постоянным. Это достигается, когда кривые момента сил сопротивления и

фрикционного момента оказываются эквидистантными. Для этого случая разработан метод проектирования профиля регулирующего диска. Работая поверхность диска подбирается таким образом, чтобы в процессе разгона машины при переменном моменте сил сопротивления угловое ускорение оставалось примерно постоянным, что обеспечивает наилучшим образом время включения муфты при заданном темпе разгона.

Профиль регулирующего диска необходимо задавать в координатной системе, связанной с регулирующим диском. Удобно координату x отсчитывать от торца диска, в который упирается нажимная пружина. Координата y отсчитывается от оси вращения муфты.

Координаты профиля регулирующего диска в исходном положении (рис. 1)

$$\begin{cases} x_{op} = h - r \sin \beta_0 \\ y_{op} = y_{min} + r \cos \beta_0 \end{cases}$$

где h – координата центра тяжести шара в исходном положении; задается конструктивно:

$$h = r + (3 - 5), \text{ мм.}$$

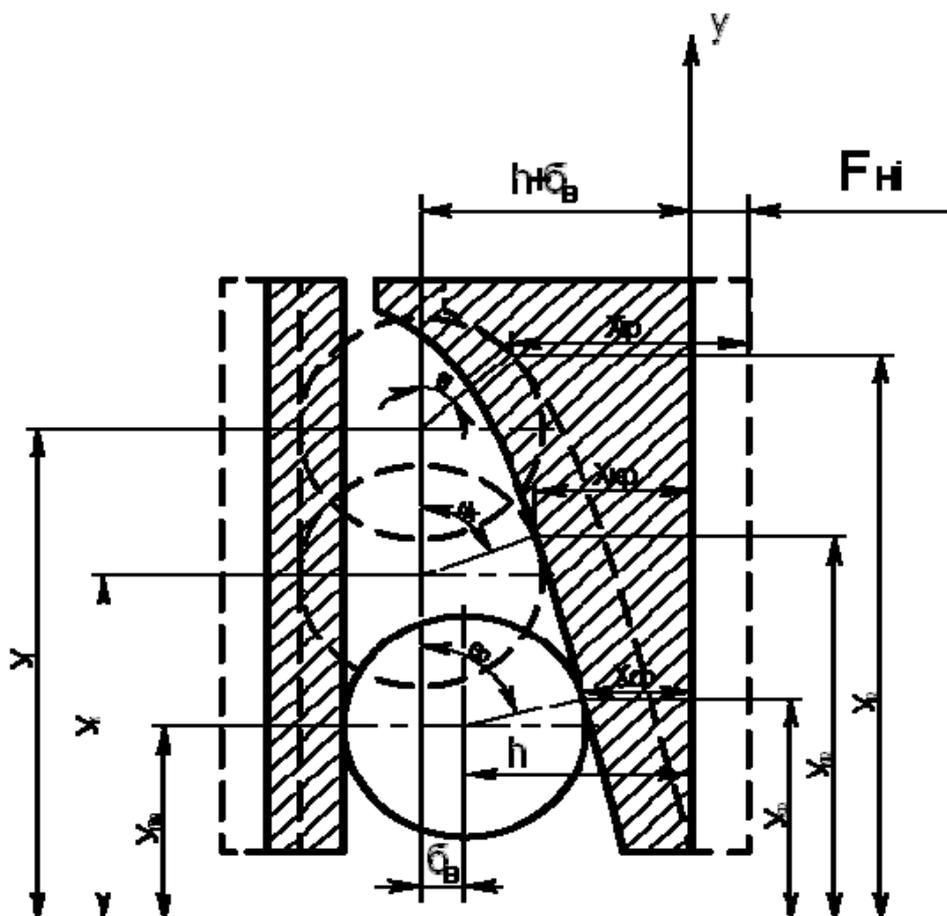


Рисунок 1 – Профилирование регулирующего диска при переменном моменте сил сопротивления

Координаты профиля диска в момент начала касания фрикционных накладок:

$$\begin{cases} x_{kp} = x_{op} + \delta_B = h - r \sin \beta_0 + \delta_B; \\ y_{kp} = y_{op} + \delta_B \cdot \operatorname{tg} \beta_0 = y_{min} + r \cos \beta_0 + \delta_B \operatorname{tg} \beta_0, \end{cases}$$

где δ_B – начальный зазор между фрикционными поверхностями.

Координаты профиля регулирующего диска при $y > y_{kp}$

$$\begin{aligned} x_{tp} &= h + \delta_B - r \sin \beta_0 + \Delta_{nti}; \\ y_{tp} &= y_k + \left(\frac{\omega_{2i} - \omega_{2c}}{\omega_1 - \omega_{2c}} \right) (y_{max} - y_k) + r \cos \beta_i; \end{aligned}$$

где ω_{20} – угловая скорость сепаратора при страгивании рабочей машины с места; $\omega_{2t}; \beta_t$ – текущие значения угловой скорости вала рабочей машины вместе с ведомой полумуфтой и угла контакта шаров с регулирующим диском; y_{max} – наибольшее возможное положение центра тяжести шара, $y_{max} = 0,5D_1 - r$; ω_1 – угловая скорость ротора электродвигателя вместе с ведущей полумуфтой; $\Delta_{нт}$ – величина перемещения регулирующего диска (нажимной пружины).

Текущее значение угла контакта шаров с регулирующим диском определяется из уравнения:

$$\frac{z_{ш} m_{ш} y_t \sin \beta_t \omega_{2t}^2}{\cos \beta_t + f \sin \beta_t + f} - 1,05(F_{н max} + C_{н} \Delta_{нт}) = 0,$$

где $C_{н}$ – жесткость нажимной пружины.

По полученным координатам строим профиль регулирующего диска для заданного момента сил сопротивления, который будет соответствовать случаю $\varepsilon_1 = [\varepsilon_1] = const$, что обеспечивает плавный разгон машины при переменном моменте сил сопротивления. На основании разработанной методики составлена программа проектировочного расчета пускозащитных муфт, а последовательность расчета этих муфт проводится по схеме алгоритма, представленного на рисунке 2.

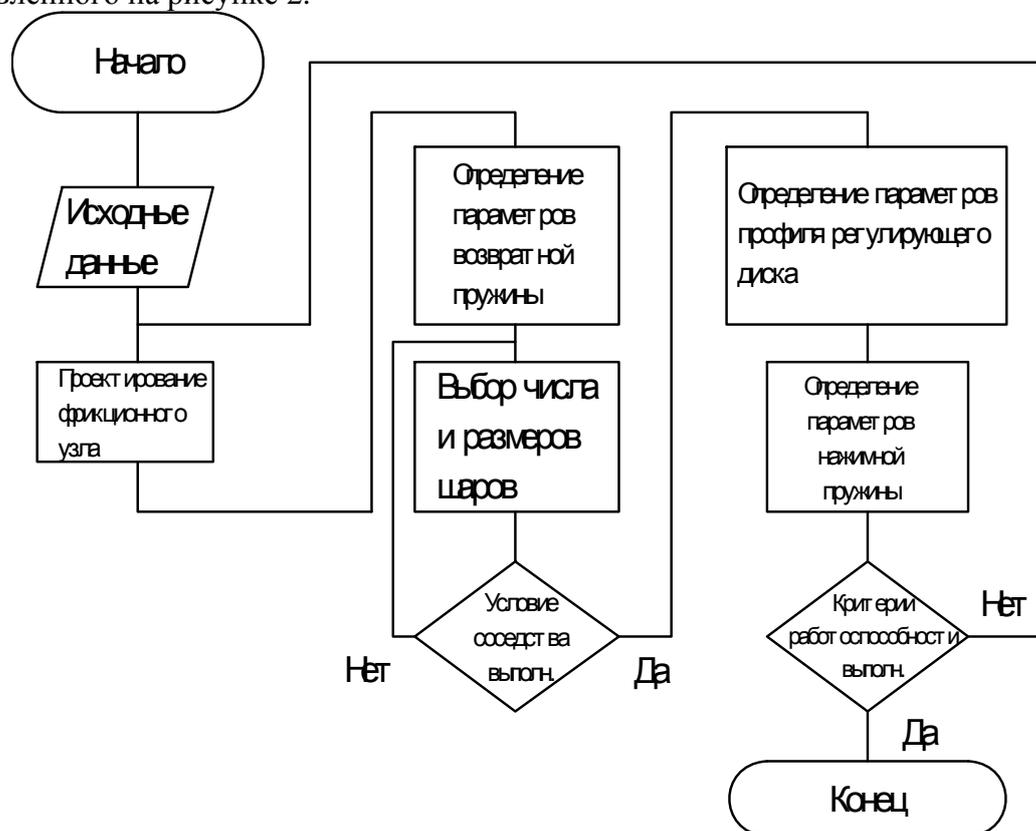


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма проектировочного расчета пускозащитных муфт

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство 418645 (СССР). Центробежная пусковая муфта / Авт.изобрет. Кобцев Б.Г., Коськин В.Н. – заявл. 31.01.1972 №1741625/25-27, опубл. 05.03.1974.
2. Поляков, В.С. Муфты. Конструкции и расчет. 4-е изд., исправл. и допол. / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш. – Л.: Машиностроение, 1973. – 336 с.
3. Поляков, В.С. Справочник по муфтам. 2-е изд. исправл. и доп. под ред. проф. Полякова В.С. / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш, О.А. Ряховский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 344 с.
4. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

5. Ануриев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. 5-е изд., перераб. и доп. / В.И. Ануриев. – М.: Машиностроение, т.1, 1980. – 728 с; т.2, 1980. – 559 с; т.3, 1980. – 557 с.

6. Детали машин. Расчет и конструирование: Справочник / Под ред. Ачеркана Н.С. в 3-х т. М.: Машиностроение, т.1, 1968. – 440 с; т.2, 1969. – 408 с; т.3, 1969. – 412 с.

Корнеев Юрий Степанович

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41-98-96

Корнеева Елена Николаевна

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
Тел.: 41-98-48

Играшкина Наталия Александровна

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Студентка гр. 21 – С
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41-98-96

YU.S. KORNEEV, E.N. KORNEEVA, N.A. IGRASHKINA

CALCULATION AND ENGINEERING OF THE START-PROTECTIVE CLUTCH

This article is devoted to the method of calculation of the start-protective clutch depending on the main parameters, providing set tempo of dispersal of technological

Keywords: *tecnological machine, clutch, shaping.*

BIBLIOGRAPHY

1. Avtorskoe svidetel'stvo 418645 (SSSR). Centrobezhnaja puskovaja mufta/ Avt.izobret. Kobcev B.G., Kos'kin V.N. – zjavl. 31.01.1972 №1741625/25-27, opubl. 05.03.1974.

2. Poljakov, V.S. Mufty. Konstrukcii i raschet. 4-e izd., ispravl. i dopol. / V.S. Poljakov, I.D. Barbash. – L.: Mashinostroenie, 1973. – 336 s.

3. Poljakov, V.S. Spravochnik po muftam. 2-e izd. ispravl. i dop. pod red. prof. Poljakova V.S. / V.S. Poljakov, I.D. Barbash, O.A. Rjahovskij. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 344 s.

4. Kragel'skij, I.V. Osnovy raschetov na trenie i iznos / I.V. Kragel'skij, M.N. Dobychin, V.S. Kombalov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 526 s.

5. Anur'ev, V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja. V 3-h t. 5-e izd., pererab. i dop. / V.I. Anur'ev. – M.: Mashinostroenie, т.1, 1980. – 728 с; т.2, 1980. – 559 с; т.3, 1980. – 557 с.

6. Detali mashin. Raschet i konstruirovanie: Spravochnik / Pod red. Acherkana N.S. v 3-h t. M.: Mashinostroenie, т.1, 1968. – 440 с; т.2, 1969. – 408 с; т.3, 1969. – 412 с.

Korneyev Yuri Stepanovich

State University - unpk, Orel
Candidate of technical Sciences, associate Professor
302020, Orel, Naugorskoe highway, 29
Phone: 41-98-96

Korneev Elena Nikolaevna

State University - unpk, Orel
Candidate of technical Sciences, associate Professor
Phone: 41-98-48

Igrashkina Nataliya Aleksandrovna

State University - unpk, Orel
Student of gr. 21 - C
302020, Orel, Naugorskoe highway, 29
Phone: 41-98-96

В.А. БАБАНКОВ

УСТРОЙСТВО ВЗРЫВОЗАЩИТЫ ДЛЯ МНОГОХОДОВЫХ ГАЗОВЫХ ТОПОК

На примере котла КП-0,12 экспериментально показано, что для многоходовых жаротрубных газовых топок без взрывных клапанов возможно разрушение конструкции при взрыве скопившегося в жаровой камере газа. Предложено заменить устаревшую конструкцию взрывного клапана на перепускной взрывной клапан, эффективность которого достаточна для сохранения целостности конструкции при повышении безопасности топki. Установлена динамика открытия клапана, показывающая низкий порог срабатывания по избыточному давлению.

Ключевые слова: многоходовая газовая топка, взрывы газа, перепускной взрывной клапан.

Взрывы газа в топках продолжают составлять проблему. При этом, как нами ранее было показано [1, 2, 3], особенно это актуально для многоходовых топок, в которых гидросопротивление движению продуктов сгорания заметно выше, чем в атмосферных топках. Отметим, что к многоходовым топкам относят, как правило, жаротрубные котлы, снабженные горелками с напорными вентиляторами и топочное пространство имеет цельнометаллическое ограждение, поэтому в них допускается некоторое повышение давления. Газовые взрывы в таких топках [1, 3], не снабженных взрывными клапанами, имеют довольно высокие значения давления до 0,3 Мпа и могут в отдельных случаях приводить к разрушению конструкции. Для защиты данных котлов от разрушения при взрывах применяют взрывные клапаны, имеющие конструкцию и проходное сечение, разработанные в соответствии с ГОСТ 10617-83.

Эксплуатация таких клапанов показала, что в напорных топках их уплотнение по месту стыка является конструктивно сложной задачей в силу того, что клапан должен удовлетворять двум противоречащим требованиям: срабатывать при минимальных давлениях взрыва и обеспечивать плотность прижатия по месту посадки, достигаемое, в том числе, за счет увеличения усилия поджатия клапана. Кроме того, при срабатывании клапана в помещение и в рабочую зону могут попасть горячие продукты сгорания, что также требует либо дополнительных устройств, выводящих продукты сгорания за пределы помещения, либо выбора особого места установки клапана. Последнее требование резко ограничивает возможности конструкторов.

Тем не менее покажем, что возможна разработка устройства, решающего проблему взрывозащиты, но лишенное перечисленных недостатков [4].

В качестве опытного экземпляра был выбран многоходовой паровой котел КП-0,12 производства ОАО «Возовсельмаш» (рис. 1). Штатная комплектация топki включает взрывной клапан, устанавливаемый на задней крышке и соединяющий жаровую камеру и атмосферу.

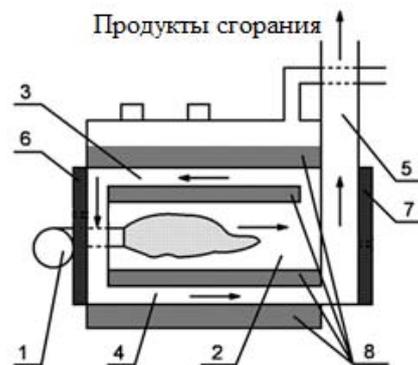


Рисунок 1 – Фотография внешнего вида и схема котла КП-0,12

1 – горелка; 2 – первый ход (жаровая камера); 3 и 4 – второй и третий хода соответственно; 5 – дымовая труба; 6 – передняя крышка; 7 – задняя крышка; 8 – резервуар с водой

Для исследования процесса взрыва в топке была разработана интеллектуально-измерительная система (ИИС), обеспечивающая автоматизированное управление испытаниями и сбор данных (рис. 2). Управление испытаниями осуществляется дистанционно на персональном компьютере (ПК) через реле времени (РВ), а сбор данных с датчиков давления и угла открытия через плату АЦП.

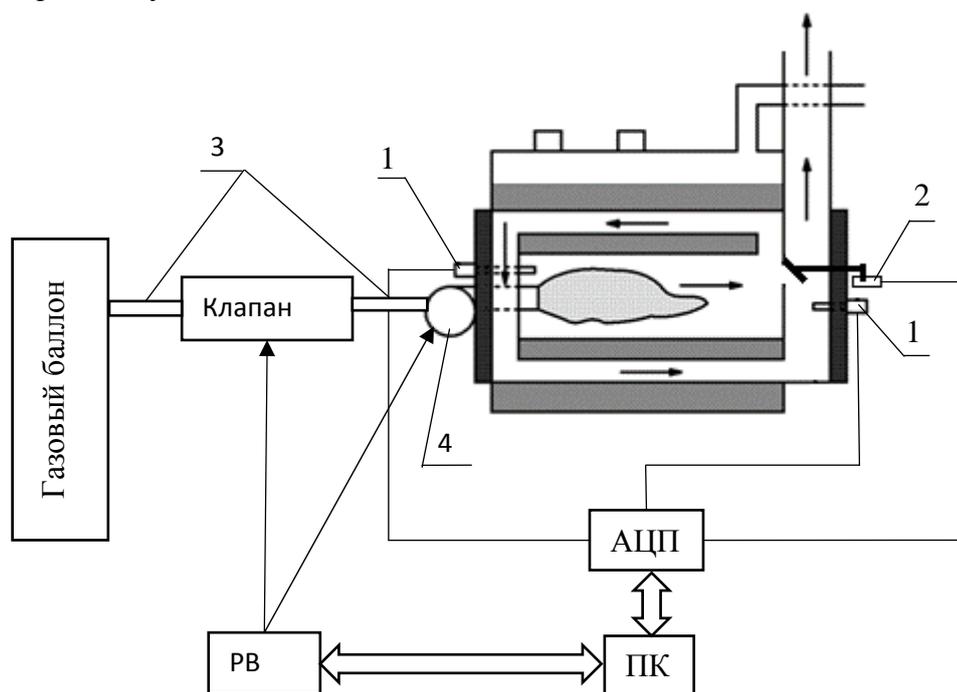


Рисунок 2 – Схема ИИС

1 – датчики давления; 2 – датчик угла открытия; 3 – газовый шланг; 4 – горелка с устройством зажигания; 5 – перепускной взрывной клапан

На компьютерном для реле времени устанавливаются время работы топливного клапана τ , время зажигания и время продувки, и начинают опыт. Во время подачи топлива в котел включается видеосъемка, запись давления и перемещения клапана в измерительной системе. После зажигания измерительной системой регистрируются сигналы с датчиков и строятся графики давления и перемещения, которые можно обработать по окончании эксперимента. После этого можно останавливать систему измерений и съемку, а реле через несколько секунд включает продувку котла. После каждого опыта необходимо проверить состояние котла на предмет разрушения конструкции. Далее опыты повторяются при других значениях τ .

Динамика давления для случая топки без взрывных клапанов при различных временах натекания газа τ представлена на рисунке 3. Видно, что при малых временах натекания газа рост давления незначителен, но с ростом объемов смеси давление начинает стремительно расти. В тоже время наблюдается существенная разница между давлением в жаровой камере (рис. 4) и давлением на выходе в дымовую трубу. Данный факт свидетельствует о повышенном гидросопротивлении в топке при котором избыточное давление взрыва не успевает сброситься через второй и третий хода в дымовую трубу.

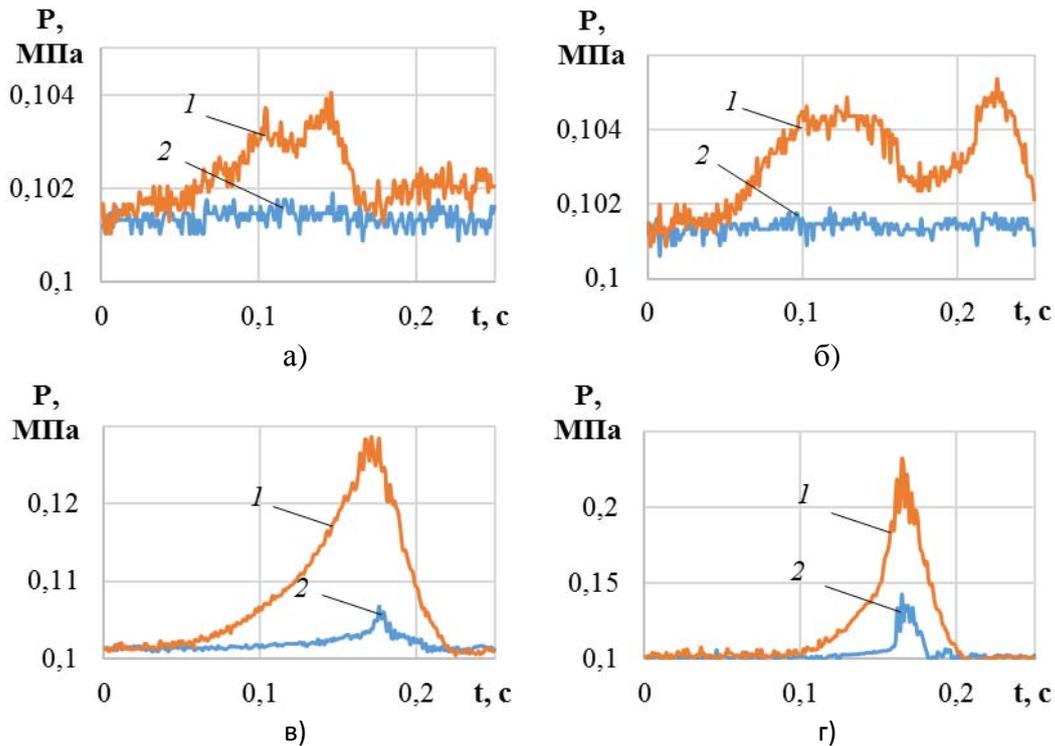


Рисунок 3 – Динамика давления взрыва в топке при различных временах натекания газа τ
 а) $\tau = 5$ с; б) $\tau = 8$ с; в) $\tau = 12$ с; г) $\tau = 18$ с; 1 – давление в жаровой камере, 2 – давление в дымовой трубе

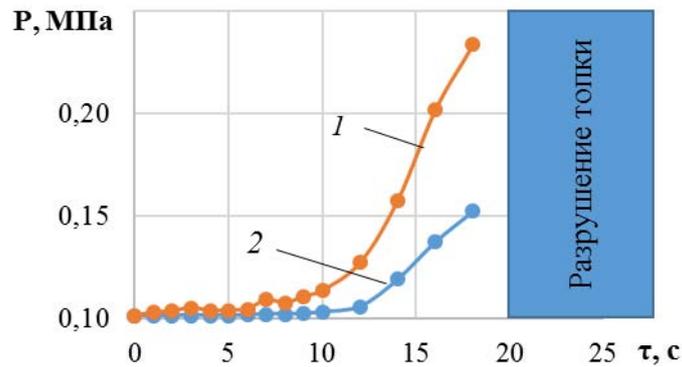


Рисунок 4 – Зависимость максимального значения давления взрыва от времени натекания газа τ
 1 – давление в жаровой камере, 2 – давление в дымовой трубе

В результате взрывов в топке без взрывных клапанов давление достигло критического значения и произошло разрушение топки, выраженное в ее разгерметизации. Таким образом, топка котла КП-0,12 не может быть использована без взрывных клапанов, однако при снижении гидросопротивления (за счет установки перепускного взрывного клапана) возможен перевод топки в безопасную рабочую область.

После установки перепускного взрывного клапана видно (рис. 5), что характер хода давления кардинально отличается от случая без клапана. Так, помимо того, что максимальное давление взрыва стало заметно меньше, можно наблюдать приближение давления в жаровой камере и в дымовой трубе, что свидетельствует о снижении гидросопротивления. Кроме того, для случая с перепускным взрывным клапаном рост давления был в допустимых пределах и удалось, в отличие от топки без взрывных клапанов, достичь точки незажигания смеси (рис. б).

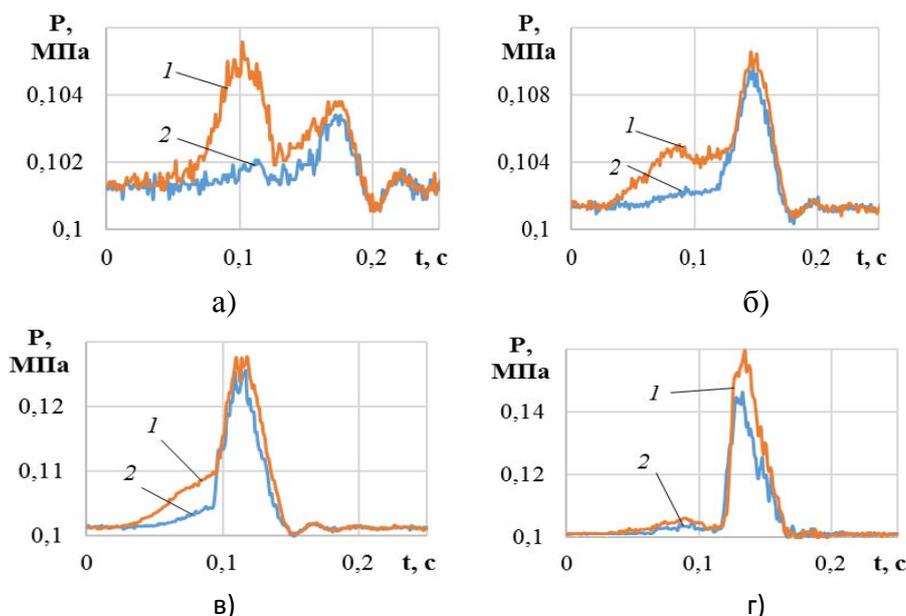


Рисунок 5 – Динамика давления взрыва в точке с перепускным взрывным клапаном при различных временах натекания газа τ
 а) $\tau = 5$ с; б) $\tau = 8$ с; в) $\tau = 12$ с; г) $\tau = 18$ с; 1 – давление в жаровой камере, 2 – давление в дымовой трубе

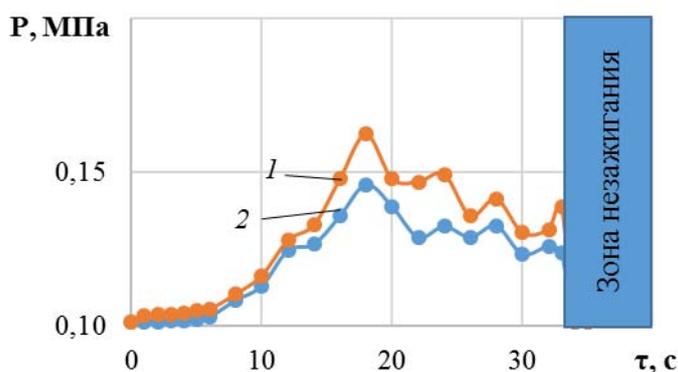


Рисунок 6 – Зависимость максимального значения давления взрыва от времени натекания газа τ
 1 – давление в жаровой камере, 2 – давление в дымовой трубе

Механизм работы перепускного взрывного клапана можно описать следующим образом. В невозмущенном состоянии клапана висит на петлях и прижат к стенке под действием силы тяжести. При наборе давления, когда сила, действующая на клапана превысит силу тяжести, происходит его открытие и сброс избыточного давления в дымовую трубу (рис. 7), однако сброс давления превышает его набор и клапан начинает закрываться, формируя первый пик. Во время закрытия давление начинает увеличиваться и снова возвращает клапан в открытое состояние, формируя второй пик. После прекращения горения клапан возвращается в исходное состояние и готов к возобновлению своей работы не требуя каких-либо мероприятий восстановления.

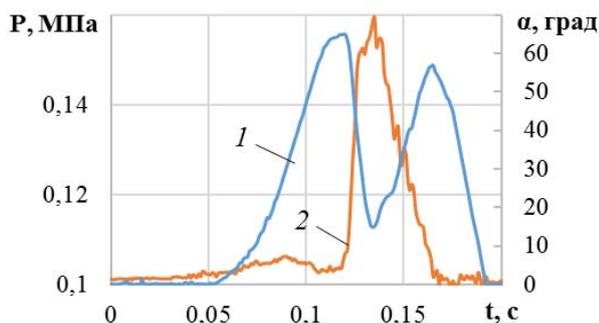


Рисунок 7 – Динамика угла открытия перепускного клапана (1) и давления (2) для времени натекания газа $\tau = 18$ с

В целом, в результате установки перепускного взрывного клапана, несмотря на взрывы при любых концентрациях газа, конструкция топки осталась неповрежденной. Таким образом, итоги испытаний перепускного клапана на многоходовой топке парового котла КП-0,12 подтвердили его эффективность. При этом, в отличие от известных взрывных клапанов он выполняет не только свою прямую функцию: снижает риск разрушения конструкции при взрыве, но и обеспечивает при своем срабатывании пожарную безопасность, кроме того он в изготовлении и эксплуатации на порядок дешевле аналогов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабанков, В.А. Об одном варианте снижения давления взрыва в многоходовых газовых топках [Текст] / Ю.Х. Поландов, М.А. Барг, В.А. Бабанков // Пожаровзрывобезопасность – 2012. – № 11. – С. 41-46.
2. К вопросу о пожаро- и взрывобезопасности бытового отопительного газового аппарата (АОГВ) [Текст] / Ю.Х. Поландов [и др.] // Известия ОрелГТУ Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2009. – № 2-3/274(560). – С. 111-114.
3. Поландов, Ю.Х. О результатах экспериментального исследования взрывов газо-воздушной смеси в топке парового котла КП-0,12 [Текст] / Ю.Х. Поландов, М.А. Барг, А.В. Митрохин // Безопасность жизнедеятельности – 2009. – № 2. – С. 40-41.
4. Пат. 2460940 Российская Федерация, МПК F23C 6/00, F24H 1/00. Многоходовая топка теплотехнического устройства [Текст] / Ю.Х. Поландов, В.А. Бабанков, С.Д. Пахомов; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Орловский государственный технический университет» (ОрелГТУ). – № 2010153398/06; заявл. 24.12.2010; опубл. 10. 09. 2012, Бюл. № 25. – 5 с. : ил.

Бабанков Виталий Александрович

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл

Аспирант кафедры «Высшая математика»

E-mail: xenosv@mail.ru

V.A. BABANKOV

DEVICE EXPLOSION PROTECTION FOR MULTI-WAYS GAS FURNACES

On the example of the boiler KP-0,12 shows that, for many, running fire-tube gas furnaces without explosive valves possible structural failure in the explosion of accumulated gas in the flame chamber. Proposed to replace the outdated design of the explosive valve on the valve to bypass the explosive, the effectiveness of which is sufficient to maintain the integrity of the design to improve safety at the furnace. Dynamics of the valve opening set, showing a low threshold for the excess pressure.

Keywords: multi-ways gas furnaces, gas explosions, bypass explosive valve.

BIBLIOGRAPHY

1. Babankov, V.A. Ob odnom variante snizheniya davleniya vzryva v mnogoxodovykh gazovykh topkax [Tekst] / Yu.X. Polandov, M.A. Barg, V.A. Babankov // Pozharovzryvobezopasnost' – 2012. – № 11. – S. 41-46.
2. K voprosu o pozharo- i vzryvobezopasnosti bytovogo otopitel'nogo gazovogo apparata (AOGV) [Tekst] / Yu.X. Polandov [i dr.] // Izvestiya OrelGTU Fundamental'nye i prikladnye problemy texniki i tex-nologii – 2009. – № 2-3/274(560). – S. 111-114.
3. Polandov, Yu.X. O rezul'tatax e'ksperimental'nogo issledovaniya vzryvov gazo-vozdushnoj smesi v topke parovogo kotla KP-0,12 [Tekst] / Yu.X. Polandov, M.A. Barg, A.V. Mitroxin // Bezopasnost' zhiznedeya-tel'nosti – 2009. – № 2. – S. 40-41.
4. Pat. 2460940 Rossijskaya Federaciya, MPK F23C 6/00, F24H 1/00. Mnogoxodovaya topka teplotexnicheskogo ustrojstva [Tekst] / Polandov Yu.X., Babankov V.A., Paxomov S.D.; zayavitel' i patentoobladatel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Orlovskij gosudarstvennyj texnicheskij universitet» (OrelGTU). – № 2010153398/06; zayavl. 24.12.2010; opubl. 10. 09. 2012, Byul. № 25. – 5 s. : il.

Babankov Vitaly Aleksandrovich

"State University - teaching and scientific-industrial complex", Orel

Graduate student of "Higher Mathematics"

E-mail: xenosv@mail.ru

УДК 517.958:52

В.А. АНДРУЩЕНКО, В.А. ГОЛОВЕШКИН, И.В. МУРАШКИН, Н.Н. ХОЛИН

ПОСТРОЕНИЕ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О СИЛЬНОМ ТОЧЕЧНОМ ВЗРЫВЕ В ОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

В работе выведены приближенные соотношения решения задачи о сильном точечном взрыве в однородной атмосфере. Полученные формулы очень хорошо аппроксимируют автомодельное решение Л.И.Седова при значениях показателя адиабаты, близких к единице. Приведены очень простые формулы, которые могут быть использованы в инженерных приложениях.

Ключевые слова: точечный взрыв, однородная атмосфера, решение задачи, совершенный газ.

ВВЕДЕНИЕ

Теория точечного взрыва почти за семидесятилетний срок своего существования стала одним из важнейших разделов газовой динамики, имеющим широкий спектр приложений во многих областях науки и техники. Началу этой теории в 40-х годах прошлого века положила идеализированная задача о сильном точечном взрыве в однородной атмосфере, исследованная выдающимися учеными-физиками и механиками в связи с испытаниями атомной бомбы [1,2]. Большинство из них решили эту задачу численно и только Л.И.Седов, проведя исчерпывающий теоретический анализ, получил ее автомодельное решение в конечном виде для всех трех видов симметрии [1].

В настоящее время в связи с новой актуальной проблемой – проблемой астероидно-кометной опасности, проявившей себя, например, совсем недавно (15 февраля 2013г.) воочию в виде взрыва над Челябинской областью метеорита, который превысил по мощности более, чем в 20 раз атомный взрыв над Хиросимой [3], задачи теории точечного взрыва вновь выдвинулись в ряд задач первостепенной значимости. Тем более, что почти одновременно с этим взрывом, мимо Земли практически «впритирку» по астрономическим меркам (на расстоянии 27 тыс. км.) пролетел громадный астероид 2012 DA14 размером в 44м [4]. В случае столкновения с ним высвободилось бы энергия, эквивалентная взрыву 2.4 млн. т. тротила, что уничтожило бы все на тысячу километров вокруг падения.

Эти события еще раз показали острую необходимость в скорейшем построении надежной космической защиты нашей планеты. А на данное время практически единственным реальным способом предотвращения столкновения Земли с космическим телом, особенно на поздней стадии обнаружения, является его уничтожение или разрушение ядерным взрывом [5,6]. А это требует дальнейшего развития в том числе и различных аспектов теории точечного взрыва.

Следует отметить, что автомодельное решение задачи Л.И.Седова представляется весьма громоздкими формулами в параметрическом виде [1], а часто в приложениях возникает необходимость в упрощенных, более наглядных зависимостях решения задачи от независимой переменной. Такие приближенные соотношения, очень хорошо аппроксимирующие точное решение при показателях адиабаты, близких к единице, и выведены в настоящей работе для случая сферической симметрии (см. также предыдущую публикацию авторов [7]).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

За исходную взята система уравнений сферического неустановившегося движения совершенного газа в виде [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} + 2\rho \frac{u}{r} &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) + u \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где r – линейная координата;
 u – функция скорости;
 p – функция давления;
 ρ – плотности;
 γ – показатель адиабаты.

На фронте ударной волны $r_1 = R(t)$ задаются граничные условия:

$$u = \frac{2}{\gamma+1}c, \quad \rho = \frac{\gamma+1}{\gamma-1}\rho_0, \quad p = \frac{2\rho_0}{\gamma+1}c^2, \quad (2)$$

где $c = dR/dt$ – скорость ударной волны;
 ρ_0 – начальная плотность.

В силу автомодельности задачи $R(t)$ и $c(t)$ представляются в виде:

$$R(t) = \left(\frac{E}{\rho_0}\right)^{1/5} t^{2/5}, \quad (3)$$

$$c(t) = \frac{2}{5} \left(\frac{E}{\rho_0}\right)^{1/5} t^{-3/5}, \quad (4)$$

где E – неизвестная константа, имеющая размерность энергии.

ВЫВОД ПРИБЛИЖЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ:

Решение ищется в виде:

$$\rho = \frac{\gamma+1}{\gamma-1}\rho_0 \tilde{\rho}(\lambda), \quad u = \frac{4}{5(\gamma+1)} \left(\frac{E}{\rho_0}\right)^{1/5} t^{-3/5} \tilde{u}(\lambda), \quad (5)$$

$$p = \frac{2}{\gamma+1}\rho_0 \frac{4}{25} \left(\frac{E}{\rho_0}\right)^{2/5} t^{-6/5} \tilde{p}(\lambda), \quad \lambda = r/R,$$

ниже знак тильды опускается.

Система исходных уравнений в частных производных (1) при подстановке соотношений (4) сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \left(u - \frac{\gamma+1}{2}\lambda\right) \frac{d\rho}{d\lambda} + \rho \frac{du}{d\lambda} + 2\rho u &= 0, \\ \left(u - \frac{\gamma+1}{2}\lambda\right) \frac{du}{d\lambda} - \frac{3}{4}(\gamma+1)u + \frac{\gamma-1}{2} \frac{1}{\rho} \frac{dp}{d\lambda} &= 0, \\ \left(u - \frac{\gamma+1}{2}\lambda\right) \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{p}{\rho^\gamma}\right) - \frac{3}{2}(\gamma+1) \frac{p}{\rho^\gamma} &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

а граничные условия (2) на фронте ударной волны $\lambda = 1$:

$$u = \rho = p = 1.$$

Далее делается еще одна замена $u = \lambda[1 - (\gamma-1)f/2]$ и вводится малый параметр $\varepsilon = \gamma - 1$, тогда система уравнений (5) сводится к системе:

$$\begin{aligned} (1+f) \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\lambda} + \frac{df}{d\lambda} + \frac{3f}{\lambda} - \frac{6}{\varepsilon} \frac{1}{\lambda} &= 0, \\ \varepsilon^2 \frac{\lambda^2}{4} (1+f) \frac{df}{d\lambda} - \left[\frac{6+5\varepsilon}{4} + \frac{\varepsilon}{2} f \right] \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon}{2} f \right] \lambda + \frac{\varepsilon}{2} \frac{1}{\rho} \frac{dp}{d\lambda} &= 0, \\ \lambda \frac{\varepsilon}{2} (1+f) \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{p}{\rho^{1+\varepsilon}} \right) + \frac{3}{2} (2+\varepsilon) \frac{p}{\rho^{1+\varepsilon}} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

с граничными условиями при $\lambda = 1$:

$$\rho = p = 1, f = 0. \quad (8)$$

Затем вводится новая пространственная координата $\zeta = -\frac{1}{\varepsilon} \ln \lambda$, $0 \leq \zeta < \infty$, тогда

$\frac{d}{d\lambda} = -\frac{1}{\varepsilon} \exp(\varepsilon\zeta) \frac{d}{d\zeta}$ и согласно (7) получим:

$$\begin{aligned} (1+f) \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\zeta} + \frac{df}{d\zeta} + 6 - 3f\varepsilon &= 0, \\ \frac{\varepsilon}{4} \exp(-2\varepsilon\zeta) (1+f) \frac{df}{d\zeta} + \left[\frac{6+5\varepsilon}{4} + \frac{\varepsilon}{2} f \right] \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon}{2} f \right] \exp(-2\varepsilon\zeta) + \frac{1}{2\rho} \frac{dp}{d\zeta} &= 0, \\ \frac{1}{2} (1+f) \frac{d}{d\zeta} \left(\frac{p}{\rho^{1+\varepsilon}} \right) - \frac{3}{2} (2+\varepsilon) \frac{p}{\rho^{1+\varepsilon}} &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

с граничными условиями (8) при $\zeta = 0$.

Далее делаем замену $\rho = G \exp(2\varepsilon\zeta)$ и пренебрегаем членами порядка ε^2 , тогда система уравнений (9) представляется в виде:

$$\begin{aligned} (1+f) \frac{1}{G} \frac{dG}{d\zeta} + \frac{df}{d\zeta} + 6 &= \varepsilon(f-2), \\ \frac{1}{G} \frac{dp}{d\zeta} + 3 &= \varepsilon \left[-\frac{1}{2} (1+f) \frac{df}{d\zeta} - \left(\frac{5}{2} - \frac{f}{2} \right) \right], \\ (1+f) \frac{1}{p} \frac{dp}{d\zeta} - (1+f) \frac{1}{G} \frac{dG}{d\zeta} - 6 &= \varepsilon \left[(1+f) \frac{1}{G} \frac{dG}{d\zeta} + 5 + 2f \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Полагая $\varepsilon = 0$, получим:

$$\begin{aligned} (1+f) \frac{1}{G} \frac{dG}{d\zeta} + \frac{df}{d\zeta} + 6 &= 0, \\ \frac{1}{G} \frac{dp}{d\zeta} + 3 &= 0, \\ (1+f) \frac{1}{p} \frac{dp}{d\zeta} - (1+f) \frac{1}{G} \frac{dG}{d\zeta} - 6 &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Из первого и третьего уравнений системы (11) следует

$$(1+f) \frac{dp}{d\zeta} + p \frac{df}{d\zeta} = 0 \Rightarrow \frac{d}{d\zeta} p(1+f) = 0 \Rightarrow p(1+f) = const, \text{ а так как при } \zeta = 0 \quad p = 1, f = 0, \text{ то}$$

$$p(1+f) = 1 \quad (12)$$

Из первого и второго уравнений системы (11) следует

$$(1+f) \frac{dG}{d\zeta} + G \frac{df}{d\zeta} - 2 \frac{dp}{d\zeta} = 0 \Rightarrow \frac{d}{d\zeta} [(1+f)G - 2p] = 0 \Rightarrow (1+f)G - 2p = const, \text{ а так как при } \zeta = 0 \quad f = 0, G = 1, p = 1, \text{ то}$$

$$(1+f)G - 2p = -1 \quad (13)$$

Согласно второму уравнению системы (11) получим:

$$(f+1) \frac{dp}{d\zeta} + 3G(f+1) = 0 \Rightarrow \frac{d}{d\zeta} [p(f+1)] - p \frac{df}{d\zeta} + 3G(f+1) = 0$$

Из соотношения (12) следует:

$$-p \frac{df}{d\zeta} + 3G(f+1) = 0 \Rightarrow -\frac{1}{(f+1)} \frac{df}{d\zeta} + 3G(f+1) = 0,$$

а из соотношения (13) следует

$$-\frac{1}{(f+1)} \frac{df}{d\zeta} + 3[2p-1] = 0 \Rightarrow \frac{df}{d\zeta} - 6p(f+1) + 3(f+1) = 0,$$

согласно (12) получим: $\frac{df}{d\zeta} + 3f - 3 = 0$, а поскольку при $\zeta = 0$ $f = 0$, то

$$f = 1 - \exp(-3\zeta) \tag{14}$$

Ниже будем использовать обозначение:

$$\omega = \omega(\zeta) = \exp(-3\zeta).$$

Тогда из соотношений (12) и (14) следует:

$$p = (2 - \omega)^{-1}, \tag{15}$$

а из второго уравнения системы (11) получим

$$G = \omega(2 - \omega)^{-1}. \tag{16}$$

Решение (14)-(16) обозначим как f_0 , p_0 , G_0 - приближение при $\varepsilon = 0$. Для следующего приближения получим (см. систему уравнений (10)):

$$\begin{aligned} (1+f) \frac{1}{G} \frac{dG}{d\zeta} + \frac{df}{d\zeta} + 6 &= \varepsilon(f_0 - 2), \\ \frac{1}{G} \frac{dp}{d\zeta} + 3 &= \varepsilon \left[-\frac{1}{2}(1+f_0) \frac{df_0}{d\zeta} - \left(\frac{5}{2} - \frac{f_0}{2} \right) \right], \\ (1+f) \left[\frac{1}{p} \frac{dp}{d\zeta} - \frac{1}{G} \frac{dG}{d\zeta} \right] - 6 &= \varepsilon \left[(1+f_0) \frac{1}{G_0} \frac{dG_0}{d\zeta} + 5 + 2f_0 \right]. \end{aligned} \tag{17}$$

Из первого и третьего уравнений системы (17), пренебрегая слагаемыми порядка ε^2 , получим:

$$(1+f) \frac{dp}{d\zeta} + p \frac{df}{d\zeta} = \varepsilon p_0 (1+f_0) \left[\frac{1}{G_0} \frac{dG_0}{d\zeta} + 3 \right].$$

Используя соотношения (14) и (15), получим:

$$\frac{d}{d\zeta} p(1+f) = \varepsilon \left(-\frac{6\omega}{2-\omega} \right),$$

а так как при $\zeta = 0$ $p = 1$, $f = 0$, то

$$p(1+f) = 1 + \varepsilon \int_0^\zeta -\frac{6\omega}{2-\omega} d\zeta = 1 - 2\varepsilon \ln(2-\omega)$$

Окончательно, пренебрегая слагаемыми порядка ε^2 , получим:

$$p = \frac{1}{1+f} - \varepsilon \frac{2 \ln(2-\omega)}{2-\omega} \tag{18}$$

Согласно двум первым уравнениям системы (17) при пренебрежении членами порядка ε^2 имеем:

$$\begin{aligned} (1+f) \frac{dG}{d\zeta} + G \frac{df}{d\zeta} + 6G &= \varepsilon G_0 (f_0 - 2), \\ 3G &= -\frac{dp}{d\zeta} - \varepsilon G_0 \left[\frac{1}{2}(1+f_0) \frac{df_0}{d\zeta} + \frac{5-f_0}{2} \right] \end{aligned} \tag{19}$$

Из уравнений (18)-(19), используя соотношения (14)-(16), получим:

$$\frac{d}{d\zeta} [(1+f)G - 2p] = \varepsilon \frac{3\omega}{(2-\omega)^2} [1 + \omega(2-\omega)],$$

а поскольку при $\zeta = 0$ $p = G = 1$, $f = 0$, то

$$(1+f)G - 2p = -1 + \varepsilon \int_0^{\zeta} \frac{3\omega}{(2-\omega)^2} [1 + \omega(2-\omega)] d\zeta = -1 + \varepsilon \left[2\ln(2-\omega) - \frac{(1-\omega)^2}{(2-\omega)} \right]$$

Пренебрегая членами порядка ε^2 , имеем

$$(1+f)G - 2p = -1 + \varepsilon \left[2\ln(2-\omega) - \frac{(1-\omega)^2}{(2-\omega)} \right] \quad (20)$$

Разрешая соотношение (20) относительно G и подставив p из (18), при пренебрежении слагаемыми ε^2 получим

$$G = \frac{2}{(f+1)^2} - \frac{1}{f+1} - \varepsilon \left[\frac{(1-\omega)^2}{(2-\omega)^2} + \frac{2\omega \ln(2-\omega)}{(2-\omega)^2} \right]. \quad (21)$$

Согласно второму уравнению системы (17) при пренебрежении членами порядка ε^2 имеем:

$$\frac{dp}{d\zeta} (f+1) + 3G(f+1) = -\varepsilon G_0 (f_0+1) \frac{1}{2} \left[(1+f_0) \frac{df_0}{d\zeta} + 5 - f_0 \right].$$

Согласно (17) и (21), пренебрегая слагаемыми порядка ε^2 , получим:

$$(f+1) \left\{ -\frac{1}{(f+1)^2} \frac{df}{d\zeta} - \varepsilon \left[\frac{6\omega}{(2-\omega)^2} - \frac{6\ln(2-\omega)\omega}{(2-\omega)^2} \right] \right\} + (f+1) \left\{ \frac{6}{(f+1)^2} - \frac{3}{f+1} - 3\varepsilon \left[\frac{(1-2\omega)^2}{(2-\omega)^2} + \frac{2\omega \ln(2-\omega)}{(2-\omega)^2} \right] \right\} = -\varepsilon G_0 (f_0+1) \frac{1}{2} \left[(f_0+1) \frac{df_0}{d\zeta} + 5 - f_0 \right].$$

Пренебрегая слагаемыми порядка ε^2 , получим уравнение:

$$-\frac{df}{d\zeta} - \varepsilon 6\omega [1 - \ln(2-\omega)] + 6 - 3(f+1) - 3\varepsilon [1 - 2\omega + 2\omega \ln(2-\omega)] = -\varepsilon \omega \frac{1}{2} [(2-\omega)3\omega + 4 + \omega]$$

После преобразований оно сводится к виду:

$$\frac{d}{d\zeta} [\omega^{-1}(f-1)] = \varepsilon \left[-3\omega^{-1} + 2 + \frac{7}{2}\omega - \frac{3}{2}\omega^2 \right] - 1.$$

Поскольку при $\zeta = 0$ $f = 0$, то окончательно имеем:

$$f = 1 - \omega + \varepsilon \left[-1 + 2\zeta\omega + \frac{23}{12}\omega - \frac{7}{6}\omega^2 + \frac{1}{4}\omega^3 \right]. \quad (22)$$

Подставляя это выражение в формулу (18), получим:

$$p = \frac{1}{2-\omega} + \varepsilon \left[\frac{1 - 2\zeta\omega - \frac{23}{12}\omega + \frac{7}{6}\omega^2 - \frac{1}{4}\omega^3}{(2-\omega)^2} - \frac{2\ln(2-\omega)}{2-\omega} \right] \quad (23)$$

В переменных λ соотношение (23) примет вид:

$$p = \frac{1}{\left(2 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right)} \left\{ 1 + (\gamma-1) \left[\frac{1 - \left(\frac{23}{12} - \frac{2\ln \lambda}{\gamma-1} \right) \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} + \frac{7}{6} \lambda^{\frac{6}{\gamma-1}} - \frac{1}{4} \lambda^{\frac{9}{\gamma-1}}}{\left(2 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right)} - 2\ln \left(2 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right) \right] \right\}. \quad (24)$$

С точностью до членов порядка $\varepsilon = \gamma - 1$ получим формулу:

$$p = \frac{1}{2} \left(1 + \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right) + (\gamma-1) \left(\frac{1}{4} - \ln 2 \right) \left(1 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right). \quad (25)$$

Пренебрегая слагаемыми порядка ε^2 в выражении (21), после ряда выкладок окончательно получим следующее соотношение для G :

$$G = \frac{\omega}{(2-\omega)^2} \left\{ 1 + \varepsilon \left[\frac{2}{2-\omega} + 2 - \omega - \frac{2+\omega}{(2-\omega)^2} \left(2\zeta + \frac{23}{12} - \frac{7}{6}\omega + \frac{1}{4}\omega^2 \right) - 2\ln(2-\omega) \right] \right\}$$

Тогда формула $\rho = G \exp(2\varepsilon\zeta)$ в переменных λ примет вид:

$$\rho = \frac{\lambda^{\frac{5-2\gamma}{\gamma-1}}}{\left(2 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right)^2} \left\{ 1 + (\gamma-1) \left[\frac{\frac{2}{2-\lambda^{\frac{3}{\gamma-1}}} + 2 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} - 2\ln\left(2 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right) - \frac{2+\lambda^{\frac{3}{\gamma-1}}}{\left(2 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right)^2} \left(-\frac{2\ln\lambda}{\gamma-1} + \frac{23}{12} - \frac{7}{6}\lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} + \frac{1}{4}\lambda^{\frac{6}{\gamma-1}} \right)}{\left(2 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right)^2} \right] \right\} \quad (26)$$

С точностью до членов порядка ε получим формулу:

$$\rho = \lambda^{\frac{5-2\gamma}{\gamma-1}} \left(2 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right)^{-2}. \quad (27)$$

Формула $u = \lambda \left(1 - \frac{\varepsilon}{2} f \right)$ в переменных λ примет вид:

$$u = \lambda \left\{ 1 - \frac{\gamma-1}{2} \left(1 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right) + \frac{(\gamma-1)^2}{2} \left[1 + \left(\frac{2\ln\lambda}{(\gamma-1)} - \frac{23}{12} \right) \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} + \frac{7}{6} \lambda^{\frac{6}{\gamma-1}} - \frac{1}{4} \lambda^{\frac{9}{\gamma-1}} \right] \right\}. \quad (28)$$

С точностью до членов порядка ε получим формулу:

$$u = \lambda \left[1 - \frac{\gamma-1}{2} \left(1 - \lambda^{\frac{3}{\gamma-1}} \right) \right]. \quad (29)$$

Сравнение результатов точного – автомодельного решения Л.И.Седова (сплошные кривые) и приближительного (прерывистые кривые) для p , ρ , u формулы (24), (26), (28) для значений показателя адиабаты $\gamma = 1.1, 1.2, 1.4$, приведено на рисунке 1 а-в соответственно.

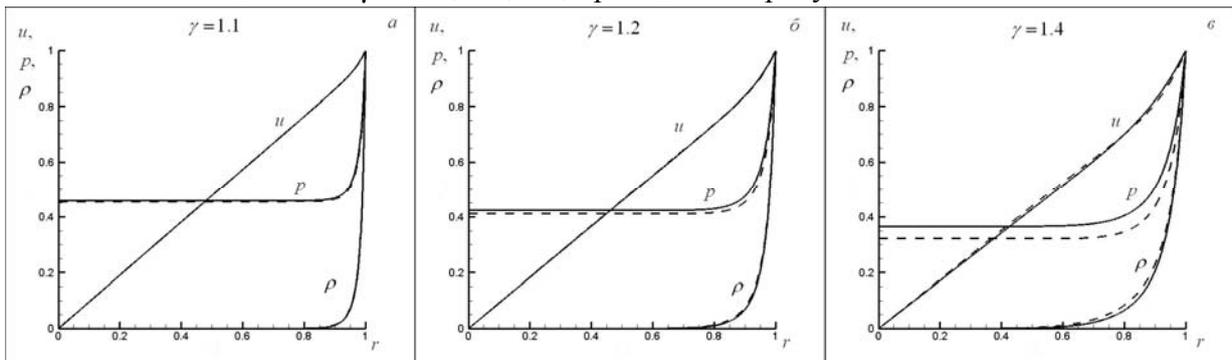


Рисунок 1 – Сравнение результатов точного – автомодельного решения и приближительного

На рисунке 2а-в представлено аналогичное сопоставление результатов точного решения с приближенным – формулы (25), (27), (29) в тех же обозначениях.

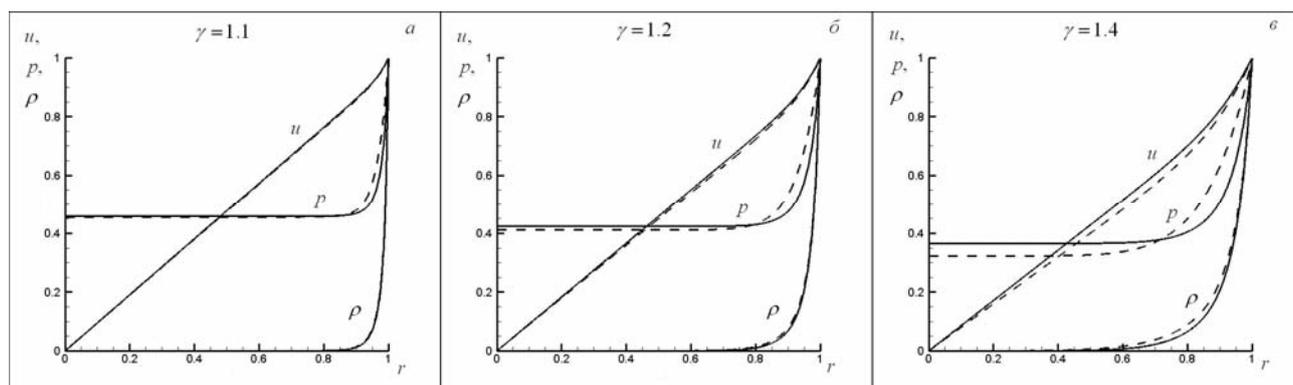


Рисунок 2 – Аналогичное сопоставление результатов точного решения с приближенным

Как видно из рисунков, совпадение оказалось очень хорошим в первом случае (рис. 1), и несколько хуже во втором (рис. 2). Но здесь следует отметить чрезвычайную простоту выведенных формул (25), (27), (29), которые можно применять в инженерных приложениях.

В заключение приведем формулу для распространения фронта ударной волны, выведенную авторами в работе [7] (из закона сохранения энергии):

$$R = \left[\frac{75}{8\pi} (\gamma - 1) \right]^{1/5} \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{2/5} = \xi_0 \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{2/5}.$$

Для наглядности проведено сравнение этих значений с точным автомодельным решением: $\xi_0 = 0.785, 0.902, 1.036$ и $0.782, 0.897, 1.033$ соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 12-01-00602 и 12-01-31481).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов, Л.И. Движение воздуха при сильном взрыве / Л.И. Седов // ДАН СССР. 1946. Т.52. №1. – С.17-20.
2. Taylor G. The formation of a blast wave by a very intense explosion // Proc. Roy. Soc. London. 1950. A.201. №1065. P.159-186.
3. Занько, Л. Конец света? / Л. Занько // Миасский рабочий. №18(16926). 16 февраля 2013г. С.1.
4. Подкрался незаметно // Поиск. 2013. – №9(1239). – с.15.
5. Сазонов, В.С. О взрывном способе предотвращения столкновений с Землей астероидно-кометных тел при их позднем обнаружении / В.С. Сазонов, М.В. Яковлев // Астрономический вестник. 2006. – Т.40. – №1. – С. 77-88.
6. Заграфов, В.Г. Применение ядерных взрывов для воздействия на малые космические тела в случае опасности столкновения с Землей / В.Г. Заграфов, А.К. Шаненко, В.А. Рыжанский // Физика горения и взрыва. 2009. – Т.45. – №5. – С.134-139.
7. Головешкин, В.А. Об одном приближенном представлении решения задачи о сильном точечном взрыве в однородной атмосфере / В.А. Головешкин, В.А. Андрущенко, И.В. Мурашкин // Естественные и технические науки. 2013. – №1. – С.15-21.

Андрущенко Виктор Анатольевич

Институт автоматизации и проектирования, г. Москва
 Доктор физико-математических наук
 123056, Москва, 2-ая Брестская ул, д.19/18
 Тел. (499) 250-02-62
 E-mail: icad@icad.org.ru

Головешкин Василий Адамович

Московский государственный университет приборостроения и информатики
 Доктор технических наук, профессор
 107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.20
 Тел. 8 (499) 268-00-01

Мурашкин Илья Владимирович

Институт автоматизации и проектирования, г. Москва
Аспирант
123056, Москва, 2-ая Брестская ул, д.19/18
Тел. (499) 250-02-62
E-mail: icad@icad.org.ru

Холин Николай Николаевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой
107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.20
Тел. 8 (499) 268-00-01

V.A. ANDRUSHCHENKO, V.A. GOLOVESHKIN, I.V. MURASHKIN, N.N. CHOLINE

**CONSTRUCTION OF THE APPROXIMATE SOLUTION OF THE
PROBLEM OF STRONG POINT EXPLOSION IN A HOMOGENEOUS
ATMOSPHERE**

In article approximate ratios of the solution of the problem about strong dot explosion in the uniform atmosphere are received. The received formulas very well approximate L.I.Sedov's automodel decision at values of an indicator of the adiabatic curve, close to unit. Very simple formulas which can be used in engineering applications are given.

Keywords: point explosion, homogeneous atmosphere, solution of the problem, a perfect gas.

BIBLIOGRAPHY

1. Sedov, L.I. Dvizhenie vozduha pri sil'nom vzryve / L.I. Sedov // DAN SSSR. 1946. T.52. №1. – S.17-20.
2. Taylor G. The formation of a blast wave by a very intense explosion // Proc. Roy. Soc. London. 1950. A.201. №1065. P.159-186.
3. Zan'ko, L. Konec sveta? / L. Zan'ko // Miasskij rabochij. №18(16926). 16 fevralja 2013g. S.1.
4. Podkral'sja nezametno // Poisk. 2013. – №9(1239). – s.15.
5. Sazonov, V.S. O vzryvnom sposobe predotvrashhenija stolknovenij s Zemlej asteroidno-kometnyh tel pri ih pozdnem obnaruzhenii / V.S. Sazonov, M.V. Jakovlev // Astronomicheskij vestnik. 2006. – T.40. – №1. – S. 77-88.
6. Zagrafov, V.G. Primenenie jadernyh vzryvov dlja vozdejstvija na malye kosmicheskie tela v sluchae opasnosti stolknovenija s Zemlej / V.G. Zagrafov, A.K. Shanenko, V.A. Ryzhanskij // Fizika gorenija i vzryva. 2009. – T.45. – №5. – S.134-139.
7. Goloveshkin, V.A. Ob odnom priblizhennom predstavlenii reshenija zadachi o sil'nom tochechnom vzryve v odnorodnoj atmosfere / V.A. Goloveshkin, V.A. Andrushhenko, I.V. Murashkin // Estestvennyye i teh-nicheskie nauki. 2013. – №1. – S.15-21.

Andrushchenko Victor Anatolievich

Institute of automation and design, Moscow
Doctor of physical and mathematical Sciences
123056, Moscow, 2-ya Brestskaya street, building 19/18
Phone (499) 250-02-62
E-mail: icad@icad.org.ru

Goloveshkin Vasily Adamovich

Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics
Doctor of Technical Sciences, Professor
107996, Moscow, ul. Strominka, 20
Tel. 8 (499) 268-00-01

Murashkin Ilya Vladimirovich

Institute of Automation and Design, Moscow
graduate student
123056, Moscow, 2nd Brestckaya Street, d.19/18
Tel. (499) 250-02-62
E-mail: icad@icad.org.ru

Choline Nikolai Nikolaevich

Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head. Chair
107996, Moscow, ul. Strominka, 20
Tel. 8 (499) 268-00-01

УДК 621.787.4

С.Ю. РАДЧЕНКО, Д.О. ДОРОХОВ, П.Г. МОРЕВ, И.М. ГРЯДУНОВ, В.А. ГОЛЕНКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ВТУЛОК ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНОГО ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ

Рассмотрены особенности математического моделирования упрочняющей обработки внутренней поверхности деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации. Приводится описание математической модели и результаты моделирования в сравнении с данными экспериментальных исследований.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, математическая модель, упрочнение, интенсивная пластическая деформация, валковая штамповка, метод конечных элементов, осесимметричная задача.

На данный момент основным инструментом в изучении откликов системы на определённые возмущающие факторы является численное моделирование, базирующееся на методе конечных элементов (МКЭ). Для моделирования большинства технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД), таких, как ковка, прокатка, штамповка и т.д. существуют коммерческие пакеты прикладных программ (ППП): DEFORM, QFORM, LS-DYNA, RAM-STAMP и т.д.

Сейчас всё большее распространение получают процессы с комплексным локальным воздействием на очаг деформации. Они сочетают в себе глобальное монотонное воздействие на деформируемое тело в целом – комплексная составляющая и периодическое местное воздействие – локальная составляющая. Применение такой схемы деформирования создаёт условия для возникновения интенсивной пластической деформации (ИПД), что, в свою очередь, позволяет получать изделия с уникальными эксплуатационными характеристиками. Это делает задачу исследования комплексной локальной деформации (КЛД) с точки зрения математического моделирования весьма актуальной.

На рисунке 1 представлена схема упрочняющей обработки методом валковой штамповки (ВШ), позволяющей получать полые осесимметричные детали с градиентным от внутренней поверхности упрочнением [1].

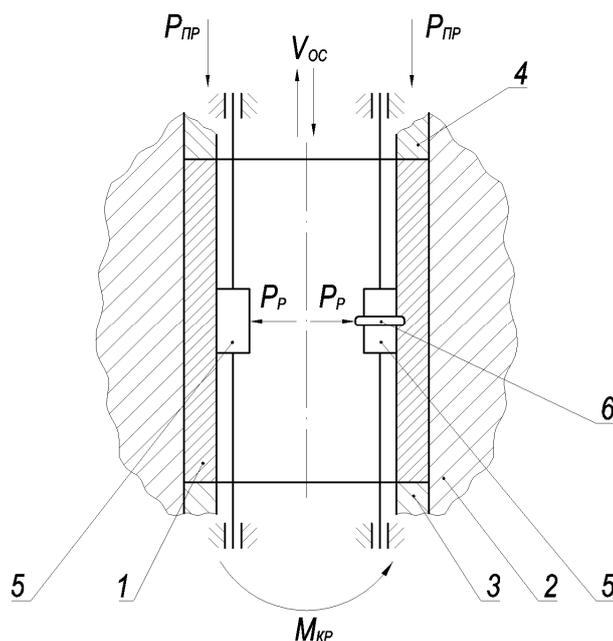


Рисунок 1 – Схема упрочняющей ВШ [1]

1 – заготовка, 2 – контейнер, 3 – упор, 4 – прижим, 5 – ролики, 6 – деформирующий выступ

На рисунках 2,а и 2,б представлена схема приложения и распределения внешней нагрузки.

Способ осуществляется следующим образом. Заготовку 1 помещают в контейнер 2, при этом заготовка фиксируется от осевого перемещения упором 3 и прижимом 4 с силой P_{np} , затем в полость заготовки вводят ролики 5, один или более из которых имеет участок большего диаметра (деформирующий выступ) 6, после чего ролики поджимают к обрабатываемой поверхности с силой P_p и сообщают крутящий момент $M_{кр}$. Внутренняя поверхность формируется многократным возвратно-поступательным осевым перемещением роликов со скоростью $V_{ос}$, после чего ролики отводят от обрабатываемой поверхности и выводят из зоны обработки, отводят прижим и извлекают готовое изделие.

Объёмная модель процесса упрочняющей обработки интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации приведена на рисунке 2.

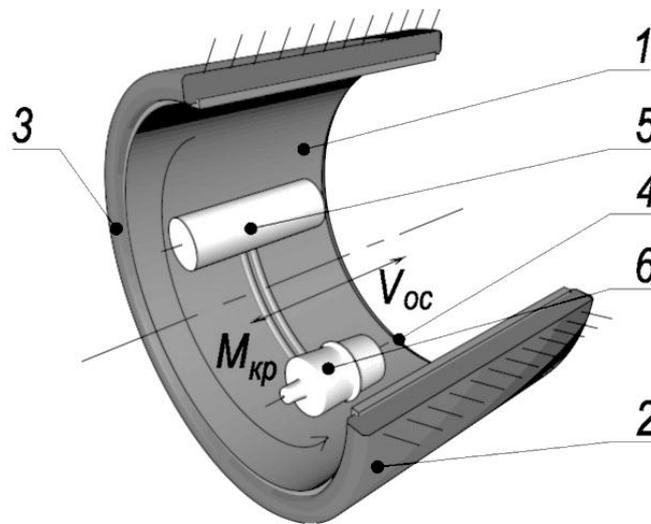


Рисунок 2 – Объёмная модель процесса упрочняющей обработки

1 – заготовка, 2 – контейнер, 3 – упор, 4 – прижим, 5 – ролики, 6 – ролик с деформирующим выступом

В первоначальный момент времени ролик с деформирующим выступом 3 (см. рис. 3, а) внедряется в заготовку 1, вытесняя массы металла 4 по обе стороны от деформирующего выступа. На втором этапе происходит отход деформирующего ролика и на деформированную зону опускается заглаживающий ролик 5 (рис. 3, б). В результате вытесненный объём металла возвращается в первоначальное положение. После этого ролик 5 отводится, инструмент смещается в осевом направлении на шаг подачи S и обработка повторяется снова.

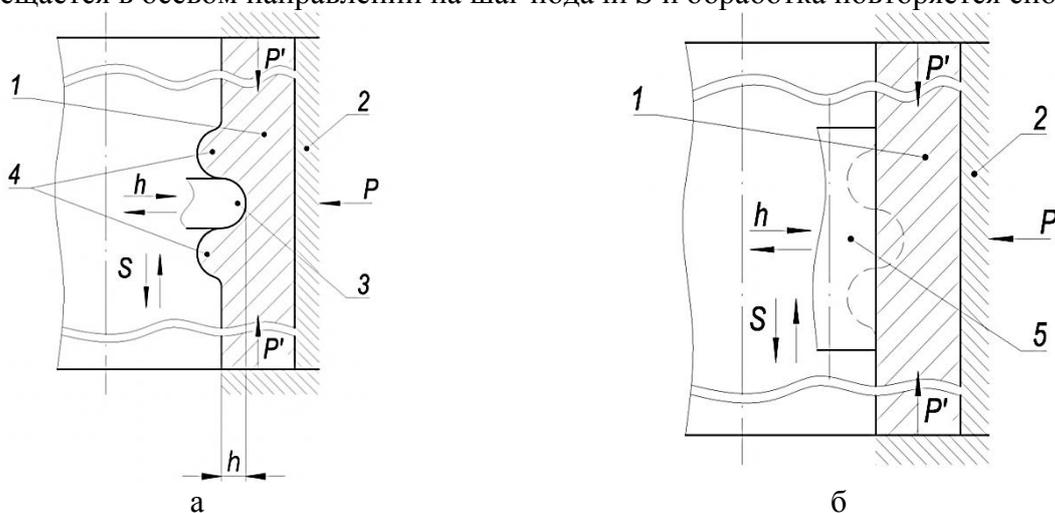


Рисунок 3 – Расчётная схема математической модели упрочняющей ВШ по внутренней поверхности

1 – заготовка; 2 – контейнер; 3 – деформирующий ролик; 4 – вытесненный объём металла; 5 – заглаживающий ролик

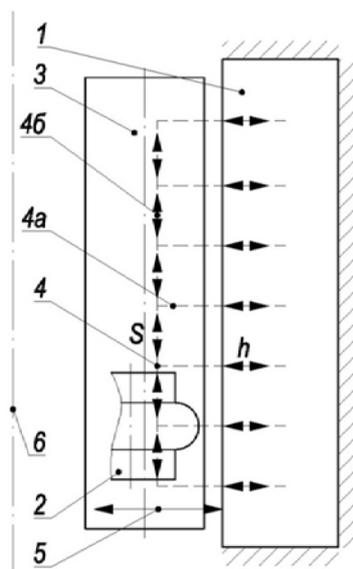


Рисунок 4 – Схема математической модели упрочняющей ВШ, реализуемая в ППП «ШТАМП»
 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – деформирующий ролик; 3 – заглаживающий ролик;
 4 – траектория перемещения деформирующего ролика; 4а – траектория однократного внедрения деформирующего ролика на величину h ; 4б – траектория единичного смещения деформирующего ролика в продольном направлении на величину шага подачи S ; 5 – траектория движения заглаживающего ролика; 6 – ось симметрии

На основе приведённого выше описания составлена схема программной реализации данной задачи (рис. 4).

В процессе обработки заготовки упрочняющей валковой штамповкой вблизи внутренней поверхности возникают наибольшие напряжения и деформации, вследствие чего для получения наиболее достоверной картины напряжённо-деформированного состояния материала применялась составная триангулярная сетка, более плотная на внутренней поверхности (рисунок 4). По остальным слоям и в приторцовых зонах её плотность значительно снижена. Такая её конструкция позволяет сократить машинное время, затраченное на выполнение необходимых расчётов без потери качества результатов.

Так же отсутствует необходимость моделирования обработки всей поверхности, в связи с чем рассмотрению подвергался участок определённой длины в середине заготовки, что так же экономит время, потребное для выполнения расчёта, не отражаясь на качественной картине получаемых результатов.

Применение такой схемы математической модели упрочняющей ВШ позволяет так же моделировать процессы с обжатием заготовки. Например, на рисунке 5 приведена схема обжатия и распределения внешней нагрузки.

Для расчёта модели рассматриваемого процесса сформулированы следующие граничные условия:

- полное ограничение перемещения поверхности, контактирующей с контейнером 2;
- ограничение перемещения торцевых поверхностей только в осевом направлении;
- для сегментов, вступающих во взаимодействие с деформирующим/заглаживающим роликами запрещается проникновение в тело инструмента.

Для решения рассматриваемой задачи применяется уравнение равновесия вида [3] (1):

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0$$

1

Рисунок 4 – Конечно-элементная сетка для исследования КЛД

В цикле работ, выполненных на кафедре «Автоматизированные процессы и машины бесстружковой обработки материалов» ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», было доказано, что в случае контактных нагрузок, осуществляемых обрабатывающими инструментами, считающимися абсолютно жёсткими, задача допускает следующую вариационную формулировку [3] (2):

$$\begin{aligned} & \iiint_{V(t)} \delta \nabla \mathbf{v} \cdot (\dot{\boldsymbol{\sigma}} - \nabla \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\sigma} + (\nabla \cdot \mathbf{v}) \boldsymbol{\sigma}) dV = \\ & = \dot{Q} \cdot \delta q^i - q^i \delta \dot{q}^i \iint_{S(t)} \Gamma_{ij}^k \alpha_k \cdot \mathbf{p} dS + \iint_{S(t)} \delta v_z \cdot (\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{p} \dot{\lambda}) dS + \iiint_{V(t)} \delta \mathbf{v} \cdot (\mathbf{f} + \mathbf{f}(\nabla \cdot \mathbf{v})) \end{aligned} \quad 2$$

здесь

$1 \leq i, j, k \leq 6n$, где n – число инструментов;

$\dot{\lambda} = (\nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{d} \cdot \mathbf{n})$ – скорость относительного изменения элемента площади поверхности;

r – радиус-вектор произвольной материальной точки деформируемого тела;

r_s – радиус-вектор произвольной материальной точки абсолютно жёсткого тела;

\mathbf{v} – вектор скорости произвольной материальной точки;

$\boldsymbol{\sigma}$ – тензор истинного напряжения Коши;

$\mathbf{d} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)$ – тензор скорости деформации;

$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} - \nabla \mathbf{v}^T)$ – тензор вихря;

\mathbf{n} – внешняя нормаль к поверхности;

$\mathbf{p} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}$ – вектор напряжения;

$V(t)$ – область пространства, занимаемая деформируемым телом в момент времени t ;

$S(t)$ – поверхность контакта в момент t ;

– скорость нормальной компоненты вектора напряжения;

$\nabla \cdot \mathbf{v}$ – градиент поля скорости;

\mathbf{f} – распределённая по объёму внешняя нагрузка;

q^i – обобщённая координата абсолютно жёсткого тела (инструмента);

Q_i – обобщённая сила, сопряжённая координате q^i ;

\dot{Q} – скорость изменения обобщённой силы;

$\alpha_k = \frac{\partial r_{\xi^k}}{\partial q^i}$ – локальный обобщённо-координатный базис на поверхности абсолютно жёсткого тела (инструмента);

$\Gamma_{ij}^k \alpha_k = \frac{\partial^2 r_{\xi^k}}{\partial q^i \partial q^j}$ – уравнение, определяющее аналоги символов Кристоффеля Γ_{ij}^k ;

δv_z – вариации скоростей скольжения по поверхности абсолютно жёсткого тела;

$\delta \dot{q}^i$ – вариации обобщённых скоростей.

Так же необходимо выполнение следующих дополнительных условий:

1. Условие непроникновения: для каждой материальной точки M деформируемого тела выполняется $\xi^3(M) \geq 0$. Где ξ^3 – координата в криволинейной системе координат (ξ^1, ξ^2, ξ^3) на поверхности инструмента, направленная по нормали.

2. Условия гладкости решения: $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \in W_2^1(V(t))$ для пространственных переменных; кроме того, $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ и $\dot{q}^i(t)$ непрерывны по времени. Здесь $W_2^1(V(t))$ – представляет собой функциональное пространство Соболева для области $V(t)$.

3. Скорость произвольной материальной точки деформируемого тела на поверхности закрепления известна.

4. На поверхности прилипания выполняется: $\xi^i = 0$ ($1 \leq i \leq 2$); кроме того, $|\mathbf{p}_\tau| \leq k |\mathbf{p}_n|$, где $k = k(\mathbf{p}_n)$ – коэффициент трения и \mathbf{p}_n – нормальная компонента \mathbf{p} ; наконец, граничное условие $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{p}$.

5. На поверхности проскальзывания выполняется: скорость проскальзывания противоположна касательной компоненте вектора напряжения p ; также закон трения $|p_t| \leq k|p_n|$; кроме того, граничное условие

$$n \cdot (\sigma \cdot n) + (n \cdot \sigma \cdot n)(\nabla \cdot v - n \cdot d \cdot n) = \dot{p} \cdot n + (p \cdot n)(\nabla \cdot v - n \cdot d \cdot n)$$

для $t_i \leq t \leq t_f$, где t_i и t_f – начальный и конечный моменты процесса проскальзывания произвольной материальной точки деформируемого тела в зоне контакта; наконец, начальное условие $\sigma \cdot n = p$ при $t = t_i$.

6. Для любого номера $l \in L$ обобщённая координата q^l задана явно как функция времени. Где L – множество номеров обобщённых координат, посредством которых задаётся движение инструментов (случай $L = \emptyset$ допускается),

7. Для любого номера $j \in I$ обобщённая сила Q_j задана явно как функция времени. Где I – множество номеров обобщённых сил, посредством которых задаётся нагружение инструментов (случай $I = \emptyset$ также допускается),

8. Известна зависимость тензора σ от истории деформации (т.е. определяющее соотношение).

9. Начальные условия при $t = 0$: $\sigma(r, 0) = \sigma_0(r)$; начальные значения переменных в определяющем соотношении известны. Начальное состояние контактной пары есть состояние равновесия.

Сформулированная вариационная задача решалась численно методом конечных элементов, причём в качестве определяющего использовалось соотношение с производной Яумана (3):

$${}^j \sigma = D \cdot d \quad 3$$

где

$$D^{ijkl} = E^{ijkl} - \alpha \frac{3GS^{ij}S^{kl}}{\bar{\sigma}^2(1 + H'/(3G))}$$

Здесь

- E – тензор упругости;
- $\alpha=1$ в пластическом состоянии, $\alpha=0$ – в упругом;
- G – модуль сдвига;
- H' – модуль упрочнения;
- $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжения;
- S – девиатор напряжения.

Представленная модель является модификацией скоростного вариационного принципа, предложенного В.Ф. Астаповым, А.А. Маркиным, О.Л. Толоконниковым и Л.А. Толоконниковым. Её разрешение осуществляется с применением МКЭ [3].

Для выполнения необходимых расчётов применяется ППП «ШТАМП» [4] с применением теории пластического течения.

Результатом математического моделирования являются графики эволюции интенсивности напряжений σ_i при различном количестве циклов обработки (от 1 до 30), варьируемом шаге продольной подачи обрабатывающего инструмента и постоянной глубине внедрения деформирующего элемента. Для сравнения данных математического и физического моделирования их необходимо привести к одним и тем же единицам измерения. С этой целью воспользуемся формулой (4):

$$\sigma_i = 0.33 \cdot HV \quad 4$$

где σ_i – интенсивность напряжений;

HV – микротвёрдость материала заготовки;

0.33 – эмпирический коэффициент.

Пользуясь данной формулой, строим сравнительные графики распределения параметра микротвёрдости по сечению исследуемых образцов для данных, полученных в результате математического моделирования и данных экспериментальных исследований [5] (рис. 8 и 9). На рисунках точками показаны данные измерений параметра микротвёрдости, сплошной линией – их аппроксимация по МНК, штриховой линией – данные математического моделирования.

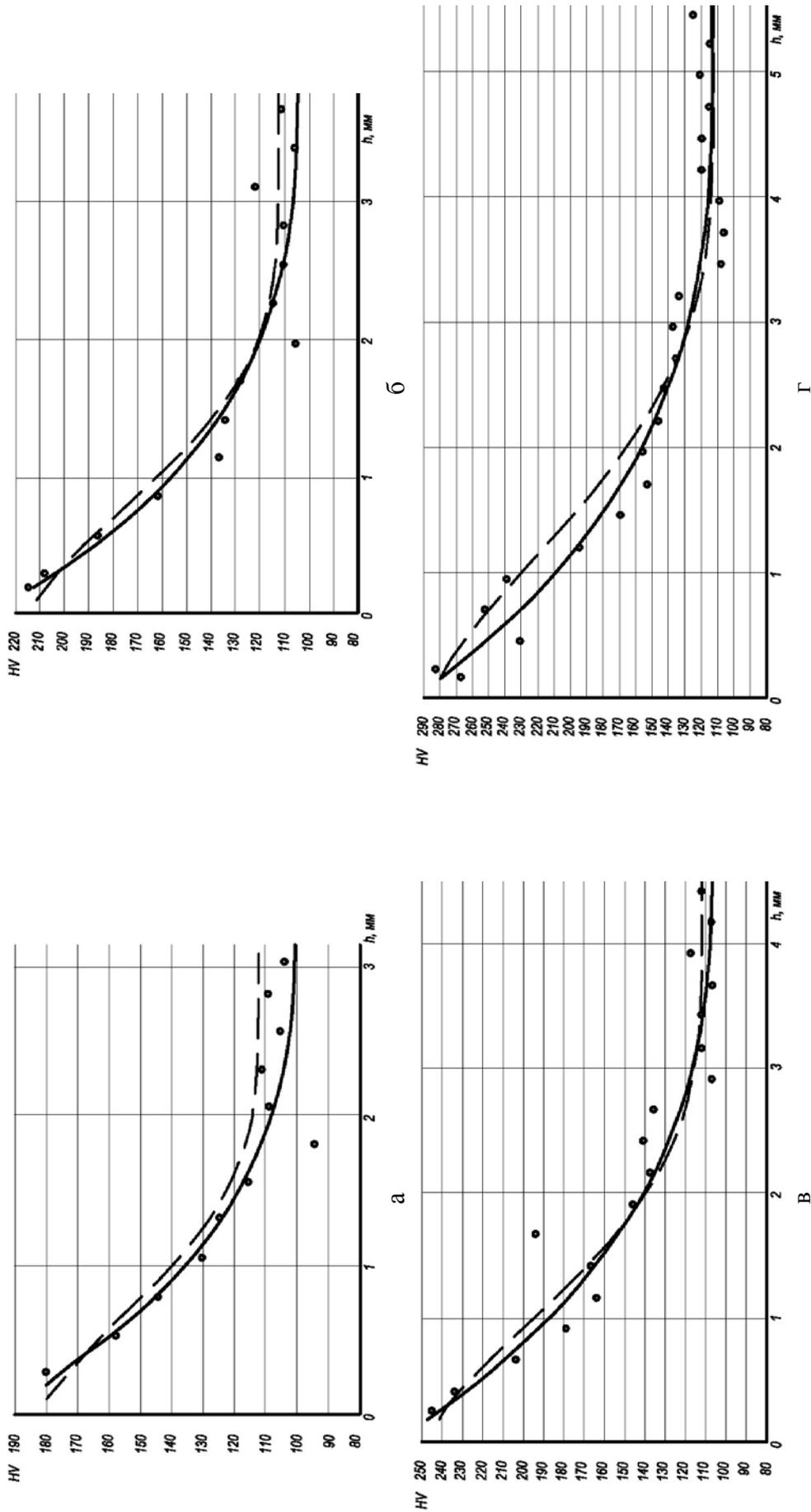


Рисунок 8 – Сравнительные графики данных математического моделирования и экспериментальных исследований
 $a - n = 15, S = 0.5 \text{ мм}, h = 0.2 \text{ мм}; б - n = 20, S = 0.5 \text{ мм}, h = 0.5 \text{ мм}; в - n = 25, S = 0.5 \text{ мм}, h = 0.2 \text{ мм}; г - n = 30, S = 0.5 \text{ мм}, h = 0.2 \text{ мм}$

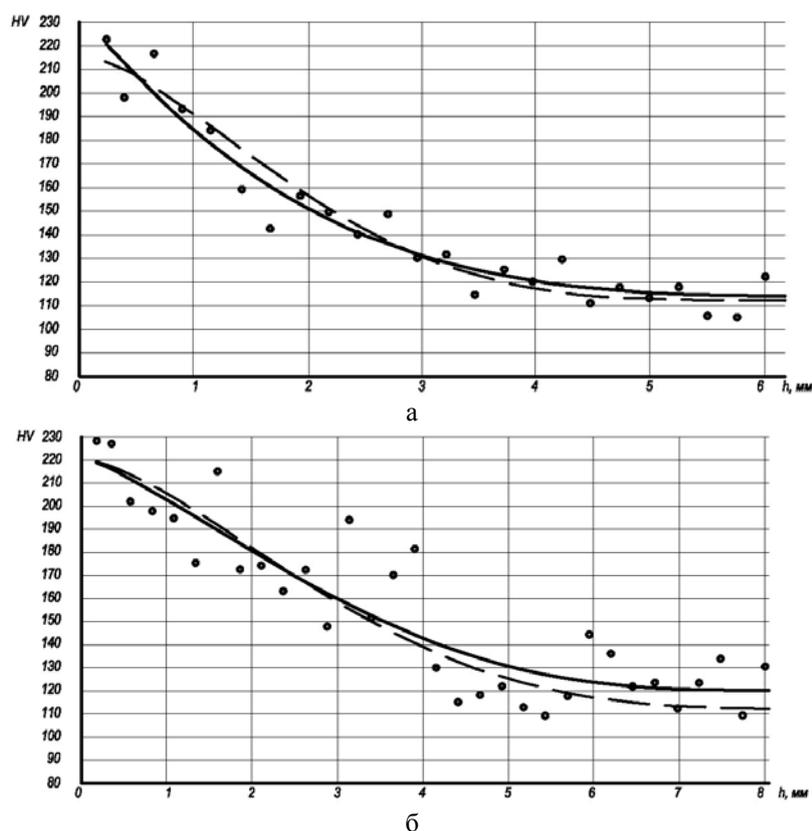


Рисунок 9 – Сравнительные графики данных математического моделирования и экспериментальных исследований
a – n = 20, S = 0.7мм, h = 0.2мм; б – n = 20, S = 1.0мм, h = 0.2мм

Анализируя представленные сравнительные графики, можно заключить, что рассматриваемая математическая модель является в достаточной мере достоверной: графики данных математической модели и аппроксимации экспериментальных данных по МНК близки по форме и значениям; отклонение составляет не более 11,8 %. Это свидетельствует о том, что математическая модель даёт результаты, которые находятся в рамках теоретической погрешности, а следовательно она является адекватной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2462327 РФ, МПК В21Н1/22. Способ получения металлических втулок с градиентно-упрочнённой структурой / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, И.М. Грядунов (RU). - №2010153917/02; Заявлено 27.12.2010; Опубл. 27.09.2012, Бюд. №27.
2. Бейгельзимер, Я.Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации [Текст] / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков. - Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. - 87с.
3. Морев, П.Г. Вариационная постановка и разработка методов решения задач контактного взаимодействия тел при конечных деформациях [Текст]: дис. ... кандидата физико-математических наук: 01.02.04: - защищена: утв. / Морев Павел Геннадьевич/
4. Голенков, В.А. Пакет прикладных программ для моделирования процессов обработки металлов давлением / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, В.М. Тюков // В сб.: Металлические материалы, методы их обработки. Тезисы докладов Российской научно-технической конференции. - Москва, МГАТУ, 1994.

Радченко Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
 доктор технических наук, проректор, профессор
 Тел. (4862) 437125
 E-mail: sur@ostu.ru

Дорохов Даниил Олегович

Мценский филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Мценск
 кандидат технических наук, преподаватель
 Тел. (48646) 25689
 E-mail: ddostu@mail.ru

Морев Павел Геннадьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
Ведущий инженер кафедры «Автопласт»
Тел. (4862) 419841
E-mail: paulorel@mail.ru

Грядунцов Игорь Михайлович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
Аспирант кафедры «Автопласт»
Тел. (4862) 419841
E-mail: fry14@yandex.ru

Голенков Вячеслав Александрович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
доктор технических наук, президент, профессор
Тел. (4862) 437125
E-mail: sur@ostu.ru

S.J. RADCHENKO, D.O. DOROHOV, P.G. MOREV, I.M. GRYADUNOV, V.A. GOLENKOV
MATHEMATICAL DESIGN OF HARDENING PROCESS OF INNER SURFACE OF BUSH-TYPE PARTS BY INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION IN KOMPLEX LOCAL LOADIND TERMS OF DEFORMATION ZONE

Special feature of mathematical design of hardening process of inner surface of bush-type parts by intensive plastic deformation in komplex local loadind terms of deformation zone have been considered. The description on mathematical model and the modeling results compared with experimental research data have been presented.

Keywords: metal processing, mathematical model, hardening, intensive plastic deformation, rolls stamping, finite element method (analysis), axisymmetric problem.

BIBLIOGRAPHY

1. Pat. 2462327 RF, MPK B21H1/22. Sposob poluchenija metallicheskih vtulok s gradientno-uprochnjonnj strukturoj / V.A. Golenkov, S.Ju. Radchenko, I.M. Grjadunov (RU). - №2010153917/02; Zajavleno 27.12.2010; Opubl. 27.09.2012, Bjud. №27.
2. Bejgel'zimer, Ja.E. Vintovaja jekstruzija – process nakoplenija deformacii [Tekst] / Ja.E. Bejgel'zimer, V.N. Varjuhin, D.V. Orlov, S.G. Synkov. - Doneck: Firma TEAN, 2003. - 87s.
3. Morev, P.G. Variacionnaja postanovka i razrabotka metodov reshenija zadach kontaktnogo vzaimodejstvija tel pri konechnyh deformacijah [Tekst]: dis. ... kandidata fiziko-matematicheskikh nauk: 01.02.04: - zashhishhena: utv. / Morev Pavel Gennad'evich/
4. Golenkov, V.A. Paket prikladnyh programm dlja modelirovanija processov obrabotki metallov davleniem / V.A. Golenkov, S.Ju. Radchenko, V.M. Tjukov // V sb.: Metallicheskie materialy, metody ih obrabotki. Tezisy dokladov Rossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii. - Moskva, MGATU, 1994.

Radchenko Sergey Yurievich

"State University - ESPC," Orel
Ph.D., Vice-Chancellor, Professor
Tel. (4862) 437125
E-mail: sur@ostu.ru

Dorokhov Daniel Olegovich

Mtsensk branch "State University - ESPC" Mtsensk
Ph.D., professor of
Tel. (48646) 25689
E-mail: ddostu@mail.ru

Morev Pavel Gennadievich

"State University - ESPC," Orel
Lead Engineer of the Department "Avtoplast"
Tel. (4862) 419841
E-mail: paulorel@mail.ru

Gryadunov Igor Mikhailovich

"State University - ESPC," Orel
Graduate student "Avtoplast"
Tel. (4862) 419841
E-mail: fry14@yandex.ru

Golenkov Vyacheslav Aleksandrovich

Federal state educational institution «University - unpk», Orel
doctor of technical Sciences, President, Professor
Phone (4862) 437125
E-mail: sur@ostu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТ В СЕТЕВЫХ КАНОНИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Предложена математическая модель оптимального распределения работ по исполнителям, сокращающая время и минимизирующая затраты исполнения проекта.

Ключевые слова: математическая модель, планирование, распределение работ, проект.

Введение

Управление проектом – процесс, направленный на достижения конечной цели при ограничениях на ресурсы (финансовые, материальные, трудовые, временные и т.д.). Процесс планирования является одной из функций управления. Оптимальное планирование является необходимым элементом эффективного управления. Важность системы планирования многократно возрастает для производственных компаний ввиду того, что производство является наиболее сложным бизнес-процессом в их деятельности. Эффективность, а значит конкурентоспособность, производственной компании практически напрямую определяется эффективностью используемой системы планирования и управления производством.

Проектирование и производство сложных высокотехнологичных изделий связано с выполнением совокупности действий – работ. Связи между работами удобно представлять в виде сетевой канонической структуры – конечного ориентированного графа без петель и циклических маршрутов. Свойство каноничности означает, что никакая работа не может начаться, пока не завершится выполнение всех предшествующих ей работ. Дугам графа соответствуют работы, имеющие ряд характеристик: ресурсоемкость, интервал допустимых интенсивностей потребления ресурса, интервал допустимых длительностей.

Постановка задачи

Пусть требуется реализовать некоторый проект (например, разработка изделия, производство опытной партии, испытание и запуск в серию и др.). Для его реализации необходимо выполнить n работ, распределяемых по m исполнителям [1], при:

– условия, что каждая конкретная работа может быть выполнена только одним из нескольких исполнителей. Причем время выполнения работы зависит от исполнителя, его квалификации и опыта выполнения предыдущих проектов;

– и ограничениях:

а) на последовательность выполнения работ – начало выполнения работы возможно лишь по окончании выполнения предшествующих ей работ;

б) на длительность работ;

в) на выполнение директивных сроков (директивным сроком называется некоторый момент времени, позднее которого выполнение этой работы не может быть завершено). Как правило, директивные сроки определяются для работ, являющихся завершающими для конкретного проекта (т.е. окончание данной работы означает завершение всего проекта).

Исполнителями мы будем считать не только отделы, но и лаборатории, отдельные группы в рамках лабораторий, которые могут самостоятельно выполнять некоторые работы по проекту.

В связи с высокой наукоемкостью и технологичностью современных проектов, быстрой сменой технической и технологической баз, временными ограничениями разработки и вывода продукта на рынок может возникнуть необходимость привлечения сторонних организаций [2].

Таким образом, исполнители делятся на штатных работников предприятия и сторонних (работников, организаций), привлеченных для выполнения отдельных работ по проекту. Обозначим штатных исполнителей, как $J_{шт}$, сторонних – $J_{ст}$, $|J_{ст} \cup J_{шт}| = J$, $J_{ст} \cap J_{шт} = \emptyset$. Разница между ними учитывается формой оплаты труда:

– штатные исполнители находятся на повременной форме оплаты труда, при которой заработная плата зависит от количества фактически отработанного времени с учётом квалификации работника и условий труда. Для сокращения времени работы, в качестве мотивации штатных исполнителей, выступает премирование сотрудников по окончании работ над проектом;

– сторонние исполнители привлекаются к проекту по договору подряда, в котором устанавливаются сроки исполнения работ и цена.

В результате привлечения сторонних исполнителей цена реализации проекта может вырасти, однако сократится общее время выполнения работ по проекту – $T_{кр}$.

Для каждого исполнителя известно множество работ, которое он может выполнить.

Введём матрицу $W = \{w_{ij}\}_{i=1..n, j=1..m}$,

где $w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я работа может быть выполнена } j\text{-м исполнителем;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Обозначим через $R(i)$ множество взаимозаменяемых штатных исполнителей для работы i :

$$R(i) = \{j \in J_{шт} / w_{ij} = 1\}.$$

Введем условие $e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я работа выполняется } j\text{-м штатным исполнителем;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Необходимо найти: e_{ij} – распределение работ по штатным исполнителям; x_{ij} – момент начала работы; y_{ij} – момент окончания работы.

Математическая модель

Исходные данные:

$K(p)$ – множество работ, непосредственно предшествующих работе i ; $K(p) \subset I$, $i \in I, p \in I, p < i$;

t_{ij}^{\min} и t_{ij}^{\max} – минимальная и максимальная длительности выполнения работы i исполнителем j ;

h_i – начальные сроки, раньше которых работа i не может начаться;

d_i – директивные сроки (моменты времени завершения выполнения работ).

Ограничения:

1) j -й исполнитель может начать работу i не раньше, чем будет выполнена любая работа, предшествующая работе i ,

$$\min_{j \in J_{шт}} x_{ij} \geq \max_{(i-1) \in J_{шт}} \max_{k \in K(p)} y_{(i-1)k}, \quad i \in I; \tag{1}$$

2) длительность выполнения работ

$$t_{ij}^{\min} \leq (y_{ij} - x_{ij}) \leq t_{ij}^{\max}, \quad i \in I, \quad j \in I_{шт}; \tag{2}$$

3) порядок выполнения работ

$$x_{ij} \geq y_{ik}, \text{ либо } x_{ik} \geq y_{ij}, \quad i \in I, \quad j \in I_{шт}, \quad k \in I_{шт}; \tag{3}$$

4) выполнение заданных начальных сроков

$$\min_{j \in J} x_{ij} \geq h_i, \quad i \in I^H, \tag{4}$$

5) выполнение директивных сроков

$$\max_{j \in J} y_{ij} \geq d_i, \quad i \in I^D, \tag{5}$$

6) число исполнителей (каждая работа i выполняется одним исполнителем из $R(i)$:

$$\sum_{j \in R(i)} e_{ij} = 1; \tag{6}$$

$$x_{ij}, y_{ij} \in T. \quad (7)$$

Любое решение, удовлетворяющее условиям (1)-(6), является допустимым, отсюда получаем распределение исполнителей по работам.

Целевая функция

Поставим оптимизационную задачу. Переведем условие (5) из ограничений в целевую функцию. Введем штраф за нарушение директивных сроков:

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_{шт}} \lambda_i (d_i - y_{ij}) e_{ij}. \quad (8)$$

Получим задачу минимизации функции ($f \rightarrow \min$) при ограничениях (1)-(4), (6), (7).

Если в результате решения задачи (1)-(4), (6)-(8) получено оптимальное значение целевой функции $f_{\min} \leq f_{\text{пред}}$, то сторонних исполнителей привлекать нецелесообразно. В противном случае часть работ должна быть отдана сторонним исполнителям.

Для того, чтобы определить какие работы следует отдать сторонним исполнителям, сформулируем еще одну оптимизационную задачу.

Исходные данные:

Работы, которые могут быть выполнены исполнителями из $J_{ст}$, обозначим $I_{ст}$. Остальные работы – $I_{шт}$, $I_{шт} = I \setminus I_{ст}$.

Необходимо определить работы, которые будут отданы исполнителям из $J_{ст}$. Обозначим:

$$z_{i'j'} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я работа выполняется } j'\text{-м сторонним исполнителем;} \\ 0, & \text{в противном случае, } i' \in I_{ст}, j' \in J_{ст}. \end{cases}$$

$$z_{i'j'} = 1 - \sum_{j''} e_{ij''}.$$

Критерием отбора работ для сторонних исполнителей является общая стоимость – S , которая включает:

- стоимость оплаты труда штатных работников – S_1 , тыс. руб.;
- стоимость договоров подряда на выполнение отдельных работ по проекту, заключенных со сторонними исполнителями – S_2 , тыс. руб.

Величина S_1 зависит от времени выполнения всего проекта и определяется величинами окладов штатных сотрудников.

$$S_1 = \sum_{j'' \in J_{шт}} d_{\text{кон}} \cdot c_{j''}, \quad (9)$$

где $d_{\text{кон}}$ – общее время выполнения проекта (время окончания последней работы за вычетом времени начала первой работы), раб. дней;

$c_{j''}$ – оплата труда j'' -го штатного исполнителя, тыс. руб./раб. день.

Величина S_2 представляет собой денежные средства, которые заплачены сторонним организациям за выполнение некоторого объема работ:

$$S_2 = \sum_{i' \in I_{ст}} \sum_{j' \in J_{ст}} z_{i'j'} \cdot c_{i'j'}, \quad (10)$$

где $c_{i'j'}$ – стоимость i' -й работы, выполненной j' -м сторонним исполнителем, тыс. руб.

Целевая функция:

$$S = \sum_{j'' \in J_{шт}} d_{\text{кон}} \cdot c_{j''} + \sum_{i' \in I_{ст}} \sum_{j' \in J_{ст}} z_{i'j'} \cdot c_{i'j'} \rightarrow \min \quad (11)$$

Ограничения (1)-(7) имеют место для всех $i'j'$, таких, что $i' \in I$, $z_{i'j'} = 0 \forall j' \in J_{ст}$.

Разработанная математическая модель направлена на нахождение распределения работ по исполнителям, укладывающегося в заданное время и минимизирующее при этом общую стоимость работы исполнителей путём уменьшения времени их работы.

Заключение

Решение задачи о распределении работ классическими методами (сетового планирования, ветвей и границ, Ганта) не представляется возможным, так как время исполнения работы зависит от исполнителя, назначение исполнителя на конкретную работу происходит только после оптимального распределения предыдущих работ и зависит от времени выполнения предыдущих работ, также практически всегда существует возможность выполнения работ другими исполнителями.

Поставленная задача относится к классу NP-полных задач, т.е. для ее решения не существует эффективных алгоритмов определения оптимального решения, отличных от полного перебора [3-5]. Для решения такой задачи можно предложить приближенный алгоритм, получивший название «фронтальный» алгоритм ограниченного перебора. Такой алгоритм основан на идеологии «жадных» алгоритмов, то есть алгоритмов, в которых включенная в строящееся решение работа не может быть исключена из него на последующих шагах построения. Для каждого такта планирования формируется множество работ – фронт работ. На множестве работ из фронта работ задается строгий линейный порядок. Под фронтом понимается множество работ, для которых на данной итерации алгоритма могут быть рассчитаны интервалы времени начала и завершения работы (во фронт работ включаются все работы, для которых предшествующие работы уже распределены по исполнителям). При построении фронта работ руководствуемся тем, что работа i , для которой интервалы начала и завершения еще не определены, попадает во фронт работ, если $K(i) = 0 \vee K(i) \neq 0$ (все работы из множества $K(i)$ уже выполнены).

Построение эвристического алгоритма, базирующегося на разбиении работ по фронтам, и разработка на его основе прикладной компьютерной программы требует отдельного внимания и работы в данном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляева, Т.П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / Т.П. Беляева, А.П. Затворницкий // Информационные системы и технологии: науч.-техн. журн. № 3 (65), ФГОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК». Орел, 2011. – С. 5–10.
2. Беляева, Т.П. Управление распределением работ в микроэлектронике / Т.П. Беляева // Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач: материалы Междунар. молодеж. науч. шк. Воронеж: ИПЦ «Науч. книга», 2012. С. 195–197.
3. Прилуцкий, М.Х. Задачи распределения разнородных ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, Е.А. Кумагина // Перспектив. информ. технологии и интеллектуал. системы. 2000. – № 4. – С. 46–52.
4. Прилуцкий, М.Х. Управляемый фронтальный алгоритм решения задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, Е.А. Кумагина // Математическое моделирование. Оптимальное управление. Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2008. – № 6. – С. 152–155.
5. Прилуцкий, М.Х. Оптимальное распределение ресурсов в задачах календарного и объемно-календарного планирования / М.Х. Прилуцкий, С.Е. Власов // Тр. Нижегород. гос. технич. ун-та. Системы обработки информации и управления. 2004. Вып. 11.

Новикова Татьяна Петровна

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры вычислительной техники и информационных систем
8-951-550-11-07
E-mail: belyaeva_tp@mail.ru

Авсеева Ольга Владимировна

Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, моделирования и управления

Новиков Артур Игоревич

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж

Кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и сервиса

E-mail: karlss0n@yandex.ru

T.P. NOVIKOVA, O.V. AVSEEVA, A.I. NOVIKOV

**THE MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMAL DISTRIBUTION WORKS
IN NETWORK CANONICAL STRUCTURES**

The mathematical model of optimal distribution works by project contractors, reducing the time and minimizing project costs.

Keywords: *mathematical model, planning, distribution works, project.*

BIBLIOGRAPHY

1. Beljaeva, T.P. Optimal'noe planirovanie kompleksnyh proektov sozdaniya jelektronnoj komponent-noj bazy / T.P. Beljaeva, A.P. Zatvornickij // Informacionnye sistemy i tehnologii: nauch.-tehn. zhurn. № 3 (65), FGOU VPO «Gosuniversitet - UNPK». Orel, 2011. – S. 5–10.

2. Beljaeva, T.P. Upravlenie raspredeleniem rabot v mikrojelektronike / T.P. Beljaeva // Teorija i chis-lennye metody reshenija obratnyh i nekorrektnykh zadach: materialy Mezhdunar. molodezh. nauch. shk. Voronezh: IPC «Nauch. kniga», 2012. S. 195–197.

3. Priluckij, M.H. Zadachi raspredelenija raznorodnyh resursov v setevyh kanonicheskikh strukturah / M.H. Priluckij, E.A. Kumagina // Perspektiv. inform. tehnologii i intellektual. sistemy. 2000. – № 4. – S. 46–52.

4. Priluckij, M.H. Upravljaemyj frontal'nyj algoritm reshenija zadachi raspredelenija resursov v setevyh kanonicheskikh strukturah / M.H. Priluckij, E.A. Kumagina // Matematicheskoe modelirovanie. Opti-mal'noe upravlenie. Vestn. Nizhegorod. un-ta im. N.I. Lobachevskogo. 2008. – № 6. – S. 152–155.

5. Priluckij, M.H. Optimal'noe raspredelenie resursov v zadachah kalendarnogo i ob#emno-kalendarnogo planirovanija / M.H. Priluckij, S.E. Vlasov // Tr. Nizhegorod. gos. tehnič. un-ta. Sistemy obra-botki informacii i upravlenija. 2004. Vyp. 11.

Novikova Tatiana Petrovna

Voronezh State Academy of Forestry Engineering, Voronezh

Ph.D., professor of Computer Science and Information Systems

8-951-550-11-07

E-mail: belyaeva_tp@mail.ru

Avseeva Olga Vladimirovna

Voronezh State University of Engineering Technology, Voronezh

Ph.D., assistant professor of information technology, modeling and control

Novikov Arthur Igorevich

Voronezh State Academy of Forestry Engineering, Voronezh

Ph.D., assistant professor of cars and service

E-mail: karlss0n@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 639.2.081.117

А.А. НЕДОСТУП, А.О. РАЖЕВ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫБОРКИ ОРУДИЯ РЫБОЛОВСТВА С ПОМОЩЬЮ БАРАБАНА ФРИКЦИОННОГО ТИПА

На основе математической модели взаимодействия механизма фрикционного типа с канатно-веревочным изделием с учетом возможного проскальзывания (динамическая постановка задачи) разработана компьютерная модель, определены начальные условия, входные и выходные параметры и их зависимости. Рассмотрен алгоритм решения задачи Коши разностными методами численного интегрирования Адамса-Баушфорта, Адамса-Моултона и Рунге-Кутты. Предложена зависимость крутящего момента, приложенного к валу барабана от скорости его вращения.

Ключевые слова: компьютерная модель, канатно-веревочное изделие (КВИ), орудие рыболовства, механизм фрикционного типа (МФТ), численные методы, однородные дифференциальные уравнения.

Комплексная механизация процессов промышленного рыболовства включает в себя применение широкого спектра промысловых механизмов фрикционного типа (МФТ). Орудие рыболовства удерживается на поверхности тягового барабана фрикционного механизма при помощи силы трения и перемещается вместе с вращающимся барабаном без проскальзывания (буксования). В условиях промысла не всегда удастся избежать эффекта проскальзывания, поэтому актуально изучение фрикционного взаимодействия канатно-веревочных изделий (КВИ), из которых изготавливаются орудия рыболовства, и тягового барабана.

При моделировании динамики процесса выборки КВИ необходимо решить систему дифференциальных уравнений движения барабана и КВИ:

$$\begin{cases} J + \frac{m(L_1)D^2}{4} \frac{d\omega}{dt} = M(\omega) - F_{mp}(L_1, v) \frac{D}{2} \\ m(L_1) \frac{\partial v}{\partial t} = F_{mp}(L_1, v) \\ \frac{\partial \psi}{\partial t} = \omega \\ \frac{\partial L_1}{\partial t} = -v \end{cases} \quad (1)$$

при начальных условиях:

$$\psi(0) = 0, \quad \omega(0) = 0, \quad L_1(0) = L_0, \quad v(0) = 0, \quad (2)$$

где M - крутящий момент, приложенный к валу барабана;

ω - угловая скорость вала;

ψ - угол поворота вала;

t - время процесса моделирования;

D - диаметр барабана;

F_{mp} - сила трения КВИ о барабан;

J - момент инерции вала с барабаном (приведенный);

m - масса КВИ с уловом (с учетом присоединенной массы КВИ и улова);

v - линейная скорость движения КВИ с уловом;

L_1 - длина набегающей ветви КВИ;

L_0 - длина набегающей ветви КВИ в начале процесса моделирования.

Крутящий момент M зависит от конструкции барабана, применяемого двигателя и системы управления. В описываемой компьютерной модели используется следующая линейная зависимость крутящего момента от скорости вращения барабана (3):

$$M(\omega) = M_0 \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right), \quad (3)$$

где M_0 - начальный (пусковой) момент при нулевой скорости вращения;

ω_0 - скорость вращения барабана на холостом ходу.

Сила трения КВИ о барабан зависит от длины набегающей части КВИ L_1 и скорости движения КВИ с уловом.

Процесс моделирования начинается при начальных условиях (2) в момент времени $t=0$. Условие окончания процесса моделирования: $L_1 \leq H_6$, где H_6 - высота барабана над уровнем воды. Результатом моделирования является массив пар параметр-время $\{(\omega, t), (v, t), (\psi, t), (L_1, t)\}$, на основе которого можно построить пространственно-временные зависимости как в табличном, так и в графическом виде. Дополнительно к указанным параметрам в массив можно добавить промежуточные параметры, используемые для решения системы уравнений (1) такие, как силовые, геометрические параметры и коэффициент трения.

Преобразуя систему дифференциальных уравнений (1) к виду:

$$\begin{cases} \omega' = F_1(\omega, v, L_1) \\ v' = F_2(v, L_1) \\ \psi' = F_3(\omega) \\ L_1' = F_4(v) \end{cases}, \quad (4)$$

получим систему однородных дифференциальных уравнений (ОДУ) первого порядка, разрешенную относительно производных (постановка задачи Коши). Решим данную нормальную систему 4-го порядка разностными методами численного интегрирования Адамса 4-го порядка точности [1]. Выбор данных методов обусловлен тем, что они обладают лучшей по сравнению с методами Рунге-Кутты устойчивостью.

Выбор порядка точности k и величины шага h влияет на погрешность вычислений. Локальная погрешность методов Адамса k -го порядка точности:

$$\varepsilon = O(h^k). \quad (5)$$

Методы Адамса k -го порядка точности требуют предварительного вычисления решения в k начальных точках. При этом необходимо, чтобы эти стартовые значения были вычислены с той же степенью точности, с которой будет работать метод Адамса. Для вычисления дополнительных начальных значений будем использовать метод Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

Для увеличения точности интегрирования на каждом шаге алгоритма i вначале по формуле Адамса-Башфорта (6) для каждого из четырех уравнений (4) вычисляется прогнозируемое значение $x_{i+1}^{(p)}$, затем по формуле Адамса-Моултона (7) вычисляется скорректированное значение $x_{i+1}^{(k)}$.

$$x_{i+1}^{(p)} = x_i + \frac{h}{24} (55f_i - 59f_{i-1} + 37f_{i-2} - 9f_{i-3}) \quad (6)$$

$$x_{i+1}^{(k)} = x_i + \frac{h}{24} (9f_{i+1}^{(p)} + 19f_i - 5f_{i-1} - f_{i-2}) \quad (7)$$

Значение шага интегрирования h выбирается исходя из условий задачи на скорость моделирования и производительности вычислительной системы:

$$h = \max(h_{\min}, h_{\max} \min(K_t \frac{t_r}{nt_m}, 1)), \quad (8)$$

где t_r - реальное время от начала процесса моделирования;

t_m - модельное время;

n - количество итераций;

K_t - масштабный коэффициент времени моделирования (скорость моделирования);

h_{\min} - минимальный шаг моделирования;

h_{\max} - максимальный шаг моделирования.

Для определения t_r и t_m необходимо произвести тестовый проход алгоритма с заданным количеством итераций n (например, $n=100000$) и $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$.

Максимальный шаг h_{\max} выбирается исходя из необходимой минимальной точности моделирования (5). Минимальный шаг h_{\min} ограничен разрядностью мантиссы вещественных чисел в вычислительной системе. Чем меньше разрядность, тем больше минимальный шаг. Это связано с потерей точности (вплоть до обнуления) числа с меньшим порядком на операциях сложения/вычитания чисел различного порядка, так как перед сложением/вычитанием мантисса числа с меньшим порядком сдвигается вправо с потерей младших разрядов (денормализуется) [2]. Денормализация необходима для приведения складываемых/вычитаемых чисел к одному порядку.

Из формулы (8) следует то, что чем мощнее вычислительная система и меньше масштабный коэффициент времени, тем точнее результат моделирования. К тому же мощность вычислительной системы ограничивает максимальную скорость моделирования.

Блок-схема алгоритма решения системы ОДУ показана на рис. 1. Для начала работы алгоритма необходимо знать значения функций f_0, f_1, f_2 и f_3 в точках $t=\{0, h, 2h, 3h\}$. Значение функции f_0 - определяется исходя из начальных условий задачи. Значения остальных трех функций находятся классическим методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности [3].

Метод Рунге-Кутты является одним из алгоритмов численного приближенного решения ОДУ и их систем. Для классического метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности суммарная ошибка на конечном интервале интегрирования имеет порядок $O(h^4)$. На каждом шаге метода по формуле (9) на основе значения y_i предыдущего шага вычисляется новое значение y_{i+1} .

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad (9)$$

Вычисление нового значения проходит в четыре стадии (10)-(13):

$$k_1 = hf(t_i, y_i), \quad (10)$$

$$k_2 = hf(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{1}{2}k_1), \quad (11)$$

$$k_3 = hf(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{1}{2}k_2), \quad (12)$$

$$k_4 = hf(t_i + h, y_i + k_3). \quad (13)$$

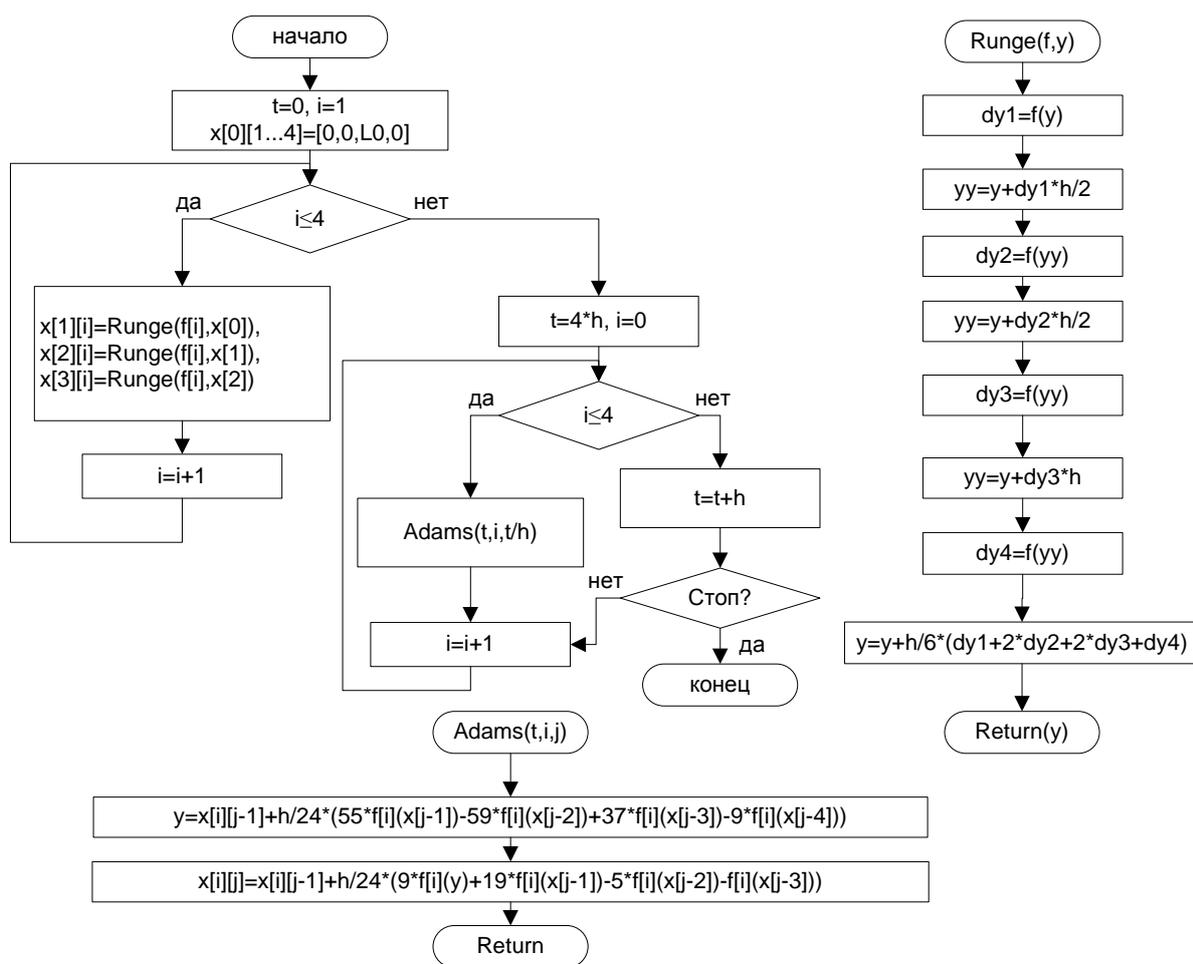


Рисунок 1 – Блок схема алгоритма решения системы ОДУ

$f[i]$ - i -я функция из множества $\{F_1, F_2, F_3, F_4\}$ системы уравнений (3); $x[i][0]=\omega_i$, $x[i][0]=v_i$, $x[i][0]=\psi_i$, $x[i][0]=L_{0i}$ - искомые значения на i -ой итерации.

Статья подготовлена в рамках выполнения гранта РФФИ № 11-08-00096-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ортега, Дж. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Дж. Ортега, У. Пул. – Пер. с англ.; Под ред. Абрамова А.А.-М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1986, 288 с.
2. Кацман, Ю.Я. Прикладная математика. Численные методы: учебное пособие / Ю.Я. Кацман. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 68 с.
3. Турчак, Л.И. Основы численных методов: учебное пособие / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 304 с.

Недоступ Александр Алексеевич

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград
Проректор по информатизации и развитию, к.т.н. доцент, зав. кафедрой промышленного рыболовства
E-mail: nedostup@klgtu.ru

Ражев Алексей Олегович

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград
Младший научный сотрудник научно-исследовательского центра рыболовства и рыбохозяйственного образования
E-mail: progacpp@live.ru

A.A. NEDOSTUP, A.O. RAZHEV

COMPUTER SIMULATION OF SAMPLING TOOLS FISHING WITH DRUM TYPE FRICTION

Based on the mathematical model of the mechanism of friction of type with rope making with the possibility of slippage (dynamical formulation of the problem) developed a computer model that defined the initial conditions, input and output parameters and their dependencies. An algorithm for the solution of the Cauchy difference methods, numerical integration of the Adams-Bashforth, Adams-Moulton and Runge-Kutta methods. The dependency of torque applied to the shaft of the drum on its rotation speed.

Keywords: computer model, rope making (RTA), fishing gear, the mechanism of friction type (MFT), numerical methods, the homogeneous differential equation.

BIBLIOGRAPHY

1. Ortega, Dzh. Vvedenie v chislennye metody reshenija differencial'nyh uravnenij / Dzh. Ortega, U. Pul. – Per. s angl.; Pod red. Abramova A.A.-M.: Nauka, gl. red. fiz.-mat. lit., 1986, 288 s.
2. Kacman, Ju.Ja. Prikladnaja matematika. Chislennye metody: uchebnoe posobie / Ju.Ja. Kacman. – Tomsk: Izd. TPU, 2000. – 68 s.
3. Turchak, L.I. Osnovy chislennyh metodov: uchebnoe posobie / L.I. Turchak, P.V. Plotnikov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: FIZMATLIT, 2003. – 304 s.

Nedostup Alexander Alexseevich

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad
Prorector for Information and Development, scientist
E-mail: nedostup@klgtu.ru

Razhev Aleksey Olegovich

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad
Junior researcher at the Research Center of Fisheries and fisheries education, scientist
E-mail: progacpp@live.ru

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОЛС, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ НАДЕЖНУЮ И ТОЧНУЮ РАБОТУ СТАНКОВ С ДИСТАНЦИОННЫМ ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В статье рассматриваются пути повышения эффективности функционирования станков с дистанционным числовым программным управлением за счет предложенной автоматизированной системы мониторинга технического состояния ВОЛС путем оптимизации планирования контроля и управления на основных этапах жизненного цикла данных технических средств.

Ключевые слова: *волоконно-оптические линии связи, станки с дистанционным числовым программным управлением, мониторинг, оптимизация, контроль, управление техническим состоянием.*

Стремительный прогресс в области информационных технологий привел к возможности интеграции быстроразвивающихся как существующих цифровых, так и виртуальных сетей в единую мультисервисную телекоммуникационную сеть, которая позволяет осуществить контроль станков с дистанционным числовым программным управлением.

Эффективность использования такой сети в значительной степени определяется качеством функционирования входящих в нее средств телекоммуникаций, зависящим от реализации задач на основных этапах их жизненного цикла: испытание, серийное производство, сертификация и эксплуатация.

Очевидным является стремление оптимальным образом решать все задачи на каждом из указанных этапов. Среди основных событий каждого этапа жизненного цикла средств телекоммуникаций, входящих в телекоммуникационные сети, весьма важное место занимает мониторинг технического состояния ВОЛС.

Мониторинг технического состояния ВОЛС может рассматриваться как процесс, реализуемый автоматизированной системой мониторинга (АСМ), включающей в себя коллектив людей, волокна, метрологическое обеспечение и систему управления.

Исследование методов контроля оптических кабелей по пассивным и активным волокнам позволило выделить перечень недостатков связанных с низкой информативностью усложняющей автоматизацию, оптимизацию процессов контроля и управления техническим состоянием ВОЛС.

Учитывая выявленные недостатки, в статье, опираясь на математическую формулировку задачи по оценке вида технического состояния ВОЛС, разработана модель автоматизированной системы мониторинга, представленная на рисунке 1.

Поскольку АСМ является организационно-технической, то ее модель включает в себя следующие основные элементы:

- тестируемые оптические волокна (1...N);
- TX (Transmitter) и RX (Receiver) – соответственно, передающее и приемное сетевые устройства;
- RTU (Remote Test Unit) – рефлектометр;
- LPF (Long Pass optical filter) и SPF (Short Pass optical filter) – оптические фильтры нижних и верхних частот;
- оптический кросс (1...N);
- коммуникационную сеть с устройствами преобразования сигнала;
- удаленное рабочее место оператора, включающее аппаратные и программные средства решения задач по оценке состояния ВОЛС, аналитической обработки информации

и формированию альтернатив для качественного управления техническим состоянием ВОЛС.

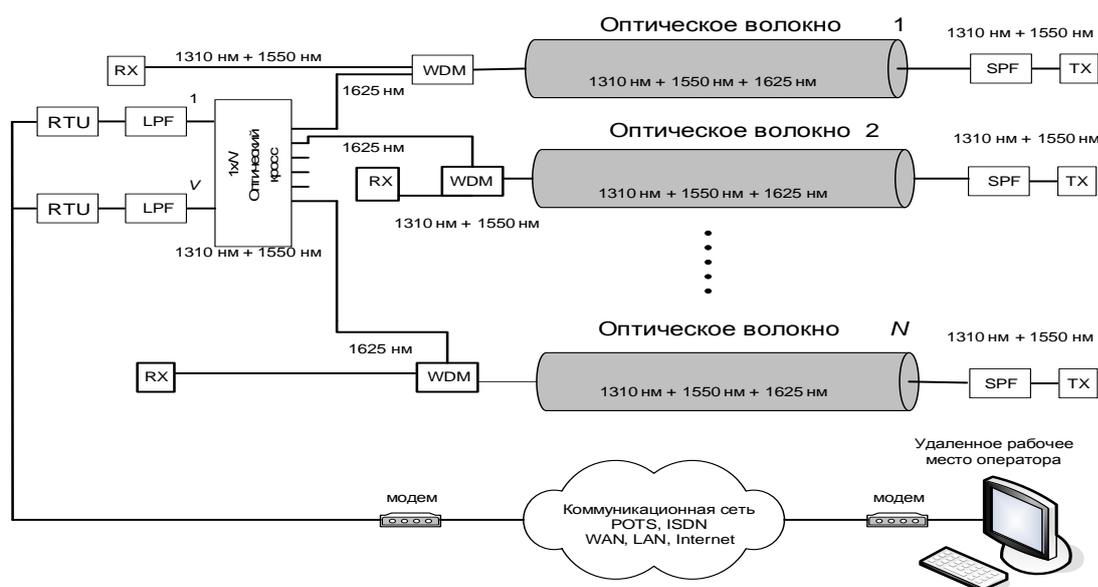


Рисунок 1 – Модель автоматизированной системы мониторинга ВОЛС

На первом этапе происходит обмен информацией между конечным оборудованием. Это поток оптических сигналов с длинами волн 1310 нм и 1550 нм.

На втором этапе к оптическому рефлектометру подключается тестируемое оптическое волокно. Оптический кросс-коммутатор по команде с ЭВМ, механически изменяя угол поворота зеркала, направляет в нужное волокно сигнал с рефлектометра (рис. 2).

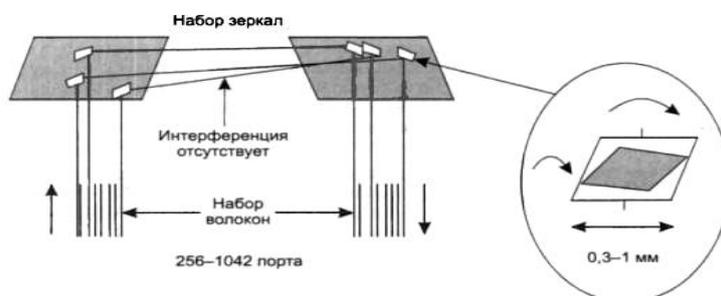


Рисунок 2 – Механизм выбора тестируемого волокна с помощью зеркала

Механические оптические коммутаторы используют механическое перемещение элемента, коммутирующего световой поток от входного оптического порта к выходному. Например: – вращающаяся призма или зеркало (плоское или сферическое вогнутое), при повороте на определенный фиксированный угол направляет луч от входного порта на выходной;

На третьем этапе рефлектометр посылает тестовый сигнал с длиной волны 1625 нм через оптический ответвитель. Принимает отраженные импульсы света – накапливает информацию о состоянии оптического волокна и формирует рефлектограмму.

На четвертом этапе рефлектометр по сети отправляет собранные данные на ЭВМ.

На пятом этапе ЭВМ принимает рефлектограмму, путем наложения шаблона, сравнивая ее с нормой, делая вывод о техническом состоянии оптического волокна и оповещая об этом оператора.

Для обеспечения низких потерь передачи, качественной изоляции и наилучшего подавления рассеянных волн, в рамках представленной модели, исследования будем проводить относительно длин волн 1310 нм, 1550 нм и 1625 нм.

Оптический кросс автоматически осуществляет опрос всех тестируемых волокон требуемого направления, генерируя последовательность заявок (рефлектограмм), в виде простейшего потока (стационарного, ординарного, с отсутствием последействия), поступающих на обслуживание модулей удаленного контроля. Коммуникационная сеть служит буфером для дистанционного контроля и управления техническим состоянием ВОЛС.

Для решения задачи оптимизации планирования мониторинга технического состояния ВОЛС требуется:

1. Выбрать такой режим обслуживания, при котором минимизируется значение средней длительности ожидания начала проведения мониторинга технического состояния ВОЛС $\tau_{\min(i\bar{e})}$ по критерию:

$$R = \{R_i\}, i = \overline{1, 5};$$

$$R^* = \arg \min_{P_{\text{пот}(i)} < P_{\text{пот(гр)}}} [\tau_{\text{ож}(i)}(\rho), \overline{1, 5}] \quad (1)$$

где R – режим обслуживания [3];

R^* – рациональный режим обслуживания.

$\tau_{\text{ож}}$ – средняя длительность ожидания начала проведения мониторинга технического состояния ВОЛС;

$P_{\text{пот}(i)}$ – вероятность потерь заявок в СМО, при i -ом режиме обслуживания [9];

$P_{\text{пот(гр)}}$ – требуемая вероятность потерь заявок в СМО;

2. Определить минимальное число $V_{\min}(\hat{P}_{\text{ТСВ}})$ модулей удаленного контроля, обеспечивающих требуемую эффективность мониторинга технического состояния ВОЛС по критерию:

$$V = \{V_j\}, j = \overline{J};$$

$$V_{(\text{од})\min} = \arg \min_{P_{\text{ТСВ}(\text{од})}(V_{(\text{од})\min}) \geq P_{\text{ТСВ}(\text{гр})}}^{R=R^*} [V_{(\text{од})}(\hat{P}_{\text{ТСВ}})];$$

$$V_{(\text{гр})\min} = \arg \min_{P_{\text{ТСВ}(\text{гр})}(V_{(\text{гр})\min}) \geq P_{\text{ТСВ}(\text{гр})}}^{R=R^*} [V_{(\text{гр})}(\hat{P}_{\text{ТСВ}})]; \quad (2)$$

$V_{(\text{од})\min}, V_{(\text{гр})\min}$ – минимальное число модулей удаленного контроля для одиночного и группового типов обслуживания;

$\hat{P}_{\text{ТСВ}}$ – значение вероятности $P_{\text{ТСВ}}(V)$, ближайшее с избытком к значению требуемой вероятности $P_{\text{ТСВ}(\text{гр})}$;

$P_{\text{ТСВ}}(V)$ – апостериорная вероятность определения вида ТС ВОЛС.

3. Выбрать оптимальный тип обслуживания (индивидуальный или групповой) по критерию:

$$S = \{S_{\text{од}}, S_{\text{гр}}\};$$

$$S_{\text{opt}} = \arg \max_{V \in \{V_{(\text{од})\min}, V_{(\text{гр})\min}\}}^{R=R^*} [P_{\text{ТСВ}(\text{од})}(\rho), P_{\text{ТСВ}(\text{гр})}(\rho)]; \quad (3)$$

где S – тип обслуживания в СМО;

S_{opt} – оптимальный тип обслуживания в СМО;

$P_{\text{ТСВ}(\text{од})}(\rho)$ – вероятность определения вида ТС ВОЛС при одиночном типе обслуживания;

$P_{\text{ТСВ}(\text{гр})}(\rho)$ – вероятность определения вида ТС ВОЛС при групповом типе обслуживания.

ВЫВОД

С целью повышения эффективности функционирования станков с дистанционным числовым программным управлением в статье предложена методика оптимизации планирования мониторинга техническим состоянием ВОЛС позволяющая:

- выбрать режим, дисциплину и тип обслуживания ВОЛС (с отказами или с очередями, в порядке очереди или с приоритетами, индивидуальное или групповое);
- определить требуемое количество модулей удаленного контроля оптических волокон;
- оценить и управлять в реальном формате времени техническим состоянием волоконно-оптических линий связи.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: учеб. пособие для вузов / Е.С. Вентцель. – М.: Высш. школа, 2001. – 575 с.
2. Корнышев, Ю.Н. Теория и телетрафика / Ю.Н. Корнышев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. – М.: Радио и связь, 1996.

Орешин Андрей Николаевич
Академия ФСО России, г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент
тел: 89103040001

Шкарбуль Ростислав Валериевич
Академия ФСО России, г. Орёл
Курсант
тел: 89103040001

A.N. ORESHIN, R.V. SHKARBUL

DEVELOPMENT OF PLANING OPTIMIZATION TECHNIQUES FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF FIBER OPTICAL TRANSMITTING LINE

The article discusses the ways of increase of efficiency of functioning of the machine with remote numerically controlled by the proposed automated system for monitoring the technical condition of FOCL, through the optimization of planning control on the major stages of the life cycle of data technical means.

Keywords: fiber-optic communication lines, machines with remote numerical program management, monitoring, optimization, control, management of technical conditions.

BIBLIOGRAPHY

1. Ventcel', E.S. Teorija verojatnostej: ucheb. posobie dlja vuzov / E.S. Ventcel'. – М.: Vyssh. shkola, 2001. – 575 s.
2. Kornyshev, Ju.N. Teorija i teletrafika / Ju.N. Kornyshev, A.P. Pshenichnikov, A.D. Harkevich. – М.: Radio i svjaz', 1996.

Oreshin Andrey Nikolaevich
Academy FSO Russua, Orel
Can. Tech. social. Docent
Phone: 89103040001

Shkarbul Rostislav Valerievich
Academy FSO Russua, Orel
Student
Phone: 89103040001

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ ЦИЛИНДР-КОНУС

Исследуется трехмерное напорно-сдвиговое течение вязкой несжимаемой жидкости в несоосном канале формы цилиндр-конус. Математическая модель основана на базовых законах сохранения массы и импульса, позволяет учитывать несоосность и конусность канала. Решение задачи получено численно с применением метода контрольных объемов. Результаты протестированы на асимптотических случаях.

Ключевые слова: вязкая жидкость, несоосный канал, напорно-сдвиговое течение, уравнение Навье-Стокса, уравнение неразрывности, метод контрольных объемов.

ВВЕДЕНИЕ

Напорно-сдвиговые течения вязкой жидкости в каналах переменной геометрии имеют место в опорных и уплотнительных элементах роторных машин. Учитывая ответственность рассматриваемых элементов, которые в частности используются в качестве уплотнений в турбонасосных агрегатах жидкостных ракетных двигателей, математическое моделирование и разработка практического инструментария расчета основных характеристик такого рода течений является актуальной задачей. Несмотря на простоту конструкции таких каналов, теоретическое описание процесса течения вязкой жидкости является сложной задачей. На сегодняшний день наиболее исследованными течениями являются течения в каналах с постоянным вдоль оси вращения зазором. Что касается рассматриваемого канала цилиндр-конус, существующие на сегодняшний день работы не обеспечивают формирование надежной теоретической базы, т.к. являются либо экспериментальными, либо учитывают не все значимые факторы. Применение же универсальных программных комплексов для рассматриваемого течения сталкивается с определенными сложностями, в частности в виду малой толщины канала решение не всегда получается устойчивым. К тому же необходима верификация результатов, получаемых для ранее не исследованных объектов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследуется ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости в канале, образованном неподвижным конусом заданных радиусов R_1 и R_2 и эксцентрично расположенном в нем вращающемся с постоянной угловой скоростью ω цилиндром радиуса r . Величины радиальных зазоров при соосном положении равны соответственно h_{01} и h_{02} . Длина канала равна L . Жидкость подается с одного торца под давлением P_1 в направлении сужения канала и вытекает на другом торце под давлением P_0 . Расчетная область в цилиндрической системе координат представлена на рисунке 1. Базовыми уравнениями, описывающими исследуемый процесс, являются уравнения Навье-Стокса и неразрывности.

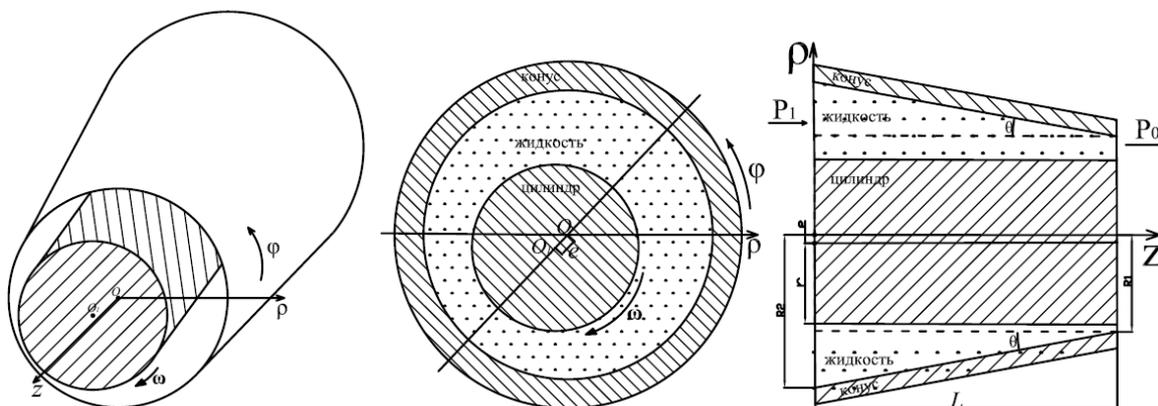


Рисунок 1 – Расчетная область

Учитывая переменную геометрию исследуемой области, уравнение Навье-Стокса записывается в трехмерной постановке. Упрощение уравнений, применяя допущения Рейнольдса [1], для рассматриваемой области течения не является корректным, что было показано с помощью анализа размерностей в работе [2]. Таким образом, для получения адекватного решения необходимо учитывать все нелинейные слагаемые инерции и все члены вязкости уравнений. В результате обезразмеривания характерными величинами, система уравнений в цилиндрической системе координат принимает вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & A^2 V_\rho \frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} + A \frac{V_\varphi}{\rho+B} \frac{\partial V_\rho}{\partial \varphi} + A^2 V_z \frac{\partial V_\rho}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{\rho+B} = -Eu \frac{\partial P}{\partial \rho} + \\ & + \frac{A}{Re} \left(\frac{\partial^2 V_\rho}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho+B} \frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{(\rho+B)^2} \frac{\partial^2 V_\rho}{\partial \varphi^2} + A^2 \frac{\partial^2 V_\rho}{\partial z^2} - \frac{V_\rho}{(\rho+B)^2} - \frac{2}{A(\rho+B)^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \right); \\ & AV_\rho \frac{\partial V_\varphi}{\partial \rho} + \frac{V_\varphi}{\rho+B} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + AV_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + A \frac{V_\rho V_\varphi}{\rho+B} = \\ & = -Eu \frac{1}{\rho+B} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho+B} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \rho} + \frac{1}{(\rho+B)^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} + A^2 \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} - \frac{V_\varphi}{(\rho+B)^2} + \frac{2A}{(\rho+B)^2} \frac{\partial V_\rho}{\partial \varphi} \right); \\ & AV_\rho \frac{\partial V_z}{\partial \rho} + \frac{V_\varphi}{\rho+B} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} + AV_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -AEu \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho+B} \frac{\partial V_z}{\partial \rho} + \frac{1}{(\rho+B)^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \varphi^2} + A^2 \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right); \\ & \frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} + \frac{V_\rho}{\rho+B} + \frac{1}{A} \frac{1}{\rho+B} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0; \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $A = (\xi + 1)(\beta + \eta\gamma)$, $B = \frac{\gamma - \xi(\beta + \eta\gamma)}{A}$ - безразмерные коэффициенты, составленные из геометрических параметров;

$$\hat{\rho} = \frac{\rho - (r - e)}{h_{02} + e}, \quad \hat{z} = \frac{z}{L} \text{ - безразмерные радиальная и осевая координаты соответственно;}$$

$$V_\rho = \frac{V_\rho}{\delta V^*}, \quad \hat{V}_\varphi = \frac{V_\varphi}{V^*}, \quad \hat{V}_z = \frac{V_z}{V^*} \text{ - безразмерные радиальная, тангенциальная и осевая}$$

компоненты скорости течения жидкости соответственно;

$$\hat{P} = \frac{P - P_0}{\Delta P} \text{ - безразмерная функция давления;}$$

$$V^* = \sqrt{V_{\varphi max}^2 + V_{z max}^2} \text{ - обезразмеривающая скорость для } V_\varphi \text{ и } V_z;$$

$$V_{\varphi max} = \omega r \text{ - тангенциальная компонента скорости;}$$

$$V_{z max} = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left(R_2^2 - \frac{(R_2 + r)^2}{4} + \frac{R_2^2 - r^2}{\ln \frac{R_2}{r}} \ln \frac{R_2 + r}{2R_2} \right) \text{ - осевая компонента скорости;}$$

$$\beta = \frac{R_2 - R_1}{L}, \quad \gamma = \frac{r}{L}, \quad \eta = \frac{h_{01}}{r}, \quad \xi = \frac{e}{h_{02}} \text{ - безразмерные геометрические параметры;}$$

$$Re = \frac{V^*(h_{02} + e)}{\nu}, \quad Eu = \frac{\Delta P}{\rho_{ж}(V^*)^2} \text{ - числа Рейнольдса и Эйлера соответственно.}$$

Границы расчетной области переменны по пространственным координатам, в связи с чем, для задания граничных условий были определены их уравнения в безразмерном виде:

$$\hat{R}(\hat{z}) = -\frac{\beta}{A} \hat{z} + 1, \quad \begin{cases} \hat{r}(\varphi, \hat{z}) = \frac{1}{A} \left(\xi(\beta + \eta\gamma)(1 + \cos(\varphi - \alpha)) - \gamma + \sqrt{1 - \xi^2(\beta + \eta\gamma)^2 \sin^2(\varphi - \alpha)} \right); \\ \varphi \in [0; 2\pi] \end{cases} \quad (2)$$

Граничные условия для вектора скорости на поверхностях цилиндра и конуса записаны в виде:

$$\begin{cases} \hat{V}_\rho(\hat{r}(\varphi), \varphi, \hat{z}) = 0, \\ \hat{V}_\varphi(\hat{r}(\varphi), \varphi, \hat{z}) = \frac{\omega r}{V^*}, \\ \hat{V}_z(\hat{r}(\varphi), \varphi, \hat{z}) = 0, \end{cases} \quad \begin{cases} \hat{V}_\rho(\hat{R}(\hat{z}), \varphi, \hat{z}) = 0, \\ \hat{V}_\varphi(\hat{R}(\hat{z}), \varphi, \hat{z}) = 0, \\ \hat{V}_z(\hat{R}(\hat{z}), \varphi, \hat{z}) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Граничные условия для каждой компоненты скорости на торцах:

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{V}_i}{\partial \hat{z}}(\hat{\rho}, \varphi, 0) = 0, \\ \frac{\partial \hat{V}_i}{\partial \hat{z}}(\hat{\rho}, \varphi, 1) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Граничные условия для функции давления на торцах:

$$\hat{P}(\hat{\rho}, \varphi, 0) = 1, \quad \hat{P}(\hat{\rho}, \varphi, 1) = 0. \quad (5)$$

Так как область является замкнутой, то по тангенциальной координате действует условие периодичности для каждой неизвестной функции:

$$F_i(\rho, 0, z) = F_i(\rho, 2\pi, z), \quad \frac{\partial \hat{F}_i(\hat{\rho}, 0, \hat{z})}{\partial \varphi} = \frac{\partial \hat{F}_i(\hat{\rho}, 2\pi, \hat{z})}{\partial \varphi} \quad (6)$$

Поля скоростей и давлений исследуемого процесса получены на основе математической модели (1)-(6) с применением метода контрольных объемов (КО). Расчетная область была разбита на контрольные объемы по принципу «шахматной сетки» [3]. Для простоты на рисунке 2 представлена дискретизация соосной области, однако учитывается, что грани КО переменны по тангенциальной координате.

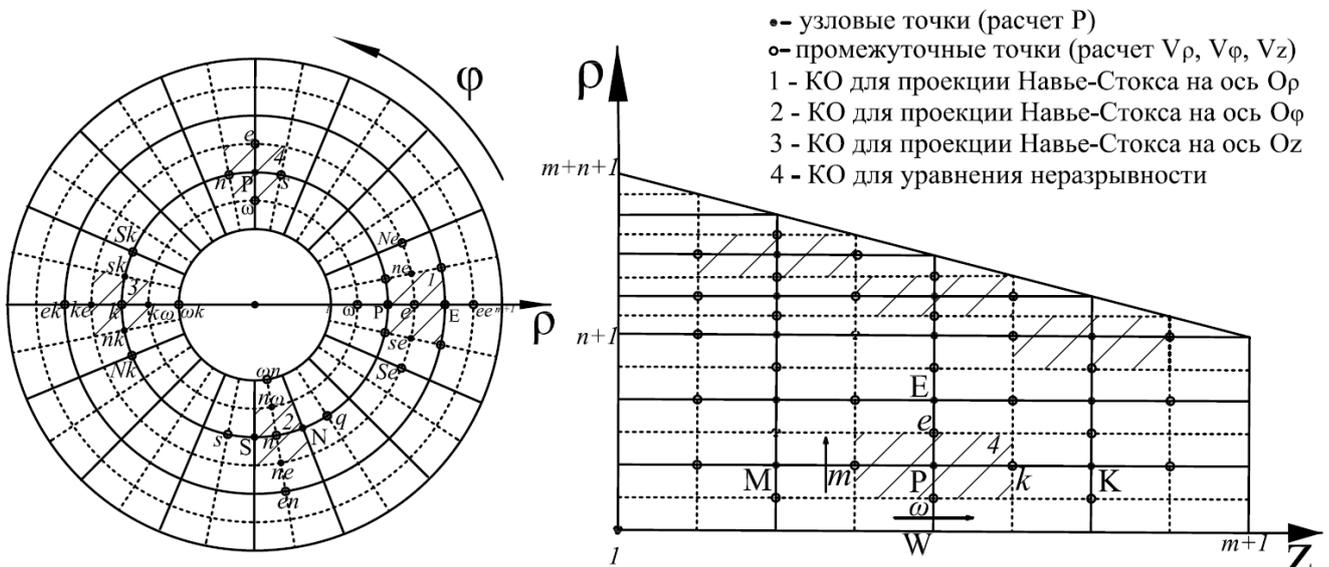


Рисунок 2 – Дискретизация расчетной области

Уравнения (1) проинтегрированы по соответствующим КО $\hat{\Omega} = (\hat{\rho} + B) d\hat{\rho}d\varphi d\hat{z}$ с применением ф. Гаусса-Остроградского и аппроксимацией в проекциях уравнения Навье-Стокса компонент скоростей экспоненциальной функцией, например для компоненты V_ρ на отрезке $[\hat{\rho}_e; \hat{\rho}_{ee}]$:

$$\hat{V}_\rho = \hat{V}_{\rho_e} + (\hat{V}_{\rho_{ee}} - \hat{V}_{\rho_e}) \frac{\exp(A\hat{V}_\rho \operatorname{Re}(\hat{\rho} - \hat{\rho}_e)) - 1}{\exp(A\hat{V}_\rho \operatorname{Re}\Delta\hat{\rho}) - 1} \quad (7)$$

После замены в уравнении Навье-Стокса всех компонент скорости соответствующими экспоненциальными функциями вида (7), проекции примут вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & -\hat{a}_e \hat{V}_{\rho_e} + \hat{a}_E \hat{V}_{\rho_{ee}} + \hat{a}_P \hat{V}_{\rho_\omega} + \hat{a}_{ne} \hat{V}_{\rho_{Ne}} + \hat{a}_{se} \hat{V}_{\rho_{Se}} + \hat{a}_{ke} \hat{V}_{\rho_{Ke}} + \hat{a}_{me} \hat{V}_{\rho_{Me}} = \\ & = Eu\Delta\varphi\Delta z(\hat{\rho}_e + B)(\hat{P}_E - \hat{P}_P) + \frac{\Delta\hat{\rho}\Delta\hat{z}}{Re} \left(\frac{\hat{V}_{\varphi_{ne}}}{\hat{\rho}_{ne} + B} - \frac{\hat{V}_{\varphi_{se}}}{\hat{\rho}_{se} + B} \right); \\ & -\hat{a}_n \hat{V}_{\varphi_n} + \hat{a}_{ne} \hat{V}_{\varphi_{en}} + \hat{a}_{n\omega} \hat{V}_{\varphi_{\omega n}} + \hat{a}_N \hat{V}_{\varphi_q} + \hat{a}_P \hat{V}_{\varphi_s} + \hat{a}_{nk} \hat{V}_{\varphi_{kn}} + \hat{a}_{nm} \hat{V}_{\varphi_{mn}} = \\ & = Eu\Delta\hat{\rho}\Delta\hat{z}(\hat{P}_N - \hat{P}_P) - \frac{A\Delta\hat{\rho}\Delta\hat{z}}{Re} \left(\frac{\hat{V}_{\rho_N}}{\hat{\rho}_N + B} - \frac{\hat{V}_{\rho_P}}{\hat{\rho}_P + B} \right); \\ & -\hat{a}_k \hat{V}_{z_k} + \hat{a}_{ke} \hat{V}_{z_{ek}} + \hat{a}_{k\omega} \hat{V}_{z_{\omega k}} + \hat{a}_{nk} \hat{V}_{z_{Nk}} + \hat{a}_{sk} \hat{V}_{z_{Sk}} + \hat{a}_K \hat{V}_{z_{kk}} + \hat{a}_P \hat{V}_{z_m} = \\ & = AEu\Delta\varphi \frac{(\hat{\rho}_{ke} + B)^2 - (\hat{\rho}_{k\omega} + B)^2}{2} (\hat{P}_K - \hat{P}_P). \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где \hat{a}_i - коэффициенты перед неизвестными, например $\hat{a}_E = \frac{A^2(\hat{\rho}_E + B)\hat{F}_E}{\exp(APe_E) - 1}$,

$$\hat{a}_P = A^2(\hat{\rho}_P + B)\hat{F}_P + \frac{A^2(\hat{\rho}_P + B)\hat{F}_P}{\exp(APe_P) - 1}, \quad \hat{F}_{E(P)} = \hat{V}_{\rho_{E(P)}} \Delta\varphi\Delta\hat{z}, \quad Pe_{E(P)} = Re\hat{V}_{\rho_{E(P)}} \Delta\hat{\rho}.$$

В связи с нелинейностью системы (1) процедура определения неизвестных функций компонент скорости и давления является итерационной: каждая неизвестная представляется в виде их суммы на предыдущей итерации и приращений $F^{S+1} = F^S + h_F^{S+1}$, тогда задавая приближенное поле давлений можно определить поле скоростей на S итерации из следующих уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} & -\hat{a}_e \hat{V}_{\rho_e}^S + \hat{a}_E \hat{V}_{\rho_{ee}}^S + \hat{a}_P \hat{V}_{\rho_\omega}^S + \hat{a}_{ne} \hat{V}_{\rho_{Ne}}^S + \hat{a}_{se} \hat{V}_{\rho_{Se}}^S + \hat{a}_{ke} \hat{V}_{\rho_{Ke}}^S + \hat{a}_{me} \hat{V}_{\rho_{Me}}^S = \\ & = Eu\Delta\varphi\Delta\hat{z}(\hat{\rho}_e + B)(\hat{P}_E^S - \hat{P}_P^S) + \frac{\Delta\hat{\rho}\Delta\hat{z}}{Re} \left(\frac{\hat{V}_{\varphi_{ne}}^S}{\hat{\rho}_{ne} + B} - \frac{\hat{V}_{\varphi_{se}}^S}{\hat{\rho}_{se} + B} \right); \\ & -\hat{a}_n \hat{V}_{\varphi_n}^S + \hat{a}_{ne} \hat{V}_{\varphi_{en}}^S + \hat{a}_{n\omega} \hat{V}_{\varphi_{\omega n}}^S + \hat{a}_N \hat{V}_{\varphi_q}^S + \hat{a}_P \hat{V}_{\varphi_s}^S + \hat{a}_{nk} \hat{V}_{\varphi_{kn}}^S + \hat{a}_{nm} \hat{V}_{\varphi_{mn}}^S = \\ & = Eu\Delta\hat{\rho}\Delta\hat{z}(\hat{P}_N^S - \hat{P}_P^S) - \frac{A\Delta\hat{\rho}\Delta\hat{z}}{Re} \left(\frac{\hat{V}_{\rho_N}^S}{\hat{\rho}_N + B} - \frac{\hat{V}_{\rho_P}^S}{\hat{\rho}_P + B} \right); \\ & -\hat{a}_k \hat{V}_{z_k}^S + \hat{a}_{ke} \hat{V}_{z_{ek}}^S + \hat{a}_{k\omega} \hat{V}_{z_{\omega k}}^S + \hat{a}_{nk} \hat{V}_{z_{Nk}}^S + \hat{a}_{sk} \hat{V}_{z_{Sk}}^S + \hat{a}_K \hat{V}_{z_{kk}}^S + \hat{a}_P \hat{V}_{z_m}^S = \\ & = AEu\Delta\varphi \frac{(\hat{\rho}_{ke} + B)^2 - (\hat{\rho}_{k\omega} + B)^2}{2} (\hat{P}_K^S - \hat{P}_P^S); \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Для определения приращений получены уравнения вычитанием из уравнений системы (8) на $S+1$ итерации соответствующих уравнений (9). Для замыкания полученной системы добавлено уравнение неразрывности:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & -\hat{a}_e \hat{h}_{\rho_e}^{S+1} + \hat{a}_E \hat{h}_{\rho_{ee}}^{S+1} + \hat{a}_P \hat{h}_{\rho_\omega}^{S+1} + \hat{a}_{ne} \hat{h}_{\rho_{Ne}}^{S+1} + \hat{a}_{se} \hat{h}_{\rho_{Se}}^{S+1} + \hat{a}_{ke} \hat{h}_{\rho_{Ke}}^{S+1} + \hat{a}_{me} \hat{h}_{\rho_{Me}}^{S+1} - \\
 & -Eu\Delta\varphi\Delta\hat{z}(\hat{\rho}_e + B)\left(\hat{h}_{PE}^{S+1} - \hat{h}_{PP}^{S+1}\right) = 0; \\
 & -\hat{a}_n \hat{h}_{\varphi_n}^{S+1} + \hat{a}_{ne} \hat{h}_{\varphi_{en}}^{S+1} + \hat{a}_{n\omega} \hat{h}_{\varphi_{\omega n}}^{S+1} + \hat{a}_N \hat{h}_{\varphi_q}^{S+1} + \hat{a}_P \hat{h}_{\varphi_s}^{S+1} + \hat{a}_{nk} \hat{h}_{\varphi_{kn}}^{S+1} + \hat{a}_{nm} \hat{h}_{\varphi_{mn}}^{S+1} - \\
 & -Eu\Delta\hat{\rho}\Delta\hat{z}\left(\hat{h}_{PN}^{S+1} - \hat{h}_{PP}^{S+1}\right) = 0; \\
 & -\hat{a}_k \hat{h}_{z_k}^{S+1} + \hat{a}_{ke} \hat{h}_{z_{ek}}^{S+1} + \hat{a}_{k\omega} \hat{h}_{z_{\omega k}}^{S+1} + \hat{a}_{nk} \hat{h}_{z_{Nk}}^{S+1} + \hat{a}_{sk} \hat{h}_{z_{Sk}}^{S+1} + \hat{a}_K \hat{h}_{z_{kk}}^{S+1} + \hat{a}_P \hat{h}_{z_m}^{S+1} - \\
 & -AEu\Delta\varphi \frac{(\hat{\rho}_{ke} + B)^2 - (\hat{\rho}_{k\omega} + B)^2}{2} \left(\hat{h}_{PK}^{S+1} - \hat{h}_{PP}^{S+1}\right) = 0; \\
 & \hat{b}_e \hat{h}_{\rho_e}^{S+1} - \hat{b}_\omega \hat{h}_{\rho_\omega}^{S+1} + \hat{b}_n \hat{h}_{\varphi_n}^{S+1} - \hat{b}_s \hat{h}_{\varphi_s}^{S+1} + \hat{b}_k \hat{h}_{z_k}^{S+1} - \hat{b}_m \hat{h}_{z_m}^{S+1} = \\
 & = -(\hat{b}_e \hat{V}_{\rho_e}^S - \hat{b}_\omega \hat{V}_{\rho_\omega}^S) - (\hat{b}_n \hat{V}_{\varphi_n}^S + \hat{b}_s \hat{V}_{\varphi_s}^S) - (\hat{b}_k \hat{V}_{z_k}^S + \hat{b}_m \hat{V}_{z_m}^S)
 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Таким образом, процедура определения полей скоростей и давлений заключается в определении приближенного поля скоростей (9) по заданному приближенному полю давлений затем из системы (10) определяются соответствующие приращения. Процедура продолжается до заданной точности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее представлены некоторые результаты для напорно-сдвигового течения вязкой несжимаемой жидкости в несоосном канале цилиндр-конус для входных данных, приведенных в таблице 1.

Таблица 1 – Входные данные

ΔP	P1	n, об/мин	r, м	h ₀₁	β	L, м	e	A	ρ _ж	μ
3.5e+5	5.5e+5	400	0.1	0.0002	1.0e-3	0.1	0.2h ₀₁	0	894.5	0.62

На рисунке 3 представлено распределение осевой скорости по длине и толщине канала в области максимального зазора по тангенциальной координате. Максимальной скорости осевой поток достигает в конце канала.

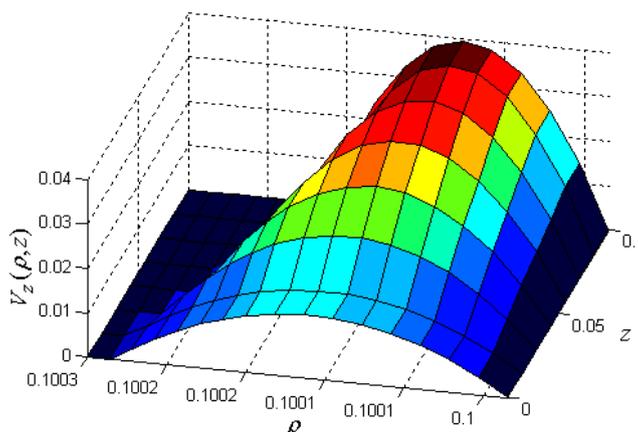


Рисунок 3 – Осевая компонента скорости

На рисунке 4 представлено изменение тангенциальной компоненты скорости по длине в середине канала. Вдали от стенок канала тангенциальная скорость уменьшается по его длине. По толщине канала изменение тангенциальной компоненты близко к линейному.

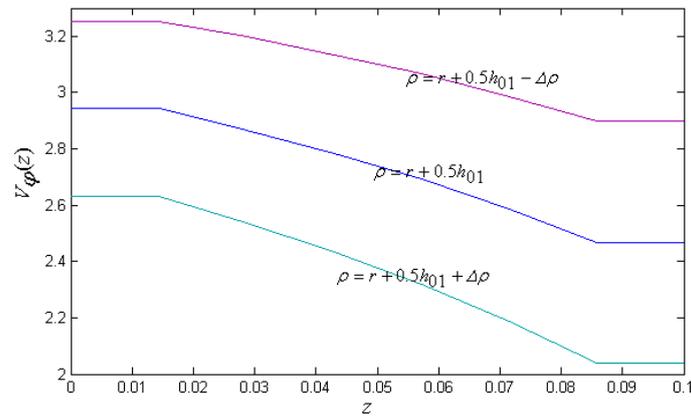


Рисунок 4- Тангенциальная компонента скорости по длине канала при $\varphi=\alpha$

При наличии осевого перепада и вращающегося внутреннего цилиндра давление по длине канала изменяется нелинейно и имеет экстремум, что представлено на рисунке 5а.

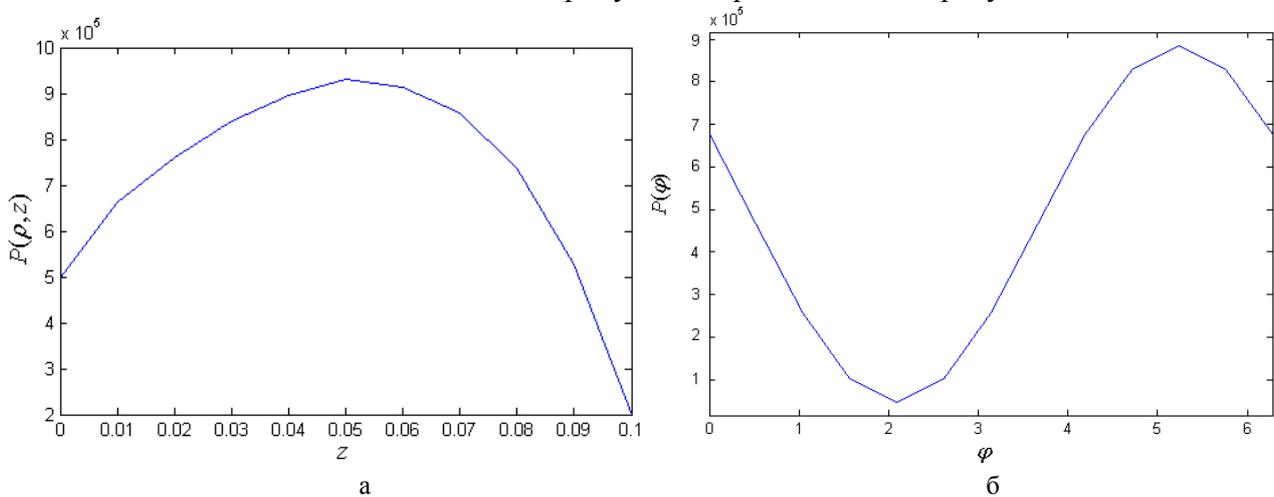


Рисунок 5 - Давление по длине канала и по тангенциальной координате:

а – профиль давления по осевой координате; б – профиль давления по тангенциальной координате

По тангенциальной координате профиль давления представлен на рисунке 5б, из которого видно, что максимальное давление приходится в зону перед минимальным радиальным зазором, что обуславливает несущую способность смазочного слоя.

На рисунке 6 приведена зависимость расхода от величины эксцентриситета. Установлено, что ростом несоосности величина расхода растет по нелинейному закону. С увеличением конусности при фиксированной величине зазора на входе расход снижается.

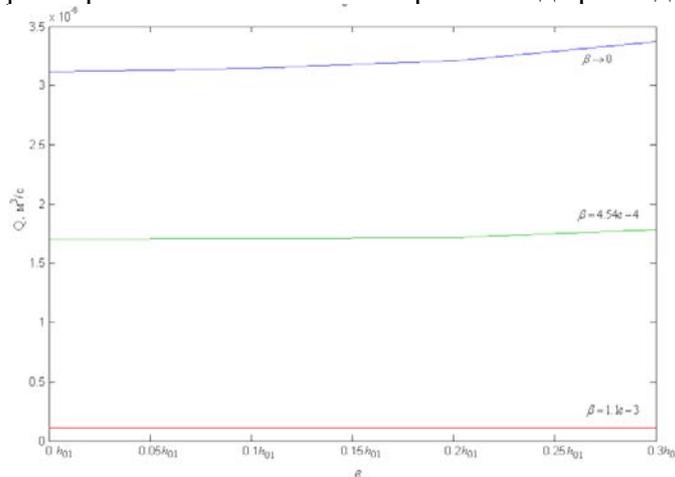


Рисунок 6 – Зависимость расхода от конусности и эксцентриситета

Таким образом, в статье представлена постановка краевой задачи о напорно-сдвиговом течении вязкой несжимаемой жидкости в несоосном канале, образованном вращающимся цилиндром и неподвижным конусом. С помощью метода контрольных объемов получен дискретный аналог математической модели. Поля скоростей и давлений получены численно, в результате чего были сделаны следующие выводы:

- при наличии конусности области максимальной скорости осевой поток достигает в конце канала, причем с увеличением эксцентриситета значение максимума увеличивается и перемещается в зону большего радиального зазора;
- давление в слое жидкости по длине канала изменяется нелинейно и имеет максимум внутри канала;
- по тангенциальной координате давление принимает максимальное значение перед минимальным радиальным зазором, обеспечивая несущую способность смазочного слоя;
- с увеличением эксцентриситета растет величина расхода жидкости.

Для проверки адекватности полученных результатов математическая модель была протестирована на частных случаях с известными аналитическими и приближенными решениями. Результаты были сопоставлены с аналитическими для случаев соосных цилиндров при напорном и сдвиговом течениях, максимальная погрешность составляет менее 2%. Также при малых углах конусности было установлено, что значение расхода жидкости хорошо согласуется с результатами работы [4] для случая напорного течения в соосном канале формы цилиндр-конус. Однако с увеличением эксцентриситета и угла конусности более 2° расхождения значительно увеличиваются, что объясняется допущениями, принятыми в работе [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
2. Корнаева, Е.П. Моделирование течения жидкости в уплотнении малой конусности. Фундаментальные проблемы техники и технологии / Е.П. Корнаева, Л.А. Савин. - 2011. - №3 (287). - С.54-59.
3. Patankar, S. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980. – 148p.
4. Никитин, Г.А. Щелевые и лабиринтные уплотнения гидроагрегатов / Г.А. Никитин. - М.: Машиностроение, 1982, 134с.

Савин Леонид Алексеевич

Госуниверситет - УНПК, г. Орел

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг»

Тел. (4862) 48-37-66

E-mail: savin@ostu.ru

Корнаева Елена Петровна

Госуниверситет - УНПК, г. Орел

Кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры «Информационные системы»

Тел. +7(903) 886-83-56

E-mail: lenoks_box@mail.ru

Архипов Виктор Петрович

Старооскольский технологический институт (филиал) НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол

Кандидат физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой «Высшей математики»

Тел. (4725) 32-98-41

E-mail: varhipov@inbox.ru

L.A. SAVIN, E.P. KORNAEVA, V.P. ARKHIPOV

MODELING OF FREE-DIMENSIONAL FLUID FLOW IN THE CYLINDER-CONE GAP

The three-dimensional enforced and shear flow of viscous incompressible fluid in the cylinder-cone gap is investigated. Mathematical model is based on mass conservation law and impulse law, considers axis misalignment and conicity of the gap. Numerical solution is based on finite volume approach. The results of numerical solutions was tested on asymptotic solutions.

Keywords: *viscosity fluid, eccentricity channel, enforced and shear flow, Navier-Stokes equations, continuity equation, finite volume approach.*

BIBLIOGRAPHY

1. Savin, L.A. Modelirovanie rotornykh sistem s oporami zhidkostnogo trenija / L.A. Savin, O.V. Solomin. – M.: Mashinostroenie-1, 2006. – 444 с.
2. Kornaeva, E.P. Modelirovanie techenija zhidkosti v uplotnenii maloj konusnosti. Fundamental'-nye problemy tehniki i tehnologii / E.P. Kornaeva, L.A. Savin. - 2011. - №3 (287). - S.54-59.
3. Patankar, S. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980. – 148p.
4. Nikitin, G.A. Shhelevye i labirintnye uplotnenija gidroagregatov / G.A. Nikitin. - M.: Mashinostroenie, 1982, 134s.

Savin Leonid Alekseevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Doctor of science, professor, head of the Mechatronics and international engineering department

e-mail: savin@ostu.ru

Kornaeva Elena Petrovna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of science, docent of the Information systems department

e-mail: lenoks_box@mail.ru

Arkhipov Viktor Petrovich

Starooskol technological institute (branch) NITU MISiS, Stary Oskol

Candidate of science, professor, hade of the chair of Higher mathematics

e-mail: varhipov@inbox.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 371.261

И.В. СЕРГЕЕВ, Р.Н. ПОЛЯКОВ

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ БЫТОВОГО РОБОТА-УБОРЩИКА

В статье рассматривается подход к разработке алгоритмов бытового робота-уборщика заключающийся в разбиении пространства помещения на элементарные прямоугольники. Данный алгоритм обеспечивает экономию времени при достаточном качестве уборки. Также в статье описывается использование алгоритмов для систем технического зрения аналогичных устройств.

Ключевые слова: робот-уборщик, техническое зрение, алгоритм движения, траектория движения, элементарный робот, шаговый электродвигатель, датчики.

Современные бытовые роботы-пылесосы эффективно справляются с уборкой помещения. Это стало возможно благодаря искусственному интеллекту системы технического зрения. Существует два подхода к ориентации робота в пространстве. Первый подход («слепой») использует датчики для взаимодействия с препятствиями, второй подход («зрячий») составляет в своей памяти карту помещения и выбирает наиболее эффективный способ очистки помещения. Использование 1-го подхода проще, дешевле, но требует разработки надежных алгоритмов работы.



а) iRobot Roomba 564

б) Karcher RoboCleaner RC 3000

в) DeeBot D76

Рисунок 1 – Примеры роботов-пылесосов

Необходимость в роботах уборщиках впервые появилась не в повседневной жизни человека, а при аварии на Чернобыльской АЭС. Были разработаны и задействованы множество роботов, в том числе и робот-уборщик. Если в бытовых условиях робот облегчает жизнь, то в экстремальных особо опасных для людей ситуациях он может спасти жизни сотням людей.

Роботы-пылесосы были использованы при чистке реактора изнутри от радиоактивных загрязнений при ликвидации последствий аварии на АЭС в г. Фукусима (Япония).

Главной задачей и особенностью современных роботов-пылесосов является возможность самостоятельной уборки без участия человека.

Следующим этапом развития роботов-пылесосов будет связан с возможностью уборки например двора дома, крупных площадей, дорог, уже существуют роботы газонокосильщики (робот газонокосилка L2700 рис.3а), роботы-пылесосы для бассейна (Zodiac Vortex 4 рис.3б), роботы-пылесосы для уборки в публичных местах (Dust ball – вакуумный робот пылесос в виде шара рис.3в) оснащенные техническим зрением и искусственным интеллектом.



Рисунок 2 – Робот СТР-1 выполняющий работы на кровле ЧАЭС

Если говорить про уход от оператора и оснащении крупных машин для уборки дорог и больших территорий техническим зрением с ИИ, то это вопрос времени. Роботы пылесосы можно использовать в сельском хозяйстве и в трудно доступных местах например в шахтах.

Пусть требуется убрать помещение размером $H \times B$, при этом достаточно чтобы для удовлетворительной уборки робот проехал каждый участок минимум 1 раз.

Разобьем периметр помещения на элементарные области с характеристическим размером в равном размеру рабочего органа робота-уборщика (рисунок 4).



а) L2700



б) Zodiac Vortex 4



в) Dust ball

Рисунок 3 – Роботы-уборщики

Рассмотрим идеальный случай в помещении нет препятствий и робот установлен в начале координат и ему задано направление вдоль стены.

Таким образом, можно разбивать помещение на элементарные прямоугольные участки и переходя от одного к другому, огибая препятствия, постепенно убрать помещение или можно применять пошаговый алгоритм перехода на 1 характерный размер робота-уборщика. Схема элементарного робота представлена на рисунке 5.

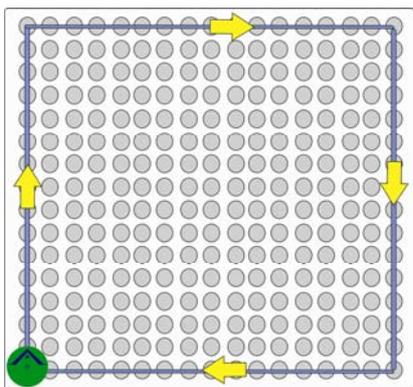


Рисунок 4 – Поле уборки робота разбитое на элементарные области равные размеру рабочего органа

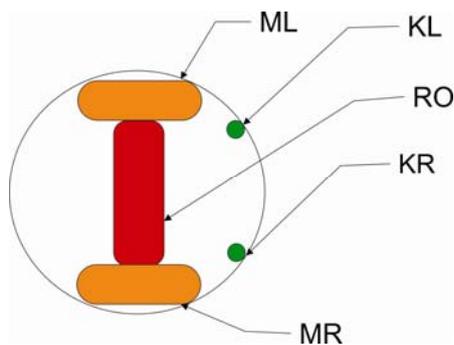


Рисунок 5 – Элементарный робот

Обозначения **MR, ML** – правый и левый шаговые электродвигатели; **RO** – рабочий орган; **KR, KL** – правый и левый датчики столкновения

Решением данной задачи является алгоритм движения (рисунок 6).

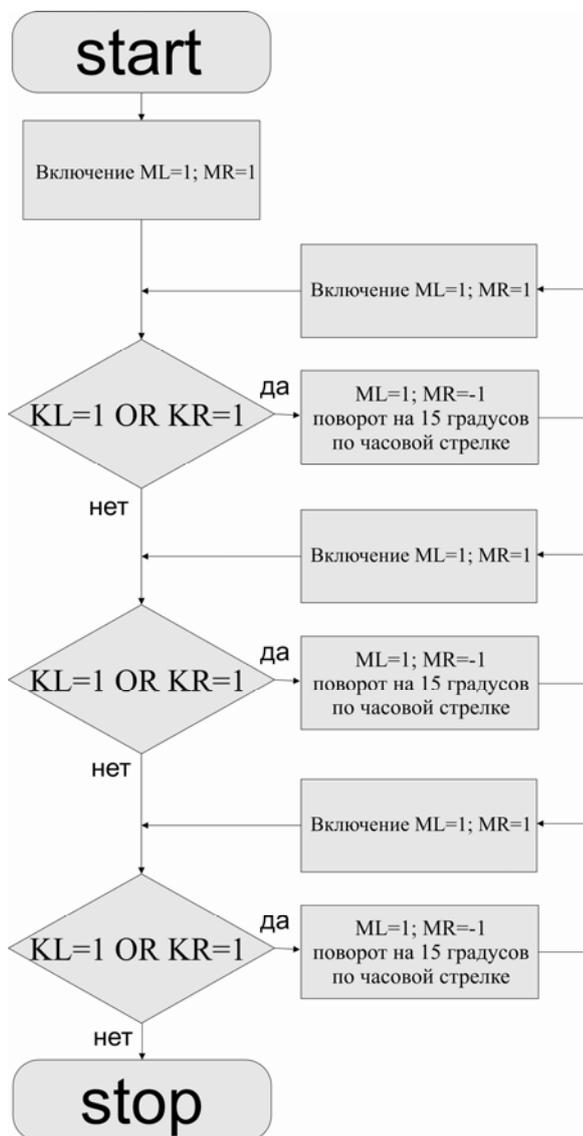


Рисунок 6 – Алгоритм движения вдоль стены

Рассмотрим алгоритм движения полного прохождения пустого помещения (рис. 7 и 8).

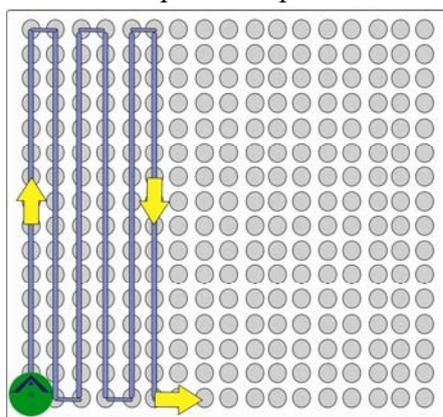


Рисунок 7 – Движение робота по траектории «змейка»

Сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов будет рассмотрен в следующих работах автора.

Разрабатываемые алгоритмы практическое применение находят в модельном роботе (рис. 9).

В жизни человека циклы играют важную роль, а точнее все наша жизнь циклична, так и алгоритмы роботов представляют собой набор команд и решений которые робот знает и выполняет. Все просто если разобраться, но проблема развития алгоритмов и робототехники заключается в отсутствии технико-экономической базы.

Искусственный интеллект всех роботов-уборщиков не может обойтись без алгоритмов движения, значит развитие этого направления актуально, а если брать во внимание, что в будущем роботы-уборщики заменят физический труд дворников и уборщиц, то появление более эффективных алгоритмов работы неизбежно и необходимо.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернобыль "[Электронный ресурс]/Электрон. Дан. Доступ <http://chornobyl.in.ua>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус.
2. Wikipedia "[Электронный ресурс]/Электрон. Дан. Доступ <http://ru.wikipedia.org>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус.
3. Amperka "[Электронный ресурс]/Электрон. Дан. Доступ <http://amperka.ru>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус.

Сергеев Илья Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-учебно-научно-производственный комплекс»

Студент

Тел: 89536128338

E-mail: ilya_sergeev_10000@mail.ru

Поляков Роман Николаевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-учебно-научно-производственный комплекс»

доцент кафедры «МиМИ», кандидат технических наук

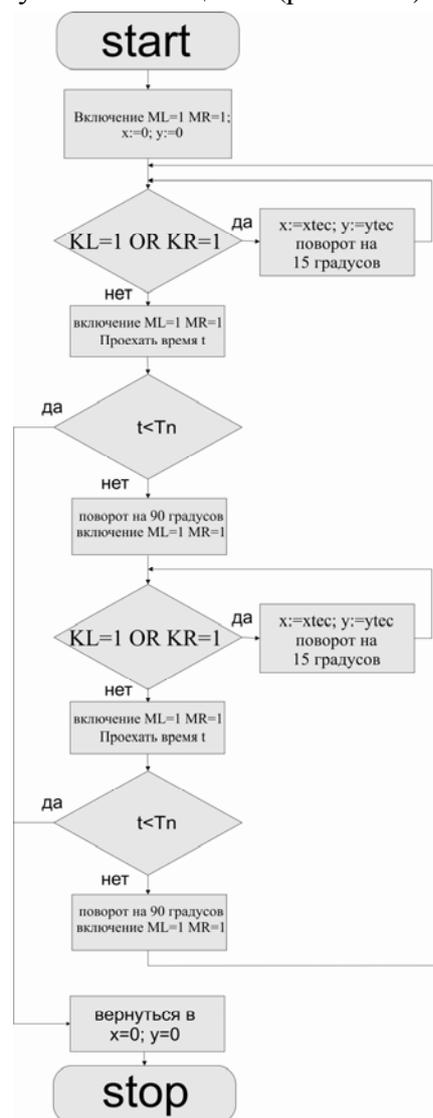


Рисунок 8 – Алгоритм движения 2



Рисунок 9 – Двухколёсная платформа Turtle

I.V. SERGEEV, R.N. POLAKOV

THE APPROACH TO DEVELOPING CONTROL ALGORITHM FOR A HOUSEHOLD CLEANER ROBOT

An approach to development of algorithms for household cleaning robot is considered in the paper. The approach is to divide room space into elementary rectangles. The algorithm provides time economy with enough cleaning quality. The usage of algorithms for machine vision in similar devices is also described in the paper.

Keywords: cleaner robot, machine vision, movement algorithm, movement trajectory, elementary robot, stepper motor, sensors.

BIBLIOGRAPHY

1. Chernobyl' "[Jelektronnyj resurs]/Jelektron. Dan. Dostup <http://chornobyl.in.ua>, svobodnyj. Zagl. s jekrana. Jaz. rus.
2. Wikipedia "[Jelektronnyj resurs]/Jelektron. Dan. Dostup <http://ru.wikipedia.org>, svobodnyj. Zagl. s jekrana. Jaz. rus.
3. Amperka "[Jelektronnyj resurs]/Jelektron. Dan. Dostup <http://amperka.ru>, svobodnyj. Zagl. s jekrana. Jaz. rus.

Sergeev Ilya Valerievich

FSBEE HPE "State University-educational scientific-productional complex "
Student
Tel: 89536128338
E-mail: ilya_sergeev_10000@mail.ru

Polakov Roman Nikolaevich

FSBEE HPE "State University-educational scientific-productional complex "
Associate Professor of the department "MiMI", Ph.D.

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.715.2

А.И. БАРБОТЬКО, М.С. РАЗУМОВ, П.А. ПОНКРАТОВ, А.И. ПЫХТИН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБКАТОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА ТИПА ДОЛБЯК

В статье рассматриваются различные способы определения длины режущей кромки, основанных на аппроксимации образующей кривыми различных функций при проектировании обкаточного инструмента типа долбяк. Проводится анализ предложенных методов и определяется наиболее рациональный с точки зрения обеспечения точности. Высказывается мнение о возможности автоматизации процесса назначения исходных параметров проектирования долбежного инструмента.

Ключевые слова: оптимальный; инструмент; долбяк; обкаточный; длина режущей кромки.

Конструкции нового и модернизация имеющегося инструментального обеспечения, является неотъемлемой частью жизненного цикла производства.

Применение новых типов соединений дает возможность снизить затраты на изготовление и в конечном счете, себестоимость выпускаемой промышленностью продукции [1, с.56-67].

Различные способы обработки таких соединений [2-8] являются трудоемкими в плане поддержания работоспособности режущего инструмента, узкоспециализированными, либо возможно с применением специальных приспособлений и станков, а также является высокозатратным.

В отличие от приведенных выше способов обработки, формообразование профильных поверхностей деталей машин, за счет обработки специальным обкаточным инструментом на основе долбежного, является более приемлемым ввиду рационального распределения частей формообразующих движений на инструмент и кинематику станка [9].

Математическое моделирование процесса обработки долбяком профильных соединений требует предварительного определения начальных параметров проектирования. При этом различного рода рекомендации по схемам обработки [10, 11, 12] лишь предопределяют вектор направления движения модернизации производства, и инструментального обеспечения. Таким образом, определение параметров, таких как, длина режущей кромки, степень ее кривизны, влияют не только на качество обрабатываемой поверхности, но и на временные аспекты обработки, показатели коэффициента использования материала, которые влияют на стоимость инструмента.

Вопросы обеспечения качества поверхности деталей машин на стадии проектирования и изготовления закладываются в разработке теории научно обоснованного определения формы поверхностей [13]. Так степень «волнистости» и направление остаточных гребешков на обработанной поверхности напрямую влияют на время приработки механизма, его долговечность, и в конечном счете, общее качество обработки [14, с. 164-168].

Например, для случая графического проектирования долбяков [15], заключающегося в том, что для известного типоразмера профильного вала назначается начальное межосевое расстояние, применяемое при проектировании. При этом, величина вписанной в долбяк окружности становится зависимой величиной. Однако, в процессе проектирования и обработки, величина вписанной окружности, в совокупности с характеристикой отношения угло-

вых скоростей вращения долбяка и детали, напрямую влияет на типоразмер и длину режущей кромки долбяка, тем самым определяет качество обработки. Таким образом, для начала расчета, необходимо определить первоначальную окружность обката, которая будет являться вписанной в исходное сечение проектируемого долбяка. Данный параметр следует выразить из характеристики величины режущей кромки, с учетом обеспечения необходимого качества обработки и возможности долбежного станка.

Ввиду сложности определения и задания модели линии, образующей режущую кромку, выделим способы аппроксимации сложнопрофильных кривых отрезками прямой, параболой и сектором окружности определенного радиуса.

Для определения начальных параметров воспользуемся следующими формулами. Из известного условия соотношения длин сторон равностороннего треугольника к радиусу описанной около него окружности запишем (рис. 1):

$$R_{np} = R_{on} \cdot \sqrt{3},$$

где R_{np} – радиус образующий стороны сечения профильного вала (втулки);
 R_{on} – радиус, описанный около профильного вала (втулки).

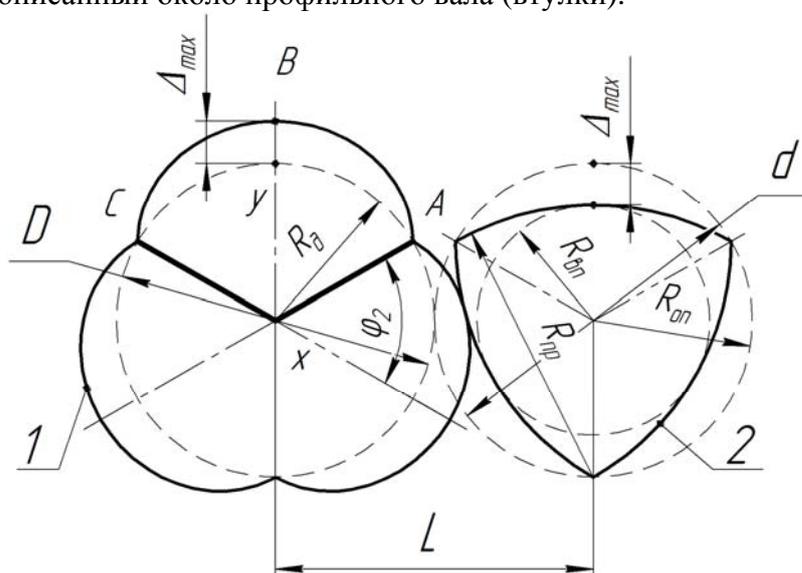


Рисунок 1 - Схема определения параметров долбяка
 1 – профильный долбяк; 2 – профильная фигура

Радиус вписанной в профильный вал (втулку) окружности определим из формулы:

$$R_{en} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \cdot R_{on} \cdot \sqrt{3} = R_{on} \cdot (\sqrt{3} - 1)$$

где R_{en} – радиус вписанной окружности в сечении профильного вала (втулки).
 Межосевое расстояние L :

$$L = R_{on} + R_{\delta}$$

где R_{δ} – радиус вписанной окружности в начальном сечении долбяка.

Разница, Δ , между вписанной и описанной окружностями в профильный вал (втулку) определяется по формуле:

$$\Delta = R_{on} - R_{en} = R_{on} \cdot (2 - \sqrt{3})$$

Определим координаты точек А, В, С в полярной системе координат:

$$A \left((R_{\delta} + \Delta_{\max}) \cos \left(\frac{\pi}{2N} \right); (R_{\delta} + \Delta_{\max}) \sin \left(\frac{\pi}{2N} \right) \right);$$

$$B(R_{\delta}; 0);$$

$$C \left(-R_{\delta} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2N} \right); R_{\delta} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2N} \right) \right);$$

где Δ_{\max} – максимальное значение разницы между вписанной и описанной окружностями в профильный вал (втулку);

N – количество граней профильного вала (втулки).

Тогда, определим координаты для точки А:

$$x_1 = R_{\partial} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot N}\right); \quad y_1 = R_{\partial} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot N}\right)$$

Для точки В:

$$x_2 = 0; \quad y_2 = (R_{\partial} + \Delta)$$

Для точки С:

$$x_3 = -R_{\partial} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot N}\right); \quad y_3 = R_{\partial} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot N}\right)$$

Запишем уравнение параболы:

$$p(x) = ax^2 + bx + c \tag{1}$$

Продифференцировав уравнение (1) получим:

$$p'(x) = 2ax + b \tag{2}$$

Определим коэффициенты уравнения (2).

$$a = \frac{y_3 - \frac{x_3(y_2 - y_1) + x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1}}{x_3(x_3 - x_1 - x_2) + x_1 x_2}, \quad b = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - a(x_1 + x_2), \quad c = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} + a x_1 x_2$$

Для случая аппроксимации параболой имеем следующее уравнение аппроксимации режущей кромки по трем ее точкам:

$$L_{нар} = \int_{x_1}^{x_3} \sqrt{1 + (p'(x))^2} dx,$$

где $L_{нар}$ – длина параболы-аппроксимации режущей кромки.

Запишем уравнение окружности в классическом виде оно имеет следующую форму:

$$(x_{окр} - x_c)^2 + (y_{окр} - y_c)^2 = R_{окр}^2,$$

где $x_{окр}, y_{окр}$ – координаты точек окружности, записанные в декартовой системе координат;

x_c, y_c – координаты центра окружности;

$R_{окр}$ – радиус окружности.

Таким образом, для нахождения уравнения окружности, проходящей через три точки А, В, С, аппроксимирующей режущую кромку долбяка, необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} (x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2 = R_{окр}^2 \\ (x_2 - x_c)^2 + (y_2 - y_c)^2 = R_{окр}^2 \\ (x_3 - x_c)^2 + (y_3 - y_c)^2 = R_{окр}^2 \end{cases}$$

Воспользовавшись функцией для решения системы уравнений численным методом **Find** программного продукта Mathcad находим значения переменных $x_c, y_c, R_{окр}$, соответствующие конкретным значениям входных данных.

Выразим через переменную x уравнение искомой окружности:

$$c(x) = \pm \sqrt{R_{окр}^2 - (x - x_c)^2} - y_c$$

Для случая аппроксимации линии режущей кромки долбяка окружностью, определяемой по трем точкам, получим следующее уравнение для дуги окружности:

$$L_{окр} = \int_{x_1}^{x_3} \sqrt{1 + (c'(x))^2} dx,$$

где $L_{окр}$ – длина дуги окружности, аппроксимирующей линию режущей кромки долбяка, $c'(x)$ – производная функции $c(x)$.

Для случая аппроксимации прямыми, зададимся уравнением двух прямых, сходящихся в точке наименьшей погрешности режущей кромки – ее вершине, определяемых через коэффициенты значений координат в полярной системе.

$$L_{пр} = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2},$$

где $L_{пр}$ – суммарная длина прямых, аппроксимирующих режущую кромку долбяка. Приведем пример построения зависимостей в виде графика (рис. 2)

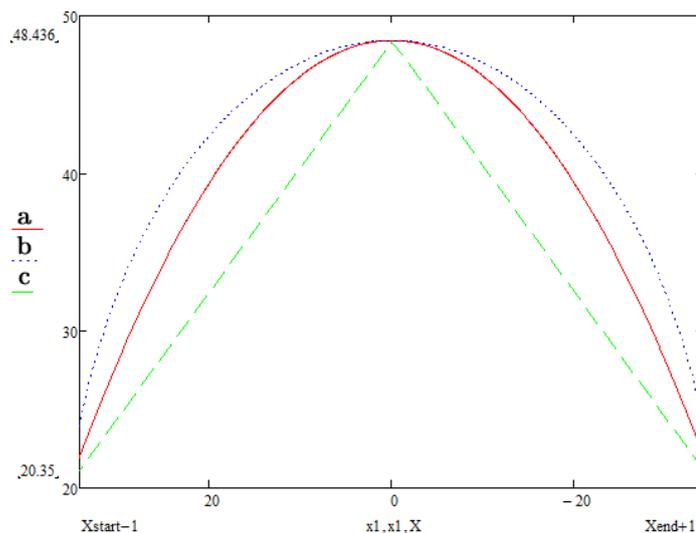


Рисунок 2 - Пример графического отображения аппроксимации режущей кромки долбяка по трем точкам, при ее задании различными функциями уравнений
 а – график функции параболы; b – график функции дуги окружности; c – график прямых

Таблица – Значения фактической и рассчитанных по формулам аппроксимации длины режущей кромки

Длина режущей кромки L, мм	Типоразмер долбяка				
	№1 $R_0=28,87,$ $L=57,74$	№2 $R_0=40,7,$ $L=69,57$	№3 $R_0=43,3,$ $L=72,17$	№4 $R_0=57,73,$ $L=86,6$	№5 $R_0=86,6,$ $L=115,47$
$L_{пар}$	69,76	93,864	99,181	128,758	188,11
$L_{окр}$	73,076	97,314	102,678	132,571	192,694
$L_{пр}$	66,833	90,137	95,282	123,922	181,431
$L_{факт}$	73,98	97,77	102,93	132,54	192,14
$\epsilon_{пар}$	5,7%	4%	3,6%	2,8%	2,1%
$\epsilon_{окр}$	1,2%	0,5%	0,3%	0,02%	0,3%
$\epsilon_{пр}$	9,7%	7,8%	7,4%	6,5%	5,7%

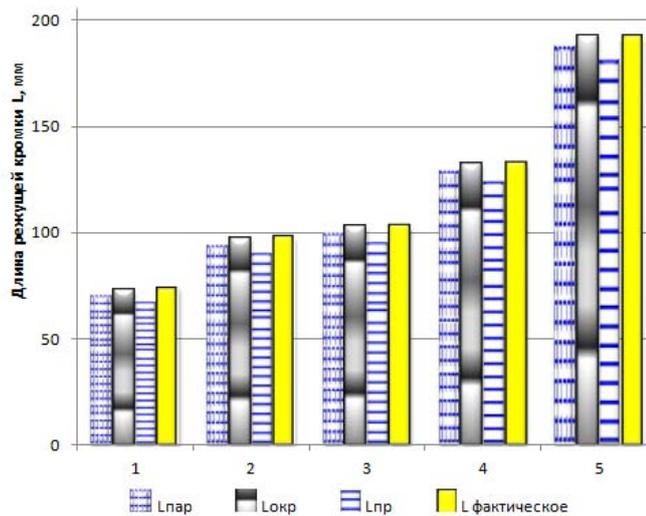


Рисунок 3 - Сравнение различных значений расчетной и фактической длин режущей кромки профильного долбяка

На основе сравнительного анализа результирующих значений в сравнении с истинным для пяти различных типоразмеров долбяка, приведенных в таблице, отобразим зависимости в виде графика функций рисунок 3.

Из таблицы 1 и графика на рисунке 3 видно, что значения длины режущей кромки, следует рассчитывать по формуле аппроксимации режущей кромки окружностью

Следовательно, при расчете начальных параметров проектирования профильных долбяков следует применять формулу $L_{окр}$ для определения длины режущей кромки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борович, Л.С. Бесшпоночное соединение деталей машин / Л.С. Борович. – М.: Машгиз, 1951, 132 с.
2. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Способ обработки профильного вала со сторонами равной ширины. Патент Российской Федерации №2463129. Бюл. №28.
3. Данилов, В.А. Анализ и пути интенсификации способов обработки некруглых поверхностей профильных соединений / В.А. Данилов // Вестник машиностроения. 1991 г., №1. С. 50-54.
4. Тимченко, А.И. Станочный агрегат для фрезерования РК-профильных валов при их поступательном прямолинейном гармоническом движении / А.И. Тимченко, А.Г. Схиртладзе // Вестник машиностроения. 1991 г., №1. С. 54-56.
5. Шитиков, А.Н. Проектирование сборных фасонных фрез для обработки наружного РК-профиля. Диссертация кандидата технических наук. Тула, 2005 г.
6. Емельянов, С.Г. Автоматизация технологической подготовки производства профильных валов / С.Г. Емельянов, А.О. Гладышкин, М.С. Разумов, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012 г., №1, Ч. 1. С. 164-167.
7. Разумов М.С., Понкратов П.А. Устройство для токарной обработки профильных валов. Патент Российской Федерации №110316, заяв. 04.05.2011 опубл. 20.11.2011. Бюл. №32.
8. Разумов М.С., Пыхтин А.И., Барботько А.И., Понкратов П.А. Способ обработки профильных валов с выпуклым профилем по заданному размеру. Патент Российской Федерации №2469818, заяв. 30.09.2011 опубл. 20.12.2012. Бюл. №35.
9. Барботько, А.И. Анализ методов формообразования элементов профильных соединений / А.И. Барботько, П.А. Понкратов // Материалы научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технологии». Курск, 2011. С. 271-274.
10. Барботько, А.И. Особенности изготовления долбежного инструмента для обработки профильных соединений / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов // Техника и технологии: Пути инновационного развития: Материалы 2-й международной научно-практической конференции. Курск 2012 С. 36-39.
11. Барботько, А.И. Технология обработки профильных валов чашечными долбяками / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов // XVII Международная заочная научно-практическая конференция «Технические науки – от теории к практике». Новосибирск, изд. «СибАК», 2013, ч.1, С. 75-79.
12. Барботько, А.И. Метод генераторной обработки профильных валов долбяками / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов // V Международная научно-техническая конференция «Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013)», Курск, 2013. С. 440-442.

13. Алиев, А.А. Качество поверхности и свойства деталей машин / А.А. Алиев, В.П. Булгаков, Б.С. Приходько // Вестник Астраханского государственного технического университета, 2004 г, №. 1, С. 8-12.

14. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

15. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Способ графического проектирования долбяков при обработке профильных валов. Заявка на патент Российской Федерации №2011142677, заяв. 21.10.2011 опубл. 27.04.2013. Бюл. №12.

Барботько Анатолий Иванович

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Кандидат технических наук, профессор кафедры машиностроительные технологии и оборудование

E-mail: anivanbar@yandex.ru

Разумов Михаил Сергеевич

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры городского, дорожного строительства и строительной механики

E-mail: mika_1984_@mail.ru

Понкратов Павел Александрович

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования

E-mail: kuper31@rambler.ru

Пыхтин Алексей Иванович

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической механики и мехатроники

E-mail: swsu.ee@gmail.com

A.I. BARBOTKO, M.S. RAZUMOV, P.A. PONKRATOV, A.I. PYKHTIN

**DETERMINATION OF LONG CUTTING EDGE IN DESIGNING
TOOL TYPE PINION CUTTER**

The article discusses the various methods of determining the length of the cutting edge, based on an approximation of the image of the various functions in the design of break-in tools such as gear cutter. The analysis of the proposed methods and determined the most rational in terms of ensuring accuracy. Expressed the view on the possibility of automating the process of appointing the initial parameters of designing slotting tool.

Keywords: optimum; tool; gear cutter; ledging; the length of the cutting edge.

BIBLIOGRAPHY

1. Borovich, L.S. Besshponochnoe soedinenie detalej mashin / L.S. Borovich. – М.: Mashgiz, 1951, 132 s.
2. Barbot'ko A.I., Ponkratov P.A., Razumov M.S. Spособ obrabotki profil'nogo vala so storonami ravnoj shiriny. Patent Rossijskoj Federacii №2463129. Bjul. №28.
3. Danilov, V.A. Analiz i puti intensivizacii sposobov obrabotki nekruglyh poverhnostej pro-fil'nyh soedinenij / V.A. Danilov // Vestnik mashinostroenija. 1991 g., №1. S. 50-54.
4. Timchenko, A.I. Stanochnyj agregat dlja frezerovaniya RK-profil'nyh valov pri ih postupatel'nom prjamolijnom garmonicheskom dvizhenii / A.I. Timchenko, A.G. Shirladze // Vestnik mashinostroenija. 1991 g., №1. S. 54-56.
5. Shitikov, A.N. Proektirovanie sbornyh fasonnyh frez dlja obrabotki naruzhnogo RK-profilja. Dissertacija kandidata tehniceskikh nauk. Tula, 2005 g.
6. Emel'janov, S.G. Avtomatizacija tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva profil'nyh valov / S.G. Emel'janov, A.O. Gladyshekin, M.S. Razumov, S.F. Jacun // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universi-teta. 2012 g., №1, Ch. 1. S. 164-167.
7. Razumov M.S., Ponkratov P.A. Ustrojstvo dlja tokarnoj obrabotki profil'nyh valov. Patent Ros-sijskoj Federacii №110316, zjav. 04.05.2011 opubl. 20.11.2011. Bjul. №32.

8. Razumov M.S., Pyhtin A.I., Barbot'ko A.I., Ponkratov P.A. Sposob obrabotki profil'nyh valov s vypuklym profilem po zadannomu razmeru. Patent Rossijskoj Federacii №2469818, zajav. 30.09.2011 opubl. 20.12.2012. Bjul. №35.

9. Barbot'ko, A.I. Analiz metodov formoobrazovanija jelementov profil'nyh soedinenij / A.I. Barbot'ko, P.A. Ponkratov // Materialy nauchno-praktičeskoj konferencii «Sovremennye materialy, tehnika i tehnologii». Kursk, 2011. S. 271-274.

10. Barbot'ko, A.I. Osobennosti izgotovlenija dolbezhnogo instrumenta dlja obrabotki profil'nyh soedinenij / A.I. Barbot'ko, P.A. Ponkratov, M.S. Razumov // Tehnika i tehnologii: Puti innovacionnogo razvitija: Materialy 2-j mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. Kursk 2012 S. 36-39.

11. Barbot'ko, A.I. Tehnologija obrabotki profil'nyh valov chashechnymi dolbjakami / A.I. Barbot'ko, P.A. Ponkratov, M.S. Razumov // XVII Mezhdunarodnaja zaochnaja nauchno-praktičeskaja konferencija «Tehniche-skie nauki – ot teorii k praktike». Novosibirsk, izd. «SibAK», 2013, ch.1, S. 75-79.

12. Barbot'ko, A.I. Metod generatornoj obrabotki profil'nyh valov dolbjakami / A.I. Barbot'ko, P.A. Ponkratov, M.S. Razumov // V Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Mashinostroenie – os-nova tehnologičeskogo razvitija Rossii (TM-2013)», Kursk, 2013. S. 440-442.

13. Aliev, A.A. Kachestvo poverhnosti i svojstva detalej mashin / A.A. Aliev, V.P. Bulgakov, B.S. Prihod'ko // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, 2004 g. №. 1, S. 8-12.

14. Suslov, A.G. Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej mashin / A.G. Suslov. – M.: Mashinostroenie, 2000. – 320 s.

15. Barbot'ko A.I., Ponkratov P.A., Razumov M.S. Sposob graficheskogo proektirovanija dolbjakov pri obrabotke profil'nyh valov. Zajavka na patent Rossijskoj Federacii №2011142677, zajav. 21.10.2011 opubl. 27.04.2013. Bjul. №12.

Barbotko Anatoly Ivanovich

Southwest State University, Kursk

Cand.Tech.Sci., professor of chair machine-building technologies and equipment

E-mail: anivanbar@yandex.ru

Razumov Mikhail Sergejevich

Southwest State University, Kursk

Cand.Tech.Sci., senior teacher of chair of municipal, road construction and structural mechanics

E-mail: mika_1984_@mail.ru

Ponkratov Pavel Aleksandrovich

Southwest State University, Kursk

Graduate student of chair of machine-building technologies and equipment

E-mail: kuper31@rambler.ru

Pyhtin Aleksey Ivanovich

Southwest State University, Kursk

Cand.Tech.Sci., senior teacher of chair of theoretical mechanics and mechatronics

E-mail: swsu.ee@gmail.com

К ВОПРОСУ О ГЛУБИНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Рассмотрены существующие определения понятия «глубина резания» для операции шлифования, выявлены моменты, не отражающие реальной картины процесса. Сформулировано новое определение понятия «глубина резания при шлифовании». Предложены формулы для определения данной величины для черновой, чистовой стадии шлифования и выхаживания.

Ключевые слова: – глубина резания; шероховатость; абразивный инструмент; обрабатываемая поверхность; заготовка; чистовая, черновая стадии обработки; выхаживание.

Одним из основных параметров математической модели процесса шлифования является глубина резания t при шлифовании, которая определяет столь значимые величины как фактический минутный съём при шлифовании Q_{ϕ} , составляющие силы резания P_Z , P_Y , эффективная мощность N , стойкость инструмента T и, косвенно, через глубину внедрения одного зерна a_z , шероховатость обработанной поверхности R_a [1]. Однако, в работах по теории и практике шлифования [2-8] однозначного определения термина «глубина резания при шлифовании», как и ее численного значения не дано. Среди ученых, занимающихся теорией шлифования, нет единого мнения по поводу того, как представлять режущие элементы абразивного инструмента, профиль обрабатываемой поверхности и, следовательно, толщину слоя материала, снимаемого с заготовки за один рабочий ход. Отсутствуют так же словесные определения данного термина, что, на наш взгляд, вносит несогласованность в математические модели процесса шлифования разных авторов.

Некоторые исследователи пытались сформулировать определение данного понятия. Например, Рождественский Л.А. [1] определяет, что «глубина резания, t , мм – слой металла, снимаемый периферией или торцом круга в результате поперечной подачи на каждый ход или двойной ход при круглом или плоском шлифовании и в результате радиальной подачи s_p при врезном шлифовании». Вместе с тем, единственное определение данного термина не может считаться общепринятым.

В связи с вышесказанным целью исследования является попытка сформулировать определение термина «глубина резания при шлифовании» через обобщение уже имеющихся представлений о данном понятии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- 1) провести систематизацию знаний по определениям понятия «глубина резания», в особенности применительно к шлифованию;
- 2) сформулировать феноменологическое определение термина «глубина резания при шлифовании»;
- 3) определить численные значения данного параметра;
- 4) сделать выводы по проделанной работе.

Математические модели, в которых важную роль играет параметр t , присутствуют в работах многих известных ученых-шлифовщиков. Например, при определении толщины среза a_z , снимаемого одним шлифующим зерном, Маслов Е.Н. [3] использует параметр t_{ϕ} , для которого автор приводит только графическое определение (рис. 1)

$$a_{zcp}^{nl} = \frac{v_D}{60v_{kp} \pm 2v_D} \sqrt{t_{\phi} l_{\phi}} \sqrt{\frac{1}{D} \frac{s}{B}} \quad [2] \quad (1)$$

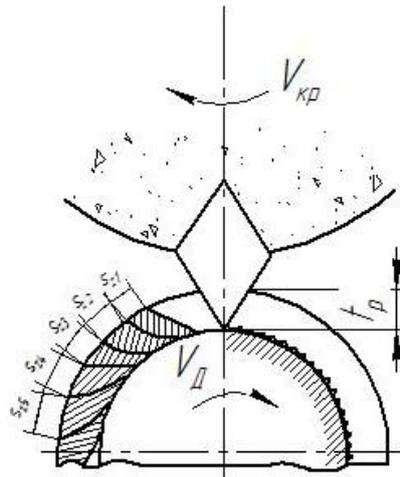


Рисунок 1 – Схема снятия зернами шлифовального круга слоев материала (По Маслову Е.Н. [3])

Из рисунка следует: если за глубину резания, согласно определению Л.А. Рождественского, принять слой металла, удаляемый абразивным зерном, находящимся на строго определенной высоте, то вершины абразивных зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента должны быть расположены на одном уровне (поскольку t_{ϕ} постоянна), что не соответствует их истинному расположению.

В работах Л.Н. Филимонова [6], А.Н. Резникова [8] шлифовальный круг и обрабатываемая деталь представляют собой идеальные тела, а припуск определяется фактически как разность положения абразивного инструмента до врезания и в момент резания (рис. 2, а, б).

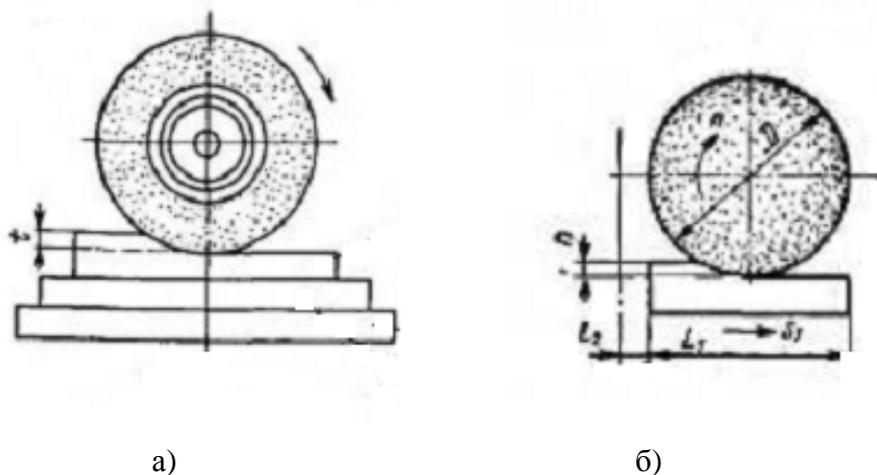


Рисунок 2 – Схема плоского шлифования периферией круга
а) по Л.Н. Филимонову [6]; б) по А.Н. Резникову [4]

Данная схема, кроме того, не отображает положения режущих элементов на рабочей поверхности абразивного инструмента.

В работах известных ученых, которые определяли направление развития теории шлифования [2-8], словесного определения для данного термина найдено не было. Глубине резания при шлифовании давалось графическое определение. Видимо по этой причине указанные подходы к определению «глубина резания при шлифовании» присутствуют и в большинстве работ современных исследователей.

Определение Л.А. Рождественского наводит на мысль, что понятие «глубина резания» перенесено в теорию шлифования из теории обработки лезвийным инструментом.

Действительно, в проанализированных источниках по теории резания [9-12] и др. присутствует множество определений для строгания, фрезерования, точения, сверления, зенкерования.

Так, Г.И. и В.Г. Грановские определяют глубину резания как «величину проникновения лезвий инструмента в металл заготовки во время каждого прохода» [9]. И.Е. Парфеньева считает глубиной резания «...расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно последней. Глубину резания относят к одному рабочему ходу инструмента относительно обрабатываемой поверхности» [10]. Согласно Е.М. Муравьеву [11] «глубина резания – это толщина слоя снимаемого металла за один проход». В.А. Митюшов в своем словаре дает следующее определение глубины резания – «...это толщина слоя материала заготовки, между обработанной и еще необработанной поверхностями, вдоль оси фрезы. Глубина резания определяется толщиной слоя, срезаемого за один рабочий ход» [12].

Основываясь на данных представлениях авторов, под глубиной резания можно понимать «высоту слоя металла, снимаемого с обрабатываемой поверхности за один рабочий ход, измеряемую нормально к обрабатываемой поверхности».

Необходимо отметить, что при лезвийной обработке шероховатостью обрабатываемой и обработанной поверхностей можно пренебречь, считать их абсолютно гладкими, поскольку глубина резания многократно превышает величину шероховатости от предыдущего прохода инструмента и допуск на соответствующий размер. Анализ нормативных значений [1] показал, что глубина шлифования соизмерима с шероховатостью от предыдущего прохода инструмента, и обработка ведется в её пределах. Кроме того, положение вершины лезвийного режущего инструмента относительно номинальной поверхности четко определено. Следовательно, высоту снимаемого слоя металла можно измерять относительно номинального размера детали и положения вершины режущего клина. При шлифовании поверхностный слой заготовки шероховат и имеет поры, рабочая поверхность абразивного инструмента также является шероховатой, она состоит из множества распределенных случайным образом по высоте абразивных зерен. Следовательно, положение единственного режущего клина, в противовес лезвийному режущему инструменту, не может быть определено однозначно, и можно говорить только о некоторой высоте поверхностного слоя заготовки, до которого внедряются наиболее выступающие абразивные зерна.

Для разрешения возникших разногласий по толкованию термина «глубина резания при шлифовании» были изучены ГОСТ 25762-83 «Обработка резанием Термины определения и обозначения общих понятий» [13] и ГОСТ 21445-84 «Материалы и инструменты абразивные. Термины и определения» [14]. Согласно ГОСТ 25762-83 режим резания – это «совокупность значений скорости резания, подачи или скорости движения подачи и глубины резания». Вместе с тем, если для различных скоростей резания и подач определения даны, то для глубины резания определение отсутствует. В [14] определения так же не обнаружено.

Попытаемся дать новое определение понятию «глубина резания при шлифовании».

Для этого зададим положение поверхностей на абразивном инструменте и заготовке, между которыми будет располагаться данная величина (рис. 3). Проведем поверхности, проходящие через наиболее выступающие вершины рабочей поверхности абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности заготовки эквидистантно к номинальным поверхностям инструмента и заготовки. Максимальное расстояние между этими поверхностями, измеренное перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, будет определять величину глубины резания, а соответственно глубину поверхностного слоя, из которого будет удаляться материал и в котором будет формироваться шероховатость.

Таким образом, предлагается считать глубиной резания при шлифовании максимальное расстояние между поверхностями выступов шлифовального круга и заготовки, измеряемое перпендикулярно к номинальной поверхности последней (см. рис. 3).

Пользуясь разработанным определением «глубина резания при шлифовании», определим ее численное значение для разных стадий финишной обработки: черновой, чистовой и выхаживания.

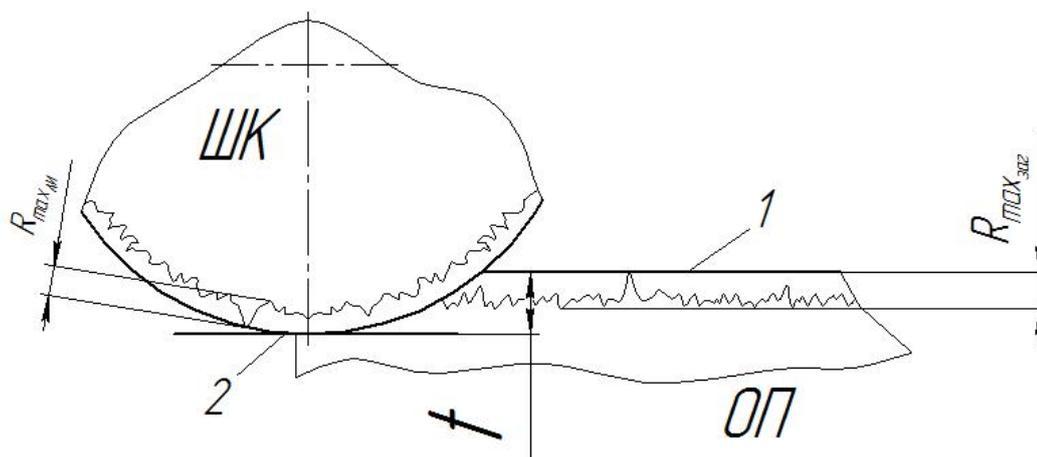


Рисунок 3 – Глубина резания при шлифовании

1 – номинальная поверхность заготовки; 2 – поверхность выступов шлифовального круга; ШК – шлифовальный круг; ОП – обрабатываемая поверхность; $R_{max.заг}$ – максимальная шероховатость заготовки; $R_{max.ин}$ – максимальная шероховатость абразивного инструмента; t – глубина резания при шлифовании

При черновом шлифовании наладка станка осуществляется методом «на искру». Это означает, что абразивные зерна заглубляются достаточно, чтобы резать материал с появлением стружки. Относительно этого уровня выставляют рекомендуемую глубину шлифования. Согласно современным представлениям абразивные зерна после правки могут резать при внедрении на глубину t_0 близкую к нулю. Можно считать, что данный метод является допустимым для определения положения поверхности вершин наиболее выступающих абразивных зерен.

Реальная глубина резания при шлифовании $t_{черн}$ на стадии черновой обработки равна (рис. 4, а):

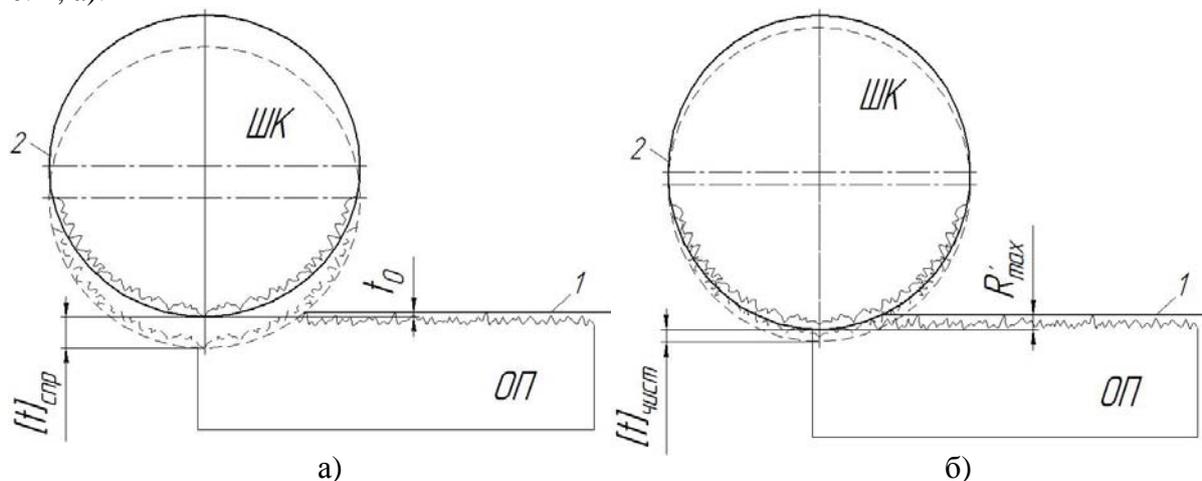


Рисунок 4 – Схема снятия припуска при черновой и чистовой стадиях обработке
а) черновое шлифование; б) чистовое шлифование

$$t_{черн} = t_0 + [t]_{черн},$$

где t_0 – величина внедрения абразивных зерен при появлении искры, $t_0 \rightarrow 0$, $[t]_{черн}$ – нормативная глубина резания при черновом шлифовании.

Перед чистовым шлифованием всегда остается некоторая шероховатость от предыдущего прохода. Следовательно, глубина резания при шлифовании на стадии чистовой обработки $t_{чист}$ равна (рисунок 4, б):

$$t_{чист} = R'_{max} + [t]_{чист}$$

где R'_{max} – шероховатость от предыдущего прохода; $[t]_{чист}$ – нормативная глубина резания при чистовом шлифовании.

При выхаживании глубина резания $t_{\text{вых}}$ равна шероховатости от предыдущего прохода R'_{max} (рис. 5):

$$t_{\text{вых}} = R'_{\text{max}}$$

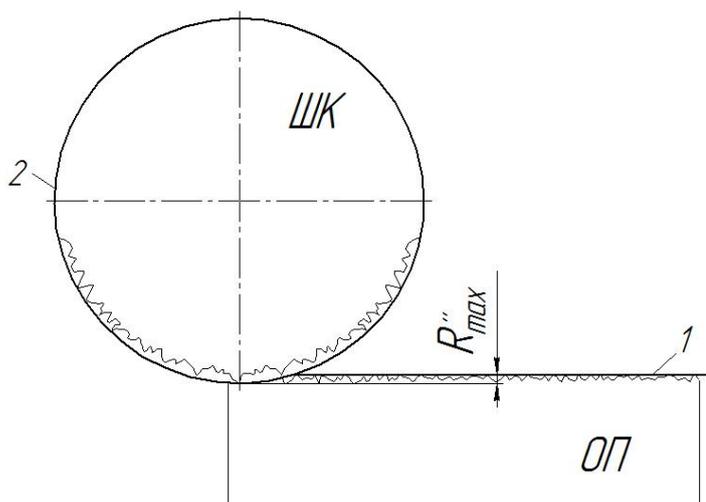


Рисунок 5 – Схема снятия припуска при выхаживании

При этом следует полагать, что $R'''_{\text{max}} < R''_{\text{max}} < R'_{\text{max}}$, так как на каждом проходе выхаживания абразивные зерна удаляют некоторую часть материала заготовки.

Основываясь на проделанной работе, можно сделать следующие выводы:

1. В проанализированных источниках в области теории шлифования определение «глубина резания при шлифовании» в достаточной степени не раскрыто.
2. Сформулировано определение «глубины резания при шлифовании, как максимального расстояния между поверхностью выступов шлифовального круга и заготовки, измеряемая перпендикулярно к номинальной поверхности последней».
3. Новое понимание данного термина позволяет определять толщину слоя металла, в котором происходит процесс резания при шлифовании, и помогает более правильно представлять математические модели процесса шлифования.
4. Предложены формулы для определения величины «глубина резания при шлифовании» для черновой, чистовой стадии шлифования и выхаживания.
5. Анализ формул показывает, что реальная глубина резания всегда больше справочного значения, а для выхаживания она равна шероховатости предварительной операции, уменьшаясь с каждым последующим ходом выхаживания.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 /Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова.- 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
2. Ермаков, Ю.М. Перспективы развития абразивно-алмазной обработки /Ю.М. Ермаков, Ю.С. Степанов //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 3 (287). – С. 85 – 90.
3. Маслов, Е.Н. Основы теории шлифования металлов. – М.: Машгиз, 1951. - 177с.
4. Степанов, Ю.С. Абразивная обработка отверстий /Ю.С. Степанов, Б.И. Афанасьев. - М.: Машиностроение-1, 2003. – 120 с.
5. Степанов, Ю.С. Дискретное внутреннее шлифование /Ю.С. Степанов, В.Г. Гусев, Б.И. Афанасьев. Под общей ред. Ю.С. Степанова.- М.: Машиностроение-1, 2004. – 190 с.
6. Филимонов, Л.Н. Плоское шлифование/ Под. ред. В.И. Муцянка. – 3 изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985, - 109 с.
7. Шлифование внутренних фасонных поверхностей / Ю.С. Степанов, Б.И. Афанасьев, Блурцян Д.Р., И.И. Колтунов, Д.С. Фомин. Под ред. Ю.С. Степанова. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 262 с.
8. Резников, А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. - 288 с.
9. Грановский, Г.И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. - М.: Высшая школа, 1985. - 304 с.

10. Парфеньева, И.Е. Технология конструкционных материалов. - М.: учебное пособие, 2009. – Режим доступа: <http://www.micromake.ru/old/tkmbook/tkm3.htm> (дата обращения: 30.03.2013).
11. Муравьев, Е.М. Слесарное дело. Учебное пособие, Просвещение, 1990.
12. Митюшов, В.А. Технический словарь Термины и определения, 2012.
13. ГОСТ 25762-83 Обработка резанием Термины определения и обозначения общих понятий.
14. ГОСТ 21445-84 Материалы и инструменты абразивные. Термины и определения.

Волчкова Екатерина Александровна

Филиал ФГБОУ ВПО «Самарский ГТУ» в г. Сызрани
студентка
E-mail: kashatova@yandex.ru

Осипов Александр Петрович

Филиал ФГБОУ ВПО «Самарский ГТУ» в г. Сызрани
Кандидат технических наук, декан механического ф-та, зав. каф. «Технология машиностроения»
E-mail: mf@mfsyzran.ru

E.A. VOLCHKOVA, A.P. OSIPOV

**TO THE QUESTION ABOUT THE DEPTH OF THE CUT
IN THE GRINDING**

The current definition of «cutting depth» for the operation of the grinding do not reflect real process. The new definition of «cutting depth in grinding» was formulated. Formula to determine this value for roughing, finishing and burnishing was proposed.

Keywords: cutting depth; roughness; abrasive tool; processed surfaces; harvesting; roughing; finishing; burnishing.

BIBLIOGRAPHY

1. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja. V 2-h t. T. 2 /Pod red. A. G. Kosilovoj i R. K. Meshherjako-va.- 4-e izd., pererab. i dop.— М.: Mashinostroenie, 1985. 496 s.
2. Ermakov, Ju.M. Perspektivy razvitiya abrazivno-almaznoj obrabotki /Ju.M. Ermakov, Ju.S. Stepanov //Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2011. № 3 (287). – S. 85 – 90.
3. Maslov, E.N. Osnovy teorii shlifovaniya metallov. – М.: Mashgiz, 1951. - 177s.
4. Stepanov, Ju.S. Abrazivnaja obrabotka otverstij /Ju.S. Stepanov, B.I. Afanas'ev. - М.: Mashino-stroenie-1, 2003. – 120 s.
5. Stepanov, Ju.S. Diskretnoe vnutrennee shlifovanie /Ju.S. Stepanov, V.G. Gusev, B.I. Afanas'ev. Pod obshhej red. Ju.S. Stepanova.- М.: Mashinostroenie-1, 2004. – 190 s.
6. Filimonov, L.N. Ploskoe shlifovanie/ Pod. red. V.I. Mucjanko. – 3 izd., pererab. i dop. – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1985, - 109 s., il. – (B-chka shlifovshhika. Vyp. 6.)
7. Shlifovanie vnutrennih fasonnyh poverhnostej / Ju.S. Stepanov, B.I. Afanas'ev, Blurcjanc D.R., I.I. Koltunov, D.S. Fomin. Pod red. Ju.S. Stepanova. – М.: Mashinostroenie-1, 2005. – 262 s.
8. Reznikov A.N. Teplofizika rezanija. – М.: Mashinostroenie, 1969. - 288 s.
9. Granovskij, G.I. Rezanie metallov: Uchebnik dlja mashinostr. i priborostr. spec. vuzov. - М.: Vyssh. shk., 1985. - 304 s.
10. Parfen'eva, I.E. Tehnologija konstrukcionnyh materialov. - М.: Uchebnoe posobie, 2009. – Re-zhim dostupa: <http://www.micromake.ru/old/tkmbook/tkm3.htm> (data obrashhenija: 30.03.2013).
11. Murav'ev, E.M. Slesarnoe delo. Uchebnoe posobie, Prosveshhenie, 1990.
12. Mitjushov, V.A. Tehnicheskij slovar' Terminy i opredelenija, 2012.
13. GOST 25762-83 Obrabotka rezaniem Terminy opredelenija i oboznachenija obshhih ponjatij.
14. GOST 21445-84 Materialy i instrumenty abrazivnye. Terminy i opredelenija.

Volchkova Ekaterina Aleksandrovna

Samara State Technical University in Syzran
student
E-mail: kashatova@yandex.ru

Osipov Alexander Petrovich

Samara State Technical University in Syzran
Candidate of Technical Science, The Dean of Mechanical faculty, The head of Manufacture Engineering Department
E-mail: mf@mfsyzran.ru

УДК 621.785.52+621.787.6

А.В. КИРИЧЕК, Д.Е. ТАРАСОВ, Т.В. МИТИНА

МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ И ЦЕМЕНТАЦИЕЙ

В статье представлена модель исследования общих закономерностей комбинированного упрочнения статико-импульсной обработкой поверхностным пластическим деформированием и цементацией. Дано обоснование выбора воздействующих параметров процесса создания поверхностного слоя с высокими рабочими характеристиками для работы в условиях контактно-усталостного износа.

Ключевые слова: контактная усталость, комбинированное упрочнение, статико-импульсная обработка, цементация, модель.

Технологии по созданию упрочненного (модифицированного) рабочего поверхностного слоя деталей машин на стадии изготовления повсеместно используются в машиностроительном производстве. Применение комбинированных приемов улучшения качества и рабочих характеристик поверхности, расширяет производственные возможности. Целесообразно сочетать методы упрочнения разной физической природы.

Распространенной причиной выхода их из строя тяжело нагруженных ответственных деталей машин, например, элементов подшипников качения, изготавливаемых из цементуемых сталей, является контактная усталость. Предварительное воздействие на материал поверхностным пластическим деформированием с последующей цементацией (науглероживанием) позволяют повысить рабочий ресурс обрабатываемого слоя [1].

Существенно, что эффективность работы упрочненной поверхности часто связана (особенно при действии циклических нагрузок) с ее толщиной.

Статико-импульсная обработка (СИО) поверхностным пластическим деформированием (ППД), как способ, использующий в своем процессе волну деформации, позволяет регулировать параметры качества поверхностного слоя в более широком диапазоне, в отличие от большинства известных методов ППД [2].

Перспективным направлением создания работоспособного поверхностного слоя при изготовлении подшипниковых колец из малоуглеродистых сталей является комбинированное упрочнение СИО ППД и цементацией [3, 4].

Для качественной оценки влияния рассматриваемой технологии на контактно-усталостный износ цементуемых подшипниковых сталей необходимо провести ряд экспериментальных исследований по следующему технологическому маршруту [3]:

Механическая обработка → СИО ППД → Цементация → Шлифование

Достоверную информацию об общих закономерностях выбранного процесса последовательного комбинированного упрочнения возможно получить при использовании метода планирования вычислительного эксперимента, построения регрессионных моделей и крутого восхождения в область оптимума. При этом, появляется возможность оценки общего характера процесса выбранной комбинированной технологии упрочнения и выявления закономерностей влияния множества его факторов на параметры качества обрабатываемого поверхностного слоя.

Планирование вычислительного эксперимента заключается в построении модели исследуемой комбинированной технологии упрочнения в виде «черного ящика», с выделением входных, выходных и внутренних факторов (рис. 1).

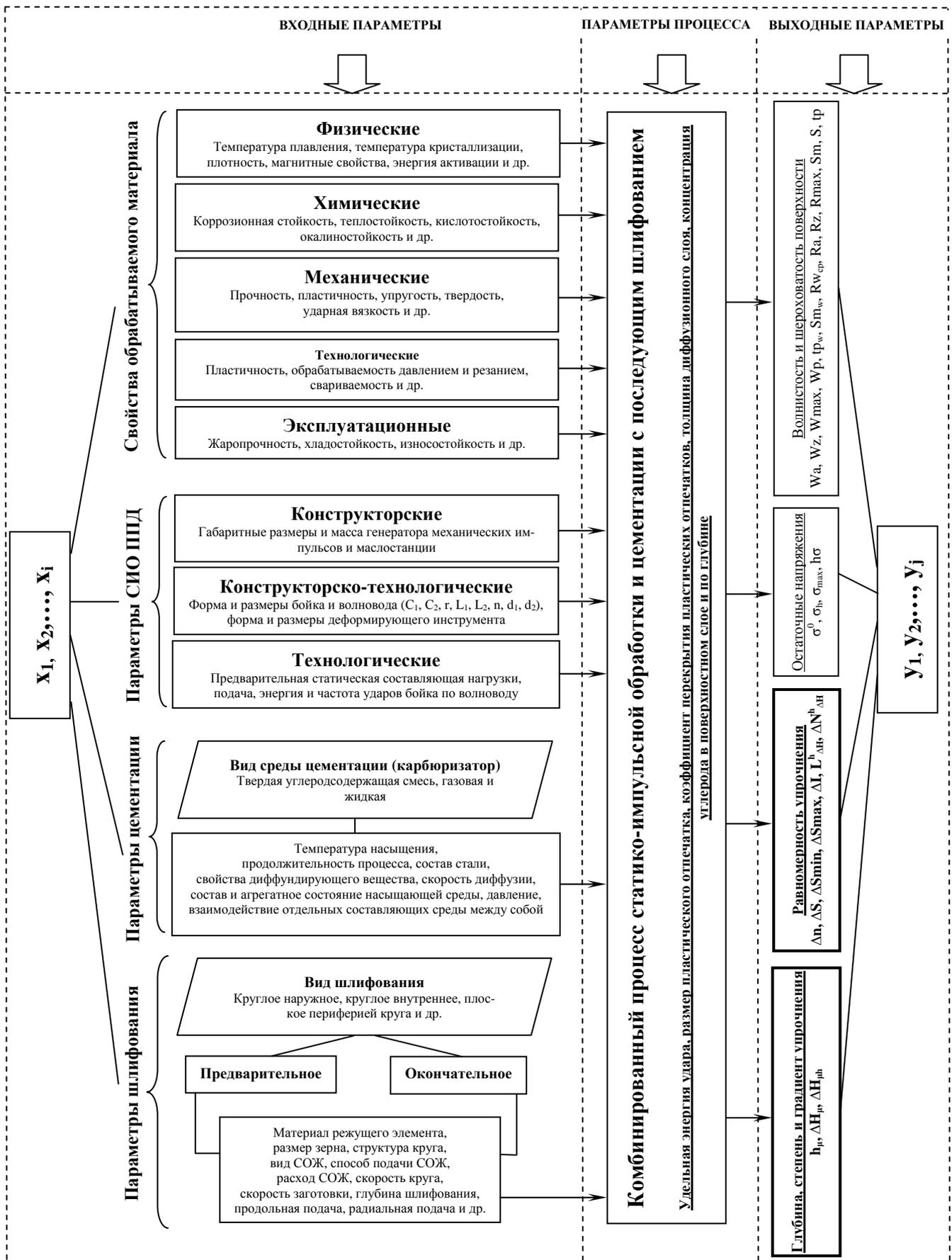


Рисунок 1 – Модель исследования общих закономерностей комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией

Входными параметрами процесса комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией являются параметры:

- 1) характеризующие физические, химические, технологические, механические и эксплуатационные свойства обрабатываемого материала;
- 2) статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием;
- 3) химико-термической обработки – цементации;
- 4) механической обработки – шлифования.

В свою очередь, параметры СИО ППД подразделяются на конструкторские, конструкторско-технологические и технологические.

К конструкторским параметрам СИО относятся параметры оборудования, реализующего процесс упрочнения волной деформации – габаритные размеры и масса генератора механических импульсов, а так же маслостанции.

К конструкторско-технологическим параметрам СИО, во-первых, относятся форма и размеры бойка и волновода: длина, диаметр, акустическая жесткость и их отношение. Во-вторых, форма и размеры деформирующего инструмента.

Технологическими параметрами СИО ППД являются изменяемые в процессе наладки: предварительная статическая составляющая нагрузки, подача, энергия и частота ударов бойка по волноводу.

На параметры цементации в первую очередь оказывает влияние вид среды, в которой осуществляется процесс, а именно твердая углеродсодержащая смесь, газовая или жидкая. В зависимости от этого основными факторами, оказывающими влияние на процесс, являются: температура насыщения, продолжительность процесса, состав стали, свойства диффундирующего вещества, скорость диффузии, состав и агрегатное состояние насыщающей среды, давление, взаимодействие отдельных составляющих среды между собой.

Параметры процесса шлифования определяются видом (круглое наружное, круглое внутреннее, плоское периферией круга и др.) и назначением (предварительная или окончательная) данной обработки. Основными воздействующими факторами при выполнении операции будут: материал режущего элемента, размер зерна, структура круга, вид СОЖ, расход СОЖ, скорость круга, скорость заготовки, глубина шлифования, продольная подача, радиальная подача и др.

Совокупное влияние всех входных факторов на характер процесса проявляется через изменение внутренних параметров комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией: удельной энергии удара, размера пластического отпечатка, коэффициента перекрытия пластических отпечатков, толщины диффузионного слоя, концентрации углерода в поверхностном слое и по глубине.

Все выше приведенные параметры вносят свой вклад в создание комплекса выходных параметров качества обработанной поверхности, а именно определяют: волнистость и шероховатость поверхности, остаточные напряжения, равномерность упрочнения. Они же непосредственно влияют на глубину, степень и градиент упрочнения.

Технология последовательного комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией является сложным многофакторным процессом, а каждый из рассматриваемых факторов носит стохастический характер. Одновременный учет всех рассматриваемых факторов не представляется возможным, даже при реализации планов эксперимента большой степени подробности.

Рационально выделить наиболее значимых и легко управляемых факторов с целью выявления характера их влияния на параметры качества обрабатываемого поверхностного слоя при варьировании в достаточно широкой области значений факторного пространства.

Анализ литературных данных и предварительных экспериментальных исследований позволили выделить наиболее значимые входные факторы и установить диапазон их рационального изменения: исходная микротвердость материала $H_{\mu 0}$, ширина деформирующего стержневого ролика b_p , скорость подачи заготовки относительно инструмента s . Удельная энергия удара a и коэффициент перекрытия пластических отпечатков K являются инте-

гальными внутренними факторами, характеризующими процесс. Наиболее важными выходными параметрами, оказывающими влияние на контактную долговечность поверхностного слоя ответственных тяжело нагруженных деталей машин, являются глубина, степень, градиент, а также равномерность упрочнения.

Попытаемся аргументировано обосновать намеченные области выбранных параметров процесса комбинированной СИО ППД и цементацией.

Свойства обрабатываемого материала образцов, подвергшихся комбинированному упрочнению, зависят от выбранной марки стали, из которой они изготовлены. В проводимых исследованиях это: 18ХГТ и 20Х2Н4А.

Сам по себе химический состав, а именно разница в наличии дорогих легирующих элементов, существенно не сказывается на контактной выносливости одного индивидуально рассматриваемого материала, по крайней мере, до операций, связанных с упрочнением. Но выбор для эксперимента заготовок из различных марок сталей позволяет расширить исследуемое факторное пространство, за счет изменения исходной микротвердости материала $H_{\mu 0}$, оказывающей существенное влияние на процесс контактно-усталостного износа. При этом важно отследить полученные значения данного фактора после обработки по рассматриваемой технологии и то, как это повлияет на работоспособность поверхностного слоя. Немало важно и то, что изменение микротвердости изучается как вдоль, так и вглубь от поверхности. Поэтому, исследуемая величина, обобщает и входит в такие выходные параметры, как глубина, степень, градиент и равномерность упрочнения, существенным образом оказывающих влияние на работу поверхностного слоя при контактно-усталостных нагрузках.

Как отмечалось выше, СИО ППД позволяет изменять в широком диапазоне параметры качества поверхностного слоя, подвергающегося воздействию. Но, для назначения рациональных режимов обработки необходимо выявить связь получаемых параметров качества модифицированного слоя с варьируемыми в определенной области факторами процесса СИО.

Рассматривая в отдельности СИО как процесс поверхностного пластического деформирования металла можно сделать вывод о том, что на состояние модифицированного поверхностного слоя, в большей или меньшей степени, совокупно оказывают влияние конструкторско-технологические и технологические параметры обработки (рисунок 1). Так же не стоит забывать о свойствах обрабатываемого материала.

Свойства поверхностного слоя, после рассматриваемого волнового упрочнения, как и при других способах динамического ППД, создаются за счет пластической деформации металла под единичными отпечатками, полученными, в основном, под действием динамической составляющей воздействующей силы. Конфигурация отпечатков напрямую зависит от формы и размеров деформирующего инструмента. При этом, на размер получаемого единичного отпечатка влияют форма деформирующей поверхности инструмента, а так же форма и энергия импульса.

На структуру упрочняемого поверхностного слоя существенное влияние оказывает степень перекрытия единичных отпечатков, которая определяется их размерами, величиной относительной подачи инструмента и заготовки, частотой импульсов.

С целью оптимизации попытаемся выделить постоянные и варьируемые (наиболее значимые) входные факторы СИО ППД, оказывающие влияние на процесс.

Учитывая особенности генератора механических импульсов, а так же нюансы, связанные с выполненной конструкторской адаптацией данного устройства, используем боек и волновод неизменной формы и размеров. При этом энергия и частота ударов бойка по волноводу будут константными.

Однако, как указано выше, вклад энергии ударов в процесс формирования упрочненной поверхности, весьма существенный. Поэтому, для изучения влияния данного фактора на модификацию структуры поверхностного слоя металла, необходимо при неизменной форме варьировать размерами деформирующего инструмента, а именно шириной стержневого ролика b_p . Тем самым создается внутренний изменяющийся параметр процесса – удельная энергия удара a (Дж/мм):

$$a = \frac{A}{b_p}$$

где A - энергия удара, Дж;

b_p - ширина стержневого ролика, мм.

В данных исследованиях ставилось целью создать качественно модифицированный поверхностный слой значительной глубины. При формируемой генератором импульсов постоянной энергией удара $A = 25$ Дж использовали стержневые ролики диаметром $D_p = 10$ мм и шириной $b_{p1} = 5$ мм, $b_{p2} = 6$ мм, $b_{p3} = 7$ мм. Соответственно, при осуществлении процесса СИО варьировали следующими значениями удельной энергии удара: $a_1 = 5$ Дж/мм; $a_2 = 4,17$ Дж/мм; $a_3 = 3,57$ Дж/мм.

Скорость подачи заготовки относительно инструмента s , как технологический фактор процесса волнового упрочнения, влияет на степень перекрытия единичных отпечатков, характеризуемой коэффициентом перекрытия K , который является комплексным внутренним параметром процесса СИО:

$$K = 1 - \frac{s}{\delta f 60}$$

Практическая значимость K проявляется в диапазоне $-1 \leq K \leq +1$. Масса исследований [2] свидетельствуют о том, что для возможности варьирования степенью, глубиной и равномерностью упрочнения в широких пределах, целесообразно выбирать рассматриваемый фактор из следующего интервала $0 < K < 1$ (пластические отпечатки перекрываются при обработке). Использовать режим упрочнения СИО, когда $K = 1$ нецелесообразно, так как происходит полное перекрытие отпечатков, т.е. удары наносятся в одно и то же место.

При $0 \leq K \leq 0,5$ изменение (рост) степени, глубины и равномерности упрочнения происходит более интенсивно. Начиная со значения $K \geq 0,5$ создается равномерно упрочненный поверхностный слой, который с повышением данного фактора увеличивается по степени упрочнения и глубине. СИО ППД с $K > 0,8 \dots 0,9$ формирует структуру с большой степенью упрочнения на большой глубине с дефектным (переупрочненным) слоем у поверхности.

Данная информация подтверждается результатами исследований, проводимых в работе [5]. Там же говорится о том, что при диапазоне $0,25 < K \leq 0,5$ создается поверхность с наиболее выраженной гетерогенностью.

Важными являются сведения о влиянии коэффициента перекрытия K на эксплуатационные характеристики модифицированного слоя. Так, для стали 45, подвергшейся волновому нагружению [5], наибольшее повышение сопротивления контактному выкрашиванию (в 3...6 раз) получено на поверхности с гетерогенной структурой упрочнения при коэффициенте перекрытия $0,35 < K < 0,45$.

Границы значений входного фактора K в данной работе определены следующим интервалом $0,2 \leq K \leq 0,6$. Проводить упрочнение СИО с $K > 0,6$ видится нерациональным. Во-первых, происходит упрочнение (изменение кристаллического строения) поверхности, близкое к состоянию перенаклепа. Данный факт позволяет предположить, что последующая диффузия углерода в материал будет незначительна вследствие создания чрезмерного количества дислокаций. Углерод закрепится в полученной структуре на небольшой глубине, препятствуя дальнейшему протеканию процесса внутрь. Во-вторых, при $K > 0,6$ наблюдается тенденция к равномерному упрочнению, снижающему работоспособность поверхности при контактно-усталостном нагружении.

Использовать значения $K < 0,2$ не эффективно, так как предварительно упрочненный слой СИО ППД хоть и будет модифицирован, но степень, глубина и равномерность упрочнения будут незначительными, что не позволит существенно изменить эксплуатационные характеристики поверхности.

Любопытно, что произойдет с поверхностью при воздействии углерода на гетерогенную структуру, полученную в результате СИО. Вызванный интерес поясняется тем, что и процесс цементации является гетерогенным.

В итоге, значения коэффициента перекрытия пластических отпечатков выбирались следующими: $K = 0,2$, $K = 0,4$, $K = 0,6$.

Предварительная статическая составляющая нагрузки, как входной фактор СИО ППД, при проведении исследований оставалась неизменной. Выбор значения обосновывался возможностью осуществления процесса волнового нагружения, основным требованием которого является неразрывный контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Переходя к входным параметрам цементации, необходимо определиться с оборудованием для осуществления процесса и видом используемой среды (карбюризатором). Практика показала, что в условиях серийного производства ответственных тяжелонагруженных деталей машин, для обеспечения высокого качества цементуемого слоя, повышения производительности и соблюдения общей технической культуры производства хорошо себя зарекомендовала газовая цементация в механизированной камерной безмуфельной печи (агрегате) со встроенными закалочными баками, приспособленной для работы с контролируруемыми атмосферами.

Учитывая сложность комбинированной технологии СИО ППД и цементацией, обусловленной различной физикой осуществления каждого процесса, параметры науглероживания выбирались одинаковыми при обработке заготовок из выбранных сталей. Однако, учитывая различия в изменении свойств поверхностного слоя рассматриваемых материалов по ходу осуществления технологии, можно предположить, что и процесс диффузии углерода будет неодинаков для выбранных материалов. Поэтому, к внутренним параметрам процесса комбинированной обработки отнесли толщину диффузионного слоя, а так же концентрацию углерода в поверхностном слое и по глубине. Единственным требованием, при выборе параметров цементации, было создание твердости на поверхности заготовок из сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А не менее $56HRC$.

В рамках данного исследования не ставилось целью проследить влияния различных параметров шлифования (предварительного, а в большей степени окончательного) на свойства получаемой поверхности. Тем не менее, важность данной технологической операции нельзя недооценивать. Поэтому, для придания поверхностям образцов соответствующей шероховатости и исключения прижогов, негативно влияющих на работоспособность модифицированного слоя, выбор параметров основывался на систематизации информации по данному виду обработки, в частности поверхностей ответственных деталей, подвергшихся различным упрочняющим технологиям.

В итоге, обозначенные варьируемые параметры процесса при простоте управления ими в выбранном интервале, позволят оценить вклад каждого из них в формировании выходных показателей качества модифицированного поверхностного слоя, подверженного контактному износу. При этом, факторы, значения которых были обоснованно стабилизированы, позволят создать необходимые технологические условия процесса комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией при образовании требуемого комплекса свойств обрабатываемой поверхности.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания 7.505.2011. Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Папшев, Д.Д. Эффективность упрочнения цементованных деталей машин [Текст] / Д.Д. Папшев, А.М. Пронин, А.Б. Кубышкин // Вестник машиностроения. – 1990. – № 8. – С. 61-64.
2. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст]: библиотека технолога / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
3. Киричек, А.В. Перспективные методы комбинированного упрочнения на основе статико-импульсной обработки ППД [Текст] / А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 10. – С. 44-47.
4. Повышение контактной долговечности цементуемых подшипниковых сталей комбинированной обработкой [Текст] / А.В. Киричек [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/2 (288). – С. 83-90.
5. Баринов, С.В. Повышение сопротивления контактному выкрашиванию гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / Баринов Сергей Владимирович. – Орел, 2009. – 166 с.

Киричек Андрей Викторович

Юго-Западный государственный университет, г. Курск
Доктор технических наук, профессор, проректор по НР
Тел.: (4712)50-48-14
E-mail: avk.57@ya.ru

Тарасов Дмитрий Евгеньевич

ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Старший преподаватель кафедры «ТМиКТИ»
Тел.: 8-915-502-08-42
E-mail: tde82@yandex.ru

Митина Татьяна Викторовна

ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
Магистрант кафедры «ТМиКТИ»
Тел.: (4862) 55-55-24
E-mail: mtv33@mail.ru

A.V. KIRICHEK, D.E. TARASOV, T.V. MITINA

**MODEL STUDY OF GENERAL REGULARITIES OF THE
COMBINED HARDENING OF THE STATIC-PULSE PROCESSING AND
CEMENTATION**

The article presents a model study of General regularities of the combined hardening of the static-pulse processing of surface plastic deformation and cementation. Given the rationale for the choice of the affecting parameters of the process of creation of the surface layer of performance specifications for operation in the conditions of contact fatigue wear.

Keywords: *contact fatigue, combined hardening, the static-pulse processing, carbonization, model.*

BIBLIOGRAPHY

- 1 Papshev, D.D. Jeffektivnost' uprochneniya cementovannyh detalej mashin [Tekst] / D.D. Papshev, A.M. Pro-nin, A.B. Kubyshkin // Vestnik mashinostroeniya. – 1990. – № 8. – S. 61-64.
- 2 Kirichek, A.V. Tehnologija i oborudovanie statiko-impul'snoj obrabotki poverhnostnym plasticheskim de-formirovanijem [Tekst]: biblioteka tehnologa / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, A.G. Lazutkin. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 288 s.
- 3 Kirichek, A.V. Perspektivnye metody kombinirovannogo uprochneniya na osnove statiko-impul'snoj obrabotki PPD [Tekst] / A.V. Kirichek, D.E. Tarasov // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. – 2007. – № 10. – С. 44-47.
- 4 Povyshenie kontaktnoj dolgovechnosti cementuemyh podshipnikovyh stalej kombinirovannoj ob-rabotkoj [Tekst] / A.V. Kirichek [i dr.] // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2011. – № 4/2 (288). – S. 83-90.
- 5 Barinov, S.V. Povyshenie soprotivlenija kontaktnomu vykrashivaniyu geterogennym deformacion-nym up-rochnenijem statiko-impul'snoj obrabotkoj: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.08, 05.03.01 / Barinov Ser-gej Vladimiro-vich. – Orel, 2009. – 166 s.

Kirichek Andrey Viktorovich

Southwest State University, Kursk
Doc. Sc. tech., Prof., Prorector
Phone: (4712) 50-48-14
E-mail: avk.57@ya.ru

Tarasov Dmitry Evgenievich

FSEI HVT «State Universiti – ESPC», Polikarpov Technological Institute
Senior lecturer «Technology of mechanical engineering and design-technological computer science»
Phone. 8-915-502-08-42
E-mail: tde82@yandex.ru

Tatiana Viktorovna Mitina

FSEI HVT «State Universiti – ESPC», Polikarpov Technological Institute
Master student «Technology of mechanical engineering and design-technological computer science»
Phone. (4862) 55-55-24
E-mail: mtv33@mail.ru

А.В. МИХЕЕВ

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Автором статьи проведенный анализ функциональных структур процесса гидроабразивного резания, предложена методика оценки энергоэффективности технологии гидроабразивного резания.

Ключевые слова: абразив, гидроабразивное резание, коэффициент эффективности.

Промышленный опыт эксплуатации гидрорезного оборудования особенно наглядно показывает влияние всех элементов структуры управления технологической системой на эффективность выполняемых операций резания: при одной и той же технологической базе результат обработки может быть прямо противоположным (от наихудшего до наилучшего качества обработки). В то же время пока не создано единого методологического подхода к управлению технологической системой гидроабразивного резания как многоуровневой системы с иерархической структурой.

Большинство авторов исследований получили более или менее обоснованные рекомендации по выбору технологических параметров управления для конкретных условий [1, 2]. С одной стороны, такой подход позволяет исследовать проблемы выбора оптимальных условий обработки как часть общей задачи управления технологической системой, с другой – ограничивает полученные результаты рамками конкретной содержательной интерпретации. Кроме того, в подавляющем большинстве моделей не учитывается множественное подчинение элементов технологической системы.

Для повышения эффективности обработки большинство исследователей ограничиваются базовой двухуровневой организационной системой, состоящей на верхнем уровне из управляющего центра и активных элементов на нижнем уровне. Одним из объяснений концентрации внимания исследователей на двухуровневых иерархических системах является возможность декомпозиции структуры на набор элементарных «блоков». В этом случае решение задачи анализа заключается во введении критерия эффективности, являющейся мерой степени достижения цели обработки. Например, критерием эффективности функционирования технологической системы может быть производительность или качество гидроабразивного резания.

Многочисленные исследования производительности гидроабразивного резания различных материалов показывают, что с увеличением давления истечения струи максимум силы воздействия потока на материал увеличивается по зависимости, близкой к прямолинейной. На эффективность резания большое влияние оказывают физико-механические свойства обрабатываемого материала, которые выражены совокупностью ряда прочностных характеристик.

Для выявления качественных и количественных эффектов между управляющим центром и активными элементами проведем декомпозицию и рассмотрим одноэлементную двухуровневую систему, состоящую из одного центра и одного активного элемента АЭ технологической системы – сверхзвуковой струи жидкости, структура которой представлена на рисунок 1.

Так как сила воздействия струи на материал прямо пропорциональна квадрату скорости истечения струи, для активного элемента (АЭ) технологической системы X_1 выбирается эффективное значение скорости истечения v_i . При этом АЭ получает от технологической системы необходимый скоростной напор $p_i(v_i)$ и несет затраты $c_i(v_i)$ на резание материала.



Рисунок 1 – Структура двухуровневой одноэлементной технологической системы гидроабразивного резания

Таким образом, целевая функция АЭ «сверхзвуковая струя жидкости» имеет вид:

$$f(v) = p(v) - c(v). \quad (1)$$

Содержательно в рамках этой модели (1) технологическая система гидроабразивного резания должна, как минимум, компенсировать энергетические затраты АЭ, например, подаваемая энергия должна быть равна затратам на резание. При этом, во-первых, если скорость истечения струи v такова, что сила резания больше создаваемой силы воздействия потока на материал, то сквозное резание при заданной производительности невозможно и, во-вторых, создавая давление истечения, равное затратам на резание, мы получаем возможность найти наилучшее для технологической системы реализуемое действие.

При заданном давлении истечения p технологическая система гидроабразивного резания получает от деятельности АЭ требуемую производительность, выраженную через удельный унос материала $H(v)$, определяемый скоростью истечения струи v , при этом надо учитывать, что для создания необходимой скорости истечения технологическая система несет определенные энергетические затраты $\sigma(v)$.

Откуда целевая функция технологической системы гидроабразивного резания:

$$\Phi(v) = H(v) - \sigma(v). \quad (2)$$

В рамках такой интерпретации под эффективностью работы технологической системы понимается максимальное значение целевой функции:

$$K_0(C) = \max_{v \in P(C)} [H(v) - c(v)], \quad (3)$$

где $P(C)$ – множество состояний активного элемента «сверхзвуковая струя жидкости»:

$$P(C) = \left\{ v \in A \mid c(v) - \min c(v) \leq C \right\}. \quad (4)$$

Проведенный анализ функциональных структур процесса гидроабразивного резания показывает, что управляющим центром группы элементов, реализующим основную функцию технологической системы, является сопло, которое взаимодействует со всеми элементами системы и формирует режущий инструмент – гидроабразивную струю.

Характер изменения гидродинамических параметров струи по длине (длина начального участка, диаметр ядра, угол раскрытия, скорость абразива или жидкости и др.) находится в прямой зависимости от параметров сопла.

К основным характеристикам сопла, которые можно использовать для управления процессом гидроабразивного резания, относятся [3-5]:

- конструктивные параметры (способ смешивания жидкости и абразива, конструктивное исполнение составных частей сопла и др.);
- геометрические параметры (диаметр сопла, длина фокусирующей трубки, внутренняя геометрия струеформирующих отверстий и др.);
- динамические свойства (приведенная масса и др.);

- гидродинамические свойства (расход жидкости и абразива, коэффициент потерь, коэффициент поджатия потока и др.);
- пространственная ориентация сопла.

В иерархическую структуру управления технологической системы гидроабразивного резания промежуточный центр – Π_1 – «струеформирующее сопло», целевая функция которого равна:

$$\Phi_1(v) = H_1(v) + \sigma_1(v) - \sigma(v), \quad (5)$$

где $H_1(v)$ - эффективность преобразования соплом потенциальной энергии потока жидкости p в кинетическую;

$\sigma_1(v)$ - затраты со стороны технологической системы на создание необходимого скоростного потока жидкости в подводящих к соплу каналах.

Целевая функция центра технологической системы при этом становится:

$$\Phi(v) = H(v) - \sigma_1(v). \quad (6)$$

При этом целевая функция активного элемента «сверхзвуковая струя жидкости» остается неизменной.

В результате технологическую систему гидроабразивного резания можно представить как трехуровневую одноэлементную систему (рисунок 2).

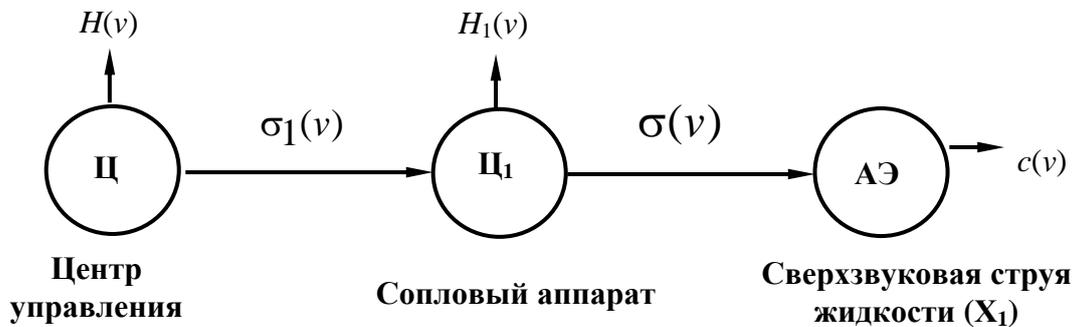


Рисунок 2 – Структура трехуровневой одноэлементной технологической системы гидроабразивного резания

Множество действий, реализуемых в трехуровневой структуре управления технологической системой определяется по следующей зависимости:

$$R(p) = \left\{ v \in A \mid c(v) - \min c(v) - H_1(v) \leq c \right\}. \quad (7)$$

Рассмотрим пример, иллюстрирующий эффективность введения в структуру управления технологической системой гидроабразивного резания дополнительных уровней иерархии.

Производительность раскроя будет определяться скоростью подачи соплового аппарата относительно материала при его полном прорезании. Изменяя давление рабочей жидкости, диаметр и внутренний профиль сопла, т.е. изменяя величину подаваемой энергии на единицу поверхности материала и зная расчетную величину объема удаляемого материала и количество энергии, необходимое на его разрушение, можно в каждом конкретном случае определить время обработки различных материалов, а, следовательно, и производительность.

Глубина проникновения струи в материал за малый интервал времени значительно больше горизонтального перемещения сопловой головки, обусловленного скоростью подачи, поэтому контактную площадку взаимодействия струи с материалом можно условно считать неподвижной в горизонтальной плоскости практически для всех случаев резания струей. Горизонтальная скорость подачи сопла аппроксимируется последовательностью ступеней, размеры которых соответствуют диаметру сопла, за период времени, требуемый для сквозного

раскроя материала. Таким образом, материал раскраивается путем постепенного перемещения фронта разрушения в глубину. В установившемся режиме скорость движения границы разрушения определяется:

$$V_p = \frac{n}{q}, \quad (8)$$

где n - мощность потока жидкости;

q - количество энергии потока жидкости, необходимое для разрушения единицы массы материала.

Учитывая, что мощность потока является величиной прямо пропорциональной силе F и скорости струи v , получим выражение для определения скорости подачи струи относительно материала:

$$S = \frac{Fv}{qV_p}. \quad (9)$$

Сила резания материала определяется по следующей зависимости:

$$P_z = (0,5 + \varepsilon)\rho f v^2, \quad (10)$$

где ρ - плотность жидкости;

f - площадь сечения струи;

ε - коэффициент сжатия струи.

Тогда из (3) следует, что множество действий реализуемых технологической системой гидроабразивного резания:

$$P(P_z) = \left[0; \sqrt{\frac{P_z}{(0,5 + \varepsilon)\rho f}} \right]. \quad (11)$$

Откуда из (4) эффективность двухуровневого управления технологической системой гидроабразивного резания:

$$K_0(P_z) = \max \left\{ \frac{F}{qV_p} \sqrt{\frac{P_z}{(0,5 + \varepsilon)\rho f}} - P_z, \frac{(F / qV_p)^2}{(0,5 + \varepsilon)\rho f} \right\}. \quad (12)$$

Введем промежуточный центр «струеформирующее сопло».

Определим коэффициент преобразования энергии потока среды с помощью сопла, как отношение удельной кинетической энергии струи на выходе из сопла к избыточной удельной потенциальной энергии текущей среды на входе:

$$q = \frac{mv^2}{2pQ}, \quad (13)$$

где p - избыточное статическое давление;

m - массовый расход;

Q - объемный расход жидкости;

v - средняя скорость потока.

Тогда из (13) с учетом (10) получаем, что:

$$R(p) = \left[0, \frac{1}{(0,5 + \varepsilon)\rho f} \left(\frac{m}{2pQ} + \sqrt{\left(\frac{mv^2}{2pQ} \right)^2 + (0,5 + \varepsilon)\rho f p} \right) \right]. \quad (14)$$

Понятно, что минимум энергетических затрат в технологической системе достигается при согласовании энергетических расходов в подсистеме $C(P_z)$ и в технологической системе $C(p)$, т.е. при условии, что:

$$C(P_z) - C(p) = H_1(v). \quad (15)$$

Из (15) следует, что:

$$C(p) = C(P_z) - \frac{m}{2pQ} \left(\frac{F}{qV_p} + \frac{m}{2pQ} \right) / ((0,5 + \varepsilon)pf). \quad (16)$$

Получаем, зависимость для определения эффективности трехуровневой системы управления технологической системой гидроабразивного резания:

$$K_1(P_z) = \max \left\{ \left(\frac{F}{qV_p} + \frac{m}{2pQ} \right) \sqrt{\frac{P_z}{(0,5 + \varepsilon)pf}} - P_z, \frac{\left(\frac{F}{qV_p} + \frac{m}{2pQ} \right)^2}{(0,5 + \varepsilon)pf} \right\}. \quad (17)$$

Сравним эффективность управления технологической системой гидроабразивного резания с двухуровневой и трехуровневой структурой, подставив в формулы (12) и (14) усредненные значения величин $f = 0,00758$; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\varepsilon = 1$, $P_z = 10 \text{ Н}$, $Q = 0,00005 \text{ м}^3/\text{с}$, $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $m = 0,5 \text{ кг/с}$, $V_p = 60 \text{ м/с}$, $q = 0,045$, $F = 100 \text{ Н}$.

Откуда:

$$K_0(P_z) = (55,55; 437,81) \quad (18)$$

$$K_1(P_z) = (55,58; 438,03) \quad (19)$$

Чем больше коэффициент эффективности работы технологической системы, тем эффективнее процесс гидроабразивного резания.

Сравнивая $K_0(P_z)$ и $K_1(P_z)$, получаем, что при любом значении P_z $K_1(P_z) \geq K_0(P_z)$, что говорит об увеличении эффективности управления технологической системой гидроабразивного резания при введении дополнительного управляющего центра «сопловый аппарат».

Для обеспечения высокой производительности мы стремились уменьшить затраты на резание материала путем снижения величины съема материала в единицу времени. Однако при обеспечении качества поверхности реза необходимо ввести ограничение на объем струи, воздействующего на единицу обрабатываемой поверхности в единицу времени [6-8].

В этом случае порядок функционирования технологической системы гидроабразивного резания является следующим. Исходя из требуемого качества поверхности реза $H(\Delta_j)$, определяется величина съема объема материала $c(Q)$. После чего АЭ технологической системы выбирают действия, максимизирующие их целевые функции в зависимости от $c(Q)$. В свою очередь величина $c(Q)$ складывается из расхода рабочей жидкости $\sigma(Q)$ и скорости подачи сопла относительно материала S .

В соответствии с принципом компенсации необходимо решить следующую задачу согласованного управления:

$$x_\Delta = \arg \max \{H(\Delta) - c(V)\}. \quad (20)$$

Так как требуемая величина параметра точности $H(\Delta)$ должна оставаться постоянной, то, используя выражение (20), можно определить требуемую интенсивность разрушения V_0 и сконцентрировать все внимание на решении выбора оптимальных технологических параметров скорости подачи сопла, давления истечения струи, расхода абразивного зерна.

Таким образом, величина съема объема материала для достижения заданной точности ограничена величиной V_0 , тогда, решая задачу условной оптимизации для достижения требуемой шероховатости поверхности, получаем, что коэффициент эффективности технологической системы:

$$K(V_0) = \left\{ (c_p p^{c_1} S^{c_2} a^{c_3}) \left(\frac{V_0 \pi L t g^2 \beta}{a^3 3} \right) - V_0 \right\}. \quad (21)$$

В физическом смысле это означает что, чем выше скорость потока жидкости и чем меньше подача сопла, тем влияние большего числа вершин зерен сказывается на геометрии неровностей поверхности, что, в конечном счете, приводит к уменьшению высоты этих неровностей (рис. 3).

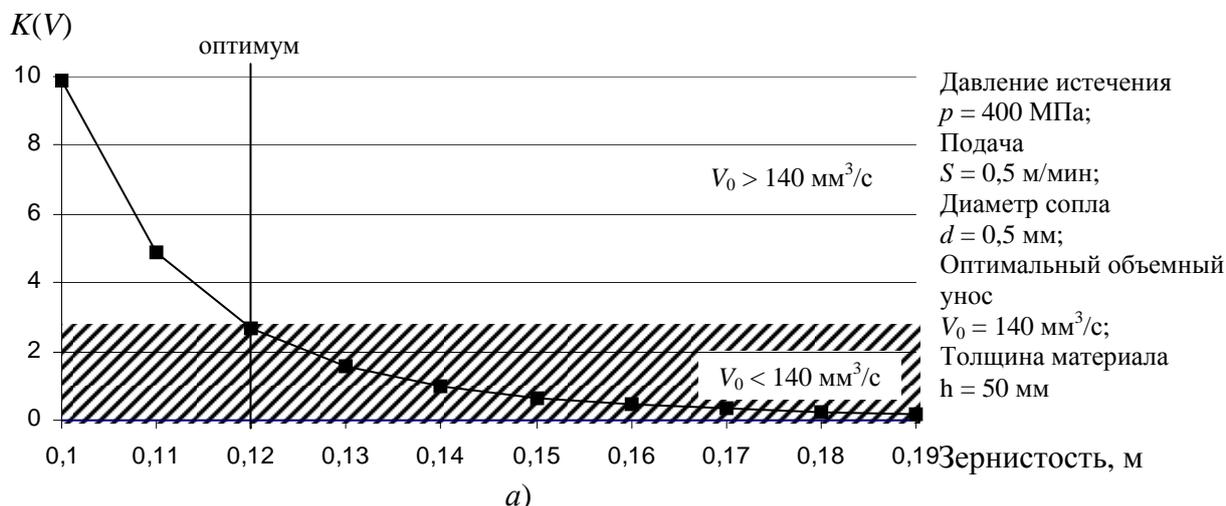


Рисунок 3а - Зависимость эффективности работы технологической системы гидроабразивного резания по согласованному обеспечению точности и шероховатости поверхности реза: а - от зернистости абразива

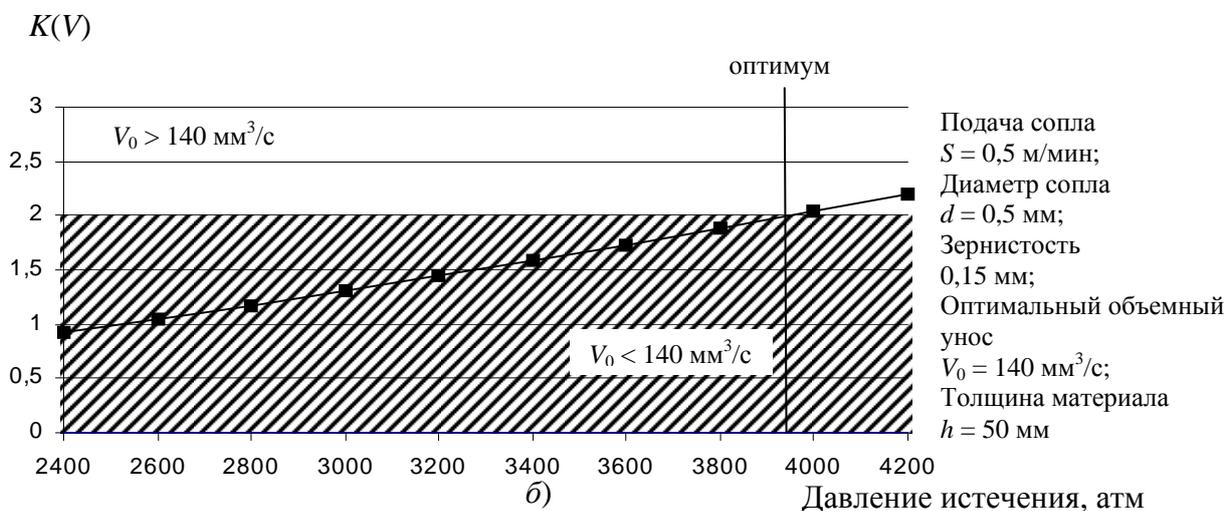


Рисунок 3б - Зависимость эффективности работы технологической системы гидроабразивного резания по согласованному обеспечению точности и шероховатости поверхности реза: б - от давления истечения струи

Отсюда следуют важный вывод, необходимый для понимания вопроса повышения эффективности регулирования технологической системы гидроабразивного резания. При одинаковых энергетических затратах со стороны технологической системы можно использовать ряд технологических приемов, позволяющих повысить производительность процесса. Сводятся они к сокращению затрат на резание материала $c(v)$ путем регулирования расхода рабочей жидкости через сопловый аппарат, повышения давления истечения, увеличения скорости подачи сопла и т.д.

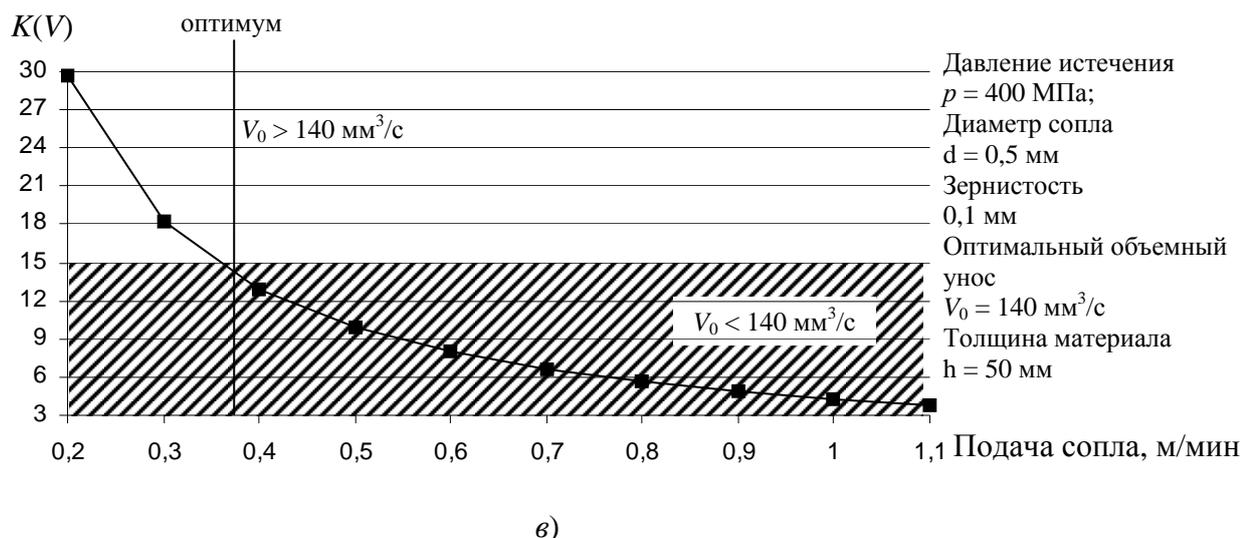


Рисунок 3в - Зависимость эффективности работы технологической системы гидроабразивного резания по согласованному обеспечению точности и шероховатости поверхности реза: в - от скорости подачи сопла

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Momber, A.W. Principles of Abrasive Water Jet Machining [Text] / A.W. Momber, R. Kovacevic. – Springer, 1998. – 394 p.
2. Тихомиров, Р.А. Резание струями жидкости высокого давления. Механическая обработка пластмасс [Текст] / Р.А. Тихомиров, В.И. Николаев. - Л.: Машиностроение, 1975. - 120 с.
3. Степанов, Ю.С. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей. Библиотека технолога. [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков. - М.: Машиностроение, 2004. 240 с.
4. Степанов, Ю.С. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок [Текст] /Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алущин // Научные технологии в машиностроении. - № 6. - 2012. – С. 11 – 17.
5. Степанов, Ю.С. Совершенствование гидроабразивной обработки [Текст] //Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков /1-ая международная научно-техническая конференция «Совершенствование существующих и создание новых технологий в машиностроении и авиастроении: Сб. тр. (1-3 июня 2009 года, г. Ростов-на-Дону). – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – С. 93 – 109.
6. Барсуков, Г.В. Определение компонентного состава масс абразивной смеси для резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей [Текст] / Г.В. Барсуков, А.А. Александров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 2-3. - 2012. – С. 74 – 81.
7. Галиновский, А.Л. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки [Текст] / А.Л. Галиновский, В.А. Тарасов, В.М. Елфимов // Известия высших учебных заведений «Машиностроение».-2011.-№4.- с. 46-54.
8. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Михеев А.В. Влияние параметров течения сверхзвуковой гидроабразивной струи на геометрическую форму поверхности разрушения преграды //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 2-5 (292). – 2012. – С. 53-62.

Михеев Александр Васильевич

Государственный университет - УНПК, г. Орел

Научный сотрудник

Тел. (4862) 54-14-51

E-mail: awj@list.ru

A.V. MIKHEEV

**INCREASE ENERGY TECHNOLOGIES
OF WATERJET CUTTING ON THE BASIS SOUND MANAGEMENT
SYSTEM TECHNOLOGY**

The author of the article, the analysis of functional structures of the process of waterjet cutting method for evaluation of energy efficiency technology waterjet cutting.

Keywords: *abrasive, waterjet cutting, efficiency ratio.*

BIBLIOGRAPHY

1. Momber, A.W. Principles of Abrasive Water Jet Machining [Text] / A.W. Momber, R. Kovacevic. – Springer, 1998. – 394 p.
2. Tihomirov, R.A. Rezanie strujami zhidkosti vysokogo davlenija. Mehanicheskaja obrabotka plastmass [Tekst] / R.A. Tihomirov, V.I. Nikolaev. - L.: Mashinostroenie, 1975. - 120 s.
3. Stepanov, Ju.S. Sovremennye tehnologicheskie processy mehanicheskogo i gidrostrujnogo raskroja tehniceskikh tkanej. Biblioteka tehnologa. [Tekst] / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov. - M.: Mashinostroenie, 2004. 240 c.
4. Stepanov, Ju.S. Sovremennye tehnologii gidro- i gidroabrazivnoj obrabotki zagotovok [Tekst] / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, E.G. Aljushin // Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii. - № 6. - 2012. – S. 11 – 17.
5. Stepanov, Ju.S. Sovershenstvovanie gidroabrazivnoj obrabotki [Tekst] // Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov / 1-aja mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Sovershenstvovanie sushhestvujushchih i sozdanie novyh tehnologij v mashinostroenii i aviastroenii: Sb. tr. (1-3 ijunja 2009 goda, g. Rostov-na-Donu). – Rostov n/D: Izd-vo JuNC RAN, 2009. – S. 93 – 109.
6. Barsukov, G.V. Opredelenie komponentnogo sostava mass abrazivnoj smesi dlja rezanija materialov sverhzvukovoj gidroabrazivnoj struej [Tekst] / G.V. Barsukov, A.A. Aleksandrov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – № 2-3. - 2012. – S. 74 – 81.
7. Galinovskij, A.L. Minimizacija tehnologicheskoy sebestoimosti gidroabrazivnogo rezanija s uche-tom stoimostnyh i tehnologicheskikh parametrov processa obrabotki [Tekst] / A.L. Galinovskij, V.A. Tarasov, V.M. Elfimov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij «Mashinostroenie».-2011.-№4.- s. 46-54.
8. Stepanov Ju.S., Barsukov G.V., Miheev A.V. Vlijanie parametrov techenija sverhzvukovoj gidroabrazivnoj strui na geometricheskiju formu poverhnosti razrushenija pregrady //Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - № 2-5 (292). – 2012. – S. 53-62.

Mikheev Alexander

State University - ESPC, Orel

research associate

Tel. (4862) 54-14-51

E-mail: awj@list.ru

УДК621.914

И.В. ОВСЯНИКОВА, Е.А. СЫЧЕВ, А.С. ТАРАПАНОВ

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Рассматриваются вопросы повышения эффективности и качества электроэрозионной обработки посредством адаптивного управления. Приведены основные взаимосвязи и параметры, на основе которых строится модель адаптивного управления электроэрозионной обработкой.

Ключевые слова: эффективность, адаптивное управление, оптимальный режим, нейронная сеть.

Главной задачей повышения эффективности и качества электроэрозионной обработки (ЭЭО) является нахождение оптимальных режимов процессов, сопровождающих ЭЭО, установление взаимосвязи входных и выходных параметров обработки для уменьшения износа электрода-инструмента (ЭИ).

Вследствие малой длительности и высокой мощности единичного разряда слой металла на обрабатываемом участке расплавляется, большая часть энергетического воздействия приходится на разрушение поверхностного слоя. Изменение энергии единичного разряда определяется формой импульса и вольт-амперной характеристикой генератора импульсов.

Технологические показатели обработки, а именно, шероховатость R_z , мкм и производительность M , мм³/мин., зависят от частоты следования рабочих импульсов f , кГц, скважности q , силы тока I , А, напряжения U , В. Высота микронеровностей R_z , мкм не должна превышать 20 мкм при максимальной производительности с учетом тепло-физических свойства материалов ЭИ и обрабатываемой детали. Процесс оптимизируют по R_z , мкм.

Температура рабочей среды в зоне обработки, оказывает влияние на физическое состояние межэлектродного промежутка (МЭП). Эти тепловые процессы тесно связаны с производительностью ЭЭО, качеством обработанной поверхности и износом ЭИ. При повышении температуры рабочей среды уменьшается ее теплоемкость и вязкость, снижается ее охлаждающая способность и возможность захвата и выноса продуктов эрозии из МЭП.

Все вышеперечисленное говорит о возможности управления или повышения производительности и качества поверхностей, обработанных электроэрозионным способом за счет увеличения зоны энергетических затрат на электроэрозионное разрушение методом оптимизации параметров импульсов.

Для получения необходимых параметров процесса ЭЭО применяются системы управления, основанные на различных способах управления, которые можно разделить на три основные группы:

- регулирование подачи ЭИ системы осуществляется с помощью простой автономной замкнутой цепи управления;
- программное управление - специальное программное обеспечение обеспечивает установку параметров обработки или выбора эмпирических или теоретических параметров обработки;
- адаптивное управление - использование системы, осуществляющей непрерывную комплексную оценку процесса обработки и установку параметров в ходе процесса ЭЭО.

Используют различные комбинации перечисленных систем. Роль адаптивной системы управления сводится к выявлению и устранению всех отклонений процесса от его нормального протекания.[1]

Одним из важных показателей процесса ЭЭО является устойчивость процесса. Под устойчивостью понимается способность сохранять в течение заданного промежутка времени непрерывный процесс съема металла и эвакуации продуктов эрозии, несмотря на возникновение в системе случайных или закономерных возмущающих воздействий.

Для определения искомых сочетаний параметров, обеспечивающих максимально производительный режим, необходимо знать для данных рабочих площадей и токов оптимальное значение длительности или скважности импульса при различных частотах следования импульсов. Таким образом, для каждого режима необходимо найти оптимальное значение скважности.[1]

Выбор режима электроэрозионной обработки, для копировально-прошивочных станков, осуществляется в такой последовательности:

- определение модели станка и генератора импульсов, материала и параметры качества ЭИ, вид диэлектрической жидкости и степень её фильтрации, полярность подключения электродов;

- задается форма разрядных импульсов с учетом материала детали и допустимого износа ЭИ, формы и требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности;

- устанавливаются параметры импульсов;
- настраивается регулятор подачи для получения рабочих импульсов при выбранной частоте их следования;

- задаются расход и давление прокачки рабочей жидкости, частоту релаксации и вибрации электродов в зависимости от величины рабочего тока и допустимого износа ЭИ;

- проверяются межэлектродные зазоры и вносятся изменения в размеры инструмента, определяют время обработки.

Перспективным направлением комплексного изучения электроэрозионных процессов и механизма образования поверхностного слоя заготовки является системный синергетический подход [1], согласно которому процесс электроэрозионной обработки следует рассматривать как систему диссипативных процессов.

Большинство технологических процессов ЭЭО не может быть представлено в виде простых систем, поэтому для формализации процессов, происходящих в зоне обработки, применяют подход, основанный на синтезе компонент.

Главным принципом синтетического информационного моделирования является принцип «черного ящика», когда моделируется внешнее функционирование системы чисто информационно. В качестве «черного ящика» следует рассматривать совокупность диссипативных процессов, происходящих в зоне обработки, а на выходе – предполагаемые значения зависимых параметров ЭЭО – степень износа инструмента, зашлакованность, температура в зоне обработки и т.д.

Информационное моделирование применяется для создания модели управления, позволяющей сформировать технологическую среду и виртуально управлять ею, избегая влияния случайных факторов, присутствующих в практическом эксперименте. Для расчета вероятностных оценок вводят в модель специальные параметры «разрегулировки». Основной задачей информационного моделирования является обеспечение требуемых выходных значений параметров ЭЭО, а косвенной задачей - сведение к минимуму влияния случайных факторов.

В литературе [2] приведены доказательства того, что для любого алгоритма существует реализующая его нейронная сеть (НС). НС позволяет моделировать нелинейные процессы, работать с зашумленными данными и адаптируется к любым внешним воздействиям.

Модель системы управления строится на основе полносвязных НС, потому что при одинаковом числе нейронов они имеют большее количество межнейронных связей, а это увеличивает информационную емкость сети. Полносвязная архитектура является наиболее универсальной, не требует экспериментов с вариациями схемы соединений для каждой задачи. В случае эмуляции сети на обычной ЭВМ полносвязные сети обладают серьезными преимуществами в скорости функционирования и простоте программной реализации без ущерба качеству обучаемости.

Возможность использования нейронных сетей для решения задач управления основывается на том, что НС, состоящая из двух слоев и имеющая в скрытом слое произвольное большое количество узлов, может аппроксимировать любую функцию действительных чисел

с заданной степенью точности. Поэтому для решения задач управления могут быть использованы НС даже с одним скрытым слоем.

НС адаптивного управления проектируются таким образом, что выходной сигнал управляемой модели соответствует выходному сигналу предварительно определенной модели, которая имеет требуемые характеристики. НС структурно имеет не менее двух входов, и один или несколько выходов. Выходной сигнал представляет собой взвешенную сумму входных, причем эта сумма зависит от величин и соотношений между входными сигналами. На вход системы подаются такие параметры: скважность q , сила тока I , напряжение U , которые в совокупности определяют форму импульса; расход и давление прокачки рабочей жидкости; частота релаксации и вибрации электродов; межэлектродные зазоры и размеры инструмента; время обработки. Выходными параметрами являются - съем металла V и получаемая высота микронеровностей Rz .

Такая система должна быть асимптотически устойчивой, то есть управляемая система отслеживает эталонную модель с нулевой ошибкой, переходные процессы на этапе адаптивного управления или обучающего управления имеют гарантированные пределы.

Обучение алгоритмом обратного распространения ошибки предполагает два прохода по всем слоям сети: прямого и обратного. При прямом проходе входной вектор подается на входной слой нейронной сети, после чего распространяется по сети от слоя к слою. В результате генерируется набор выходных сигналов, который и является фактической реакцией сети на данный входной образ. Во время прямого прохода все синаптические веса сети фиксированы. Во время обратного прохода все синаптические веса настраиваются в соответствии с правилом коррекции ошибок, а именно: фактический выход сети вычитается из желаемого, в результате чего формируется сигнал ошибки. Этот сигнал впоследствии распространяется по сети в направлении, обратном направлению синаптических связей. Синаптические веса настраиваются с целью максимального приближения выходного сигнала сети к желаемому.[3]

Наличие слоя матрицы коэффициентов позволяет нейросети провести взвешивание входных сигналов, используя одновременно множество путей передачи сигналов от входа к выходу, суммируя их по дороге со своими весами. В результате, каждому сочетанию всех входных сигналов, изменяющихся в некоторых заданных диапазонах, будет соответствовать свое значение выходного сигнала.

В настоящее время достаточно хорошо разработан и широко используется целый ряд разных архитектур построения нейросетевых систем управления. Выработка адекватного управляющего сигнала для управления динамикой состояний объекта управления осуществляется нейросетевым контроллером. Смена состояний происходит по оптимальной траектории, в качестве алгоритма обучения используется алгоритм обратного распространения ошибки, который является одним из методов обучения многослойных нейронных сетей прямого распространения, называемых также многослойными перцептронами. Этот итеративный градиентный алгоритм используется с целью минимизации ошибки работы многослойного перцептрона и получения желаемого выхода.[3]

К настоящему времени сформировался обширный рынок нейросетевых продуктов. Современный уровень развития микроэлектроники позволяет создавать нейрочипы, состоящие из очень большого числа простых элементов, способных выполнять только арифметические операции. Подавляющее большинство продуктов представлено в виде моделирующего программного обеспечения. Ведущие фирмы разрабатывают также и специализированные нейрочипы или нейроплаты в виде приставок к обычным ЭВМ (как правило, персональным ЭВМ линии IBM PC AT). При этом программы могут работать как без нейро-приставок, так и с ними.[3]

Аппаратные нейросистемы достаточно дороги и предназначены в основном для профессионального использования.

Для исследовательских целей возможно использовать оболочку NeuroShell 2.0. Достоинством этой программы является совместимость с популярным пакетом управления

данными Microsoft Excel, что делает продукт удобным для массового использования. Удобный проблемно-ориентированный на нейросети язык программирования nAPL, среда программирования на языке C++ и UNIX-совместимая операционная система позволяют создавать нейросетевые системы управления ЭЭО.

Основной прирост производительности обеспечивается за счет применения параллельного аналогового перемножения входных сигналов на весовые коэффициенты НПС. Максимальная производительность достигается при реализации НПС с прямым распространением сигналов - 2 млн. связей/с.

Сочетание концепций, методов и математического аппарата современной нелинейной теории управления с теорией обучаемых искусственных нейронных сетей открывает широкие возможности для структурного синтеза сложных динамических систем управления ЭЭО, позволяющих получить эффективное сочетание производительности и качественных параметров обрабатываемой поверхности.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сариллов М.Ю. Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта. автореф д.т.н., Комсомольск-на-Амуре, 2008. – 43 с.
2. Системный анализ и принятие решений: Словарь справочник. Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М., Высшая школа, 2004 616 с.
3. Терехов С.А. Черты современных архитектур http://alife.narod.ru/lectures/neural/Neu_index.htm

Овсяникова Ирина Васильевна

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК» г.Орел

Докторант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Tel: 8-920-812-16-26

E-mail: ovsyanikova2012@yandex.ru

Сычев Евгений Александрович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК» г.Орел

Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Тел: 8-920-812-57-15

E-mail: lastsea@mail.ru

Тарапанов Александр Сергеевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК» г.Орел

Доктор технических наук.

Профессор кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Тел:(4862)48-18-84

E-mail: tarapanov@yandex.ru

I.V. OVSJANIKOVA.,E.A.SYCHEV, A.S.TARAPANOV

ADAPTIVE MANAGEMENT INFORMATION MODELING ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

The issues of efficiency and quality of EDM through adaptive management. Are the basic parameters of the relationship and, on the basis of which a model of adaptive control of electrical discharge machining.

Keywords: efficiency, adaptive control, optimal, neural network.

BIBLIOGRAPHY

1. Sarilov M.Ju. Povyshenie jeffektivnosti jelektrojerozionnoj obrabotki i kachestva obrabotannoj poverhnosti na osnove podhodov iskusstvennogo intellekta. avtoref d.t.n., Komsomol'sk-na-Amure, 2008. – 43 s.
2. Sistemnyj analiz i prinjatje reshenij: Slovar' spravochnik. Pod red. V.N. Volkovoj, V.N. Kozlova. – M., Vysshaja shkola, 2004. - 616 s.
3. Terehov S.A. Cherty sovremennoj arhitektury http://alife.narod.ru/lectures/neural/Neu_index.htm

Ovsynikova Irina Vasil'evna

State University – ESPC

Ph.D. degree, chair «Mechanical engineering and design-engineering informatics», Orel

Tel: 8-920-812-16-26

E-mail: ovsynikova2012@yandex.ru

Sychev Evgeniy Alexandrovich

State University – ESPC

post-graduate student, chair «Mechanical engineering and design-engineering informatics», Orel

Tel: 8-920-812-57-15

E-mail: lastsea@mail.ru

Tarapanov Alexander Sergeevich

State University – ESPC

Doctor of technical sciences, professor chair «Mechanical engineering and design-engineering informatics», Orel

Tel: (4862)48-18-84

E-mail: tarapanov@yandex.ru

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 664.659

В.П. КОРЯЧКИН, Д.А. ГОНЧАРОВСКИЙ, Ю.В. ГОНЧАРОВ

МАШИНА ДЛЯ КОЭКСТРУДИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ С КОНИЧЕСКИМ РАССЕКATEЛЕМ ПОТОКА НАЧИНКИ

В статье описан процесс совершенствования формующего инструмента экструдера и влияния величины угла конического рассекателя потока на коэффициент давления. Описан усовершенствованный формующий инструмент экструдера с коническим рассекателем потока.

Ключевые слова: коэкструзия, формующий инструмент экструдера, канал для подачи начинки, конический рассекатель.

Развитие пищевой техники и технологии сделало возможным производить пищевые продукты малых предприятиях, которые занимают незначительную площадь по сравнению с хлебозаводами и кондитерскими фабриками. Одной из таких технологий производства пищевых продуктов является экструзия. Для осуществления процесса экструзии используются экструдеры различных типов: дисковые, поршневые, шнековые, валковые и др. [4]

Экструзия позволяет производить целый спектр пищевых продуктов высокой пищевой ценности: хлебцы, кукурузные палочки, палочки и подушечки с разнообразными начинками, мюсли и др. В коэкструзионном производстве широкое распространение получили жировые начинки с различными вкусо-ароматическими добавками [2].

Экструдированные готовые завтраки, в том числе с начинкой, пользуются устойчивым спросом у населения. При этом сам процесс экструдирования получает широкое распространение в пищевой промышленности. В процессе экструзии изделий с начинкой происходит заполнение начинкой полого экструдированного корпуса. Стабильность протекания процесса коэкструзии зависит от многих факторов: температуры, давления, рецептуры начинки и геометрии формующего инструмента экструдеров различной конструкции [2]. При нарушении технологических режимов работы формующего инструмента экструдированный корпус неравномерно заполняется начинкой по длине, что снижает качество готовой продукции.

В настоящее время большое внимание уделяется качеству продуктов питания, поступающих на реализацию потребителю. Повышение качества продуктов питания можно обеспечить путем совершенствования технологического процесса коэкструдирования и совершенствованием геометрии формующего инструмента экструдеров.

При производстве коэкструдированных пищевых продуктов одним из ключевых процессов является формирование из расплава сухой смеси сырья и начинки полуфабриката в виде пористого бесконечного жгута с начинкой.

Для образования пористого бесконечного жгута с начинкой расплав корпуса продукта и начинка продавливаются под высоким давлением через сквозные каналы формующего инструмента экструдера. В существующих формующих инструментах экструдеров конструкция канала для подачи начинки не учитывает реологические свойства жировых начинок, канал для ее подачи выполнен сквозным и реализует только осевую компоненту течения начинки.

Наличие только осевой компоненты скорости течения начинки приводит к неравномерному заполнению полого экструдированного корпуса изделия по длине, что снижает его качество.

Для устранения этого недостатка предлагается ввести в канал подачи начинки элемент, который обеспечит не только осевую, но и радиальную компоненту скорости течения начинки. Предположительно добавление радиальной компоненты скорости течения начинки позволит равномерно распределить начинку по длине полого экструдированного корпуса и повысить качество коэкструдированных изделий.

Совершенствование формующего инструмента необходимо проводить на научной основе, опираясь на экспериментальные исследования сдвигового течения объектов переработки в рабочих зонах формующего инструмента [1]. Нами было исследовано сдвиговое течение жировых начинок, состоящих из растительного масла, кулинарного жира, кукурузного крахмала, какао и сахарной пудры, в новом формующем инструменте экструдера [3].

Предлагаемая конструкция формующего инструмента [3] обеспечивает нанесение начинки на внутреннюю полость экструдированного корпуса с радиальным вектором нанесения начинки, что исключает указанный выше недостаток.

Для повышения эффективности нанесения начинки на внутреннюю поверхность полости корпуса изделия было предложено установить в канал для подачи начинки конический рассекатель потока начинки (рис. 1).

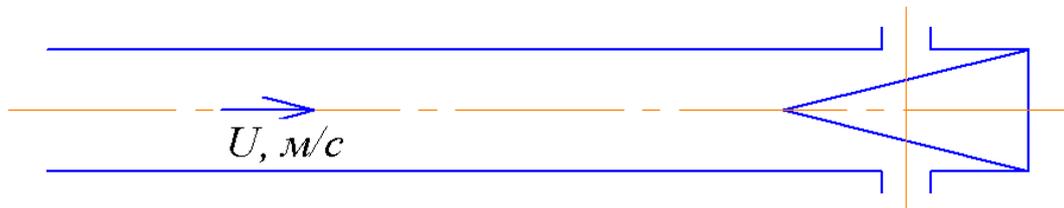


Рисунок 1 – Канал для подачи начинки формующего инструмента экструдера с коническим рассекателем

Из рисунка 1 видно место установки конического рассекателя в канале для подачи начинки модернизируемого экструдера.

Нами были проведены исследования сдвигового телескопического течения жировой начинки, содержащей экструзионный кукурузный крахмал. При этом капиллярную вискозиметрию начинки с экструзионным кукурузным крахмалом в количестве от 0 до 10% в общей массе всех крахмалов в начинке провели при температуре 23,8°С. Данные эксперименты проводились в цилиндрическом канале подачи начинки формующего инструмента экструдера длиной 80 мм, в который устанавливали сменные конические рассекатели потока начинки с различными углами при вершине конуса, в диапазоне изменения давлений от 39,2 до 274,2 кПа. Углы при вершине конуса изменялись от 11,5 до 41° (рис. 2).



Рисунок 2 – Сменные конические рассекатели потока

Установка сменных конических рассекателей повышает сопротивление канала подачи начинки.

В результате установки сменных конических рассекателей в круглом канале производительность канала снижалась по сравнению с производительностью сквозного канала (рис.

3) в зависимости от угла рассекателя в среднем в 2-3 раза из-за создания рассекателем дополнительного местного сопротивления течению начинки.

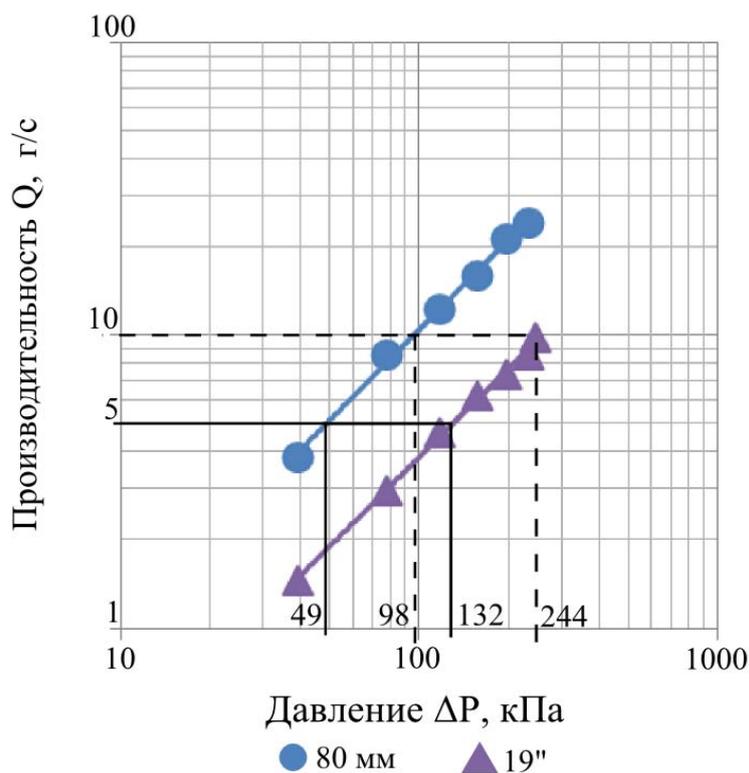


Рисунок 3 – Зависимость производительности сквозных каналов длиной 80 мм: свободного от конического рассекателя и с коническим рассекателем с углом при вершине 19° в логарифмических координатах

На рисунке 3 представлены графики производительности сквозного канала и канала с коническим рассекателем, имеющим угол при вершине 19°.

Влияние местных сопротивлений конических рассекателей потока начинки можно оценить по величине коэффициента давления k_p (рисунок 4), который показывает абсолютное увеличение давления при сохранении постоянной производительности канала:

$$k_p = \Delta P_{\Delta} \cdot \Delta P_{80}, \quad (1)$$

где ΔP_{Δ} – давление при течении начинки в канале с коническим рассекателем, Па;

ΔP_{80} – давление при течении начинки в сквозном канале длиной 80 мм, Па.

При увеличении длины конуса рассекателя начинки, что связано с уменьшением угла α при его вершине для постоянного диаметра основания конуса ($d=5$ мм) уменьшается зазор между конической поверхностью конуса и цилиндрической рабочей поверхностью канала для подачи начинки при увеличении длины конуса. При этом, как следствие, снижается противодействие начинки.

Из рисунка 4 видно, что графики можно разбить на два участка: первый участок от 11 до 19° и второй от 19 до 41°. На первом участке при уменьшении угла конуса при вершине конического рассекателя приводит к значительному увеличению давления. В результате происходит периодическое нарушение течения начинки в длинном тонком канале между конической и цилиндрической поверхностями, при этом канал периодически забивается, что на наш взгляд можно объяснить «расклиниванием» начинки в упомянутом зазоре. А на втором участке происходит устойчивое течение начинки при уменьшенном давлении относительно первого участка, которое является практически постоянным.

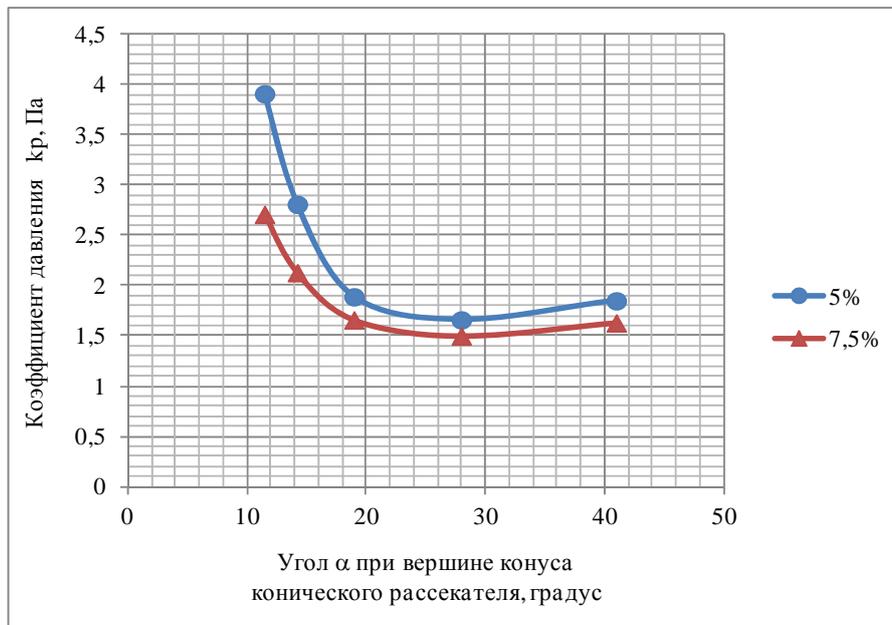


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента давления k_p от угла α при вершине конуса конического рассекателя и при содержании экструзионного кукурузного крахмала в начинке $S=5$ и $7,5\%$

Постоянная величина давления подачи начинки на втором участке, по всей видимости, обеспечивает устойчивую радиальную компоненту начинки на внутренний полый корпус экструдата.

Устойчивая величина значений k_p на втором участке позволяет рекомендовать рассекатели начинки с углом при вершине конуса в диапазоне значений $\alpha=20...35^\circ$ для проектирования каналов подачи начинки в полый корпус коэкструдированного изделия.

На основе проведенных исследований был разработан формующий инструмент экструдера [3] с коническим рассекателем потока начинки.

На основании теоретических и экспериментальных исследований сдвигового течения начинки и корпуса готовых завтраков [1] был усовершенствован формующий инструмент экструдера для производства хрустящих палочек с начинкой.

Усовершенствованный формующий инструмент [3] может быть использован для производства экструзионных продуктов питания в виде готовых завтраков, например, для производства экструдированных палочек с начинкой, а также других отраслях промышленности применяющих экструзию.

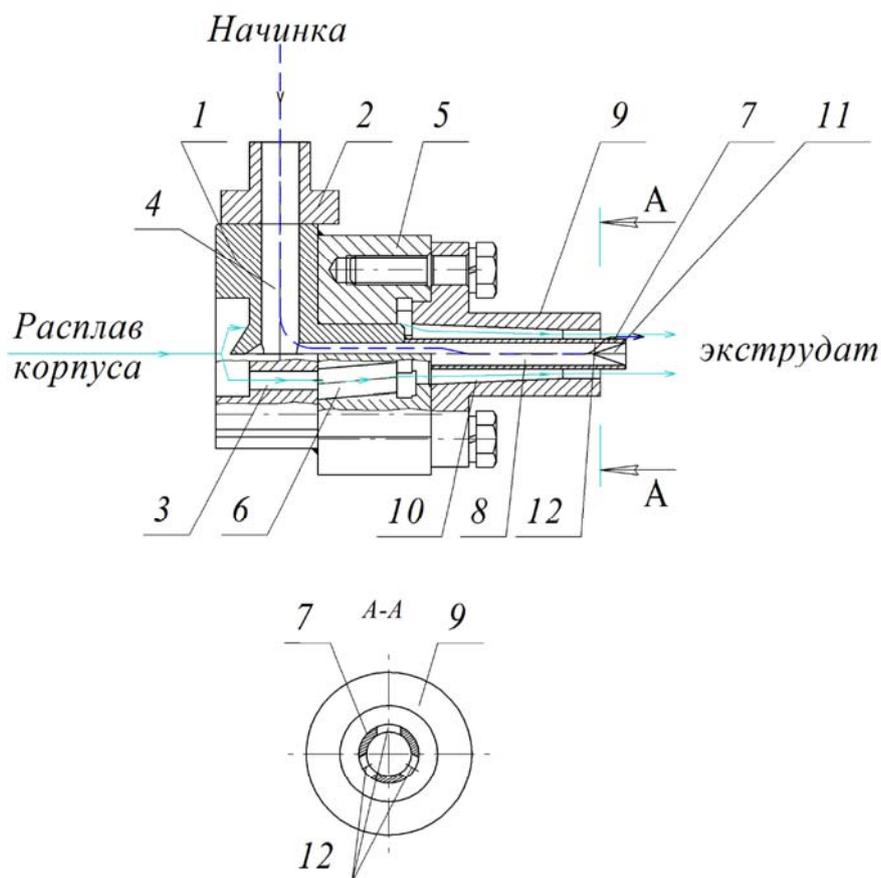
Формующий инструмент применяется в различных экструдерах, у которых могут быть шнековые, шнековые с зацепляющимися витками, шестеренные, валковые, дисковые, поршневые нагнетатели [4]. Формующий инструмент для совместной экструзии корпуса и начинки экструзионных готовых завтраков имеет скрытые резервы конструкции, которые ограничивают устойчивый выпуск высококачественного готового продукта. Известные конструкции формующего инструмента не всегда обеспечивают выпуск готовых изделий с товарным видом из-за неравномерного распределения начинки по внутренней поверхности полых экструдированных корпусов изделий.

На рисунке 5 представлена схема усовершенствованной конструкции формующего инструмента экструдера [3]. Усовершенствованный формующий инструмент экструдера состоит из фланца 1 со штуцером 2, плиты 5, втулки 9 и трубы для подачи начинки 8. При модернизации формующего инструмента экструдера материалопровод для подачи начинки, был снабжен коническим рассекателем начинки 11 с полным перекрытием ее живого сечения. При этом на боковой стенке трубы были выполнены три радиальных отверстия 12. Их расположение подобрано таким образом, чтобы конический рассекатель был полностью виден в эти отверстия, а центры диаметров самих отверстий расположены в плоскости торцевого среза втулки 9. Площадь живого сечения этих отверстий подбирались как величина примерно равная 90...110 % от площади живого сечения трубы. Конический рассекатель пред-

ставляет собой конус с конусностью от 1:4 до 3:4. Материалопровод может выполняться с тремя, четырьмя, пятью или шестью радиальными отверстиями. Количество выбирается в зависимости от свойств дозируемой начинки [3].

Для получения палочек с начинкой расплав сырья для формирования корпуса палочек последовательно проходит сквозь каналы 3, 6, 10 фланца 1, плиты 5 и втулки 9, а начинка подается через штуцер 2 по каналам 4 и 8, фланца 1 и трубы 7 соответственно (рисунок 5). На выходе из канала 10 втулки 9 расплав сырья для корпуса под воздействием перепадов давления и температуры вспучивается, образуя кольцеобразный пористый жгут, в который через радиальные отверстия 12 подается начинка. Расположение центров диаметров отверстий 12, выполненных на цилиндрической поверхности трубы перед основанием конического рассекателя в плоскости торцевого среза втулки 9, обеспечивает подачу начинки в момент вспучивания корпуса готовых завтраков в перпендикулярных направлениях по отношению к вектору скорости ее течения в трубе. Подача начинки в таких направлениях обеспечивает равномерное ее распределение по всей внутренней поверхности полого корпуса изделий [3].

Предлагаемый формующий инструмент (рисунок 5) [3] был выполнен в металле и опробован на производстве палочек с начинкой. Применение усовершенствованного формующего инструмента позволило повысить качества палочек с начинкой, улучшить их товарный вид, поскольку усовершенствованный инструмент равномерно распределяет начинку по внутренней поверхности полых экструдруемых изделий.



- 1 - фланец, 2 - штуцер, 3, 6, 10 - каналы для подачи расплава корпуса,
 4, 8 - каналы для подачи начинки, 5 - плита, 7 - труба для начинки,
 9 - втулка, 11 - конический рассекатель начинки, 12 - радиальные отверстия

**Рисунок 5 - Усовершенствованная конструкция формующего инструмента экструдера
 (Патент РФ № 2381726)**

Также применение этого инструмента позволило расширить ассортимент изделий, повысить качество процесса формования из-за уменьшения длины рабочей части трубы для подачи начинки.

Предлагаемый формующий инструмент для формования палочек с начинкой позволяет [3]:

- Расширить область применения за счет универсализации механизма нанесения начинки на внутреннюю поверхность полого корпуса изделия, которая в момент нанесения начинки увеличивается.
- Улучшить качество готовых изделий за счет равномерного распределения начинки по внутренней поверхности экструдированного полого корпуса изделия.
- Повысить эксплуатационную надежность формующего инструмента.
- Расширить технологические возможности формующего инструмента по производству продукции широкого ассортимента.

С использованием усовершенствованного формующего инструмента экструдера с коническим рассекателем начинки была выработана опытная партия палочек «Шоколадных» с начинкой с добавлением 7,5% экструзионного кукурузного крахмала.

На основании проведенных исследований установили, что формующий инструмент экструдера с коническим рассекателем позволил реализовать скрытые резервы и решить техническую задачу повышения качества готовых изделий путем равномерного распределения начинки по внутренней поверхности экструдированных готовых завтраков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаровский, Д.А. Совершенствование формующего инструмента экструдеров для производства коэкструдированных изделий с начинкой [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Гончаровский. – Орел, 2012. – 20 с.
2. Остриков, А. Н. Коэкструзионные продукты: новые подходы и перспективы [Текст] / А. Н. Остриков, В. Н. Василенко, И. Ю. Соколов. – М.: ДеЛи принт, 2009. – 232 с.
3. Пат. № 2381726 Российская Федерация, МПК⁷ А 23 Р 1/12. Формующий инструмент экструдера [Текст] / Д. А. Гончаровский, В. П. Корячкин, Д. Н. Алексенко ; заявитель и патентообладатель ОрелГТУ. – № 2008143892/13 ; заявл. 05.11.2008 ; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5.
4. Термопластичная экструзия: научные основы, технология, оборудование [Текст] / под ред. А. Н. Богатырева, В. П. Юрьева. – М. : Ступень, 1994. – 200 с.

Корячкин Владимир Петрович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет учебно-научно-производственный комплекс»
доктор технических наук, зав. кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств»
Адрес: 302020, г. Орел, ул. Академическая, д.1
телефон (4862)474917
e-mail: mapp-unpk@mail.ru

Гончаровский Дмитрий Александрович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет учебно-научно-производственный комплекс»
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»
Адрес: 302030, г. Орел, ул. Московская, д.65
телефон (4862)551187
e-mail: mapp-unpk@mail.ru

Гончаров Юрий Вениаминович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет учебно-научно-производственный комплекс»
кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»
Адрес: 302030, г. Орел, ул. Набережная Дубровинского, д. 94, кв. 56;
(4862)421663
e-mail: mapp-unpk@mail.ru

V.P. KORYACHKIN, D.A. GONCHAROVSKIY, Y.V. GONCHAROV

MACHINE FOR CO-EXTRUDING FOOD PRODUCTS WITH CONE SPLITTER OF STAFFING FLOW

This article describes how to improve the extruder forming tool and influence the angle of the conical flow divider on the pressure ratio. Described an improved extrusion molding tool with a conical flow divider.

Keywords: *coextrusion, extrusion-former tool, the channel for supplying the filling, cone splitter.*

BIBLIOGRAPHY

1. Goncharovskiy, D.A. Improving the extruder forming tool for co-extruded products with filling [text]: Author. dis. ... Candidate. tech. Science / D.A. Goncharovskiy. - Eagle, 2012. - 20 p.
2. Ostrikov, A.N. Co-extrusion products: new approaches and perspectives [Text] / A.N. Ostrikov, V. Vasilenko, I. Yu Sokolov. - Moscow: DeLee print, 2009. - 232 p.
3. Pat. № 2381726 Russian Federation MPK7 A 23 P 1/12. Extruder forming tool I [Text] / D.A. Goncharovskiy, V.P. Koryachkin, D.N. Aleksenko applicant and patentee OrelGTU. - № 2008143892/13; appl. 05/11/2008, publ. 20.02.2010, Bull. Number 5.
4. Thermoplastic Extrusion: scientific principles, technology, equipment, [Text] / ed. A.N Bogatyrev, V.P. Yuriev. - M.: Stage, 1994. - 200 p.

Koryachkin Vladimir Petrovich

FGBOU State university teaching and scientific-industrial complex
Doctor of technical sciences, professor, Head. Department of "Machinery and equipment for food production "
Address: 302020, Oryol, st. Academic, 1,
phone (4862) 474 917
e-mail: mapp-unpk@mail.ru

Goncharovskiy Dmitry Aleksandrovich

FGBOU State university teaching and scientific-industrial complex
Ph.D., a senior department of "Machinery and equipment for food production"
Address: 302030, Oryol, st. Moscow, 65
telephone (4862) 551 187
e-mail: mapp-unpk@mail.ru

Goncharov Yuri Veniaminovich

FGBOU Institution" State university teaching and scientific-industrial complex
Ph.D., Associate Professor of "Machinery and equipment for food production
Address: 302030, Oryol, st. Dubrovinskogo embankment, 94, Apt. 56,
phone (4862) 421 663;
e-mail: mapp-unpk@mail.ru.

УДК 687.054.3.24

УДК 631.0

А.А. ЧЕРЕПЕНЬКО, А.П. ЧЕРЕПЕНЬКО, А.И. ЖАВОРОНКОВ

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГЛАДИЛЬНОЙ ПОДУШКИ ПОСЛЕ ИЗГИБА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье представлено аналитическое описание, в виде математической модели, рабочих поверхностей гладильных подушек после изгиба в процессе эксплуатации. Полученное уравнение позволяет определять расчетным путем геометрические размеры изогнутой рабочей поверхности.

Ключевые слова: рабочие поверхности гладильных подушек.

При изготовлении одежды используется оборудование для влажно-тепловой обработки (ВТО), оснащенное гладильными подушками. Как показала практика рабочие поверхности верхней и нижней подушек под воздействием циклических, механических и тепловых нагрузок в процессе эксплуатации изменяют геометрические размеры (изгибаются), что приводит к значительной их неэквидистантности и ухудшению качества ВТО [1].

Для учета данного явления при проектировании и изготовлении рабочих поверхностей представляется актуальным аналитическое определение их геометрических размеров после изгиба.

Поскольку обе подушки идентичны и работают в одинаковых условиях, моделирование проводим одной подушки.

Так по заданным значениям вертикальных смещений в различных точках рабочей поверхности производим ее аналитическое описание. При этом рассмотрим прямоугольную систему координат, начало которой расположено в центре опорной плоскости рабочей поверхности (рис. 1).

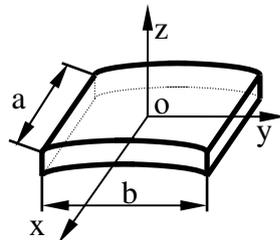


Рисунок 1 – Изогнутая рабочая поверхность гладильной подушки в прямоугольной системе координат.

Ось O_z направлена вертикально вверх, оси O_x и O_y направлены вдоль осей симметрии нижней части рабочей поверхности подушки. Тогда имеем следующую математическую задачу: в прямоугольной области D переменных x, y ,

$$D = \left\{ x, y : -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2} \right\}, z = -\frac{a}{2} + K \cdot h_x,$$

где $K = 0, 1, 2, \dots$ и h_x - шаг измерения по оси O_x .

Заданы значения функции $Z = f(x, y)$ на конечном множестве точек после изгиба

$$f(x_{\ell}, y_{1\ell}) = Z_{\ell, j}; y_{1\ell} = -\frac{b}{2} + \ell \cdot h_y, \text{ где } h_y - \text{ шаг изменения по оси } O_y,$$

$$\ell = 0, 1, \dots$$

Требуется построить кусочно-бикубический сплайн $g(x, y)$, удовлетворяющий условиям:

1) $g(x, y)$ имеет непрерывные частные производные до второго порядка включительно;

2) в каждом прямоугольнике $[x_k, x_{k+1}] \times [y_1, y_{1+1}]$ функция $g(x,y)$ является бикубическим многочленом вида

$$g(x, y) = g_{k,j}(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij}^{k,j} (x_k - x)^i \cdot (y_1 - y)^j ;$$

3) в точках (x_k, y_1) функция $g(x, y)$ принимает заданные значения

$$g(x_k, y_1) = f(x_k, y_1) = Z_{k,1} ;$$

4) функция $g(x, y)$ удовлетворяет условию

$$\left. \frac{\partial^2 g}{\partial v^2} \right|_{\Gamma} = 0,$$

где v - внешняя нормаль к границе Γ нашей прямоугольной области D .

Приступим к решению поставленной задачи. Решим вначале одномерные задачи кубической сплайн-интерполяции при $y = y_j$ ($j = 0, 1, 2, \dots, m$). Ищем функцию $S_j(x)$, удовлетворяющую условиям:

- 1) функция $S_j(x)$ имеет непрерывные производные до второго порядка включительно;
- 2) на каждом отрезке $[x_{k-1}, x_k]$ функция $S_j(x)$ является кубическим многочленом вида:

$$S_j(x) = \sum_{i=1}^3 a_i^k \cdot (x_k - x)^i ;$$

3) в точках $x_k, k = 0, 1, 2, \dots, n$ выполняются условия

$$S_j(x_k) = f(x_k, y_j) = Z_{k,j} ;$$

4) $S_j(x)$ удовлетворяет условиям:

$$S_j''\left(-\frac{a}{2}\right) = S_j''\left(\frac{a}{2}\right) = 0.$$

Решение этой задачи имеет вид [2]: на отрезке $[x_{k-1}, x_k]$ функция $S_j(x)$ определяется уравнением ($k=1, 2, \dots, n$):

$$S_j(x) = m_{k-1} \cdot \frac{(x_k - x)^3}{6h_k} + m_k \cdot \frac{(x - x_{k-1})^3}{6h_k} + \left(Z_{k-1,j} - \frac{m_{k-1}}{6} \cdot h_k^2 \right) \cdot \frac{x_k - x}{h_k} + \left(Z_{k,j} - \frac{m_k}{6} \cdot h_k^2 \right) \cdot \frac{x - x_{k-1}}{h_k} ; \quad (1)$$

$$h_k = x_k - x_{k-1}$$

Неизвестные величины $m_k = S_j''(x_k)$ определяются уравнениями:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{h_1 + h_2}{3} \cdot m_1 + \frac{h_2}{6} \cdot m_2 &= \frac{Z_{2,j} - Z_{1,j}}{h_2} - \frac{Z_{1,j} - Z_{0,j}}{h_1} = \varphi_{1,j} \\ \frac{h_i}{6} \cdot m_{i-1} + \frac{h_i + h_{i+1}}{3} \cdot m_i + \frac{h_{i+1}}{6} \cdot m_{i+1} &= \frac{Z_{i+1,j} - Z_{i,j}}{h_{i+1}} - \frac{Z_{i,j} - Z_{i-1,j}}{h_i} = \varphi_{i,j} \\ i &= 2, 3, \dots, n-2 \\ \frac{h_{n-1}}{6} \cdot m_{n-2} + \frac{h_{n-1} + h_n}{3} \cdot m_{n-1} &= \frac{Z_{n,j} - Z_{n-1,j}}{h_n} - \frac{Z_{n-1,j} - Z_{n-2,j}}{h_{n-1}} = \varphi_{n-1,j} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Система (2) решается методом прогонки [2]:

обозначим $a_k = \frac{h_k}{6}$; $b_k = \frac{h_k + h_{k+1}}{3}$; $c_k = \frac{h_{k+1}}{6}$; $k = 1, 2, \dots, n-1$.

Решение ищется в виде: $m_k = \beta_{k+1} \cdot m_{k+1} + Z_{k+1}$. Для коэффициентов β_{k+1} , Z_{k+1} получаются следующие уравнения:

$$\begin{cases} \beta_2 = -\frac{c_1}{b_1}; & Z_2 = \frac{\varphi_{1,j}}{b_1}; \\ \beta_{k+1} = -\frac{c_k}{(a_k \cdot \beta_k + b_k)}; & Z_{k+1} = \frac{(\varphi_{k,j} - a_k \cdot Z_k)}{(a_k \cdot \beta_k + b_k)} \\ k = 2, 3, \dots, n-2. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения (3) составляют прямой ход метода прогонки. Далее получается:

$$\begin{cases} m_{n-1} = \frac{(\varphi_{n-1,j} - a_{n-1} \cdot Z_{n-1})}{(a_{n-1} \cdot \beta_{n-1} + b_{n-1})} \\ m_k = \beta_{k+1} \cdot m_{k+1} + Z_{k+1}; & k = n-2, n-1, \dots, 1 \end{cases} \quad (4)$$

Уравнения (4) составляют обратный ход метода прогонки.

После нахождения коэффициентов m_k , $k = 1, 2, \dots, n-1$ сплайн $S_j(x)$ рассчитывается по формуле (1).

Решим теперь одномерные задачи сплайн-интерполяции при $x = x_i$ ($i = 0, 1, \dots, n$). Ищем функцию $n_i(y)$, удовлетворяющую условиям:

- 1) функция $n_i(y)$ имеет непрерывные частные производные до второго порядка включительно;
- 2) на каждом отрезке $[y_{i-1}, y_i]$ функция $n_i(y)$ является кубическим многочленом вида:

$$n_i(y) = \sum_{k=0}^3 b_k^1 \cdot (y_i - y)^k;$$

- 3) в точках y_l , $l = 0, 1, \dots, m$ выполняются условия:

$$n_i(y_l) = f(x_i, y_l) = Z_{i,l};$$

- 4) $n_i(y)$ удовлетворяет условиям:

$$n_i''\left(-\frac{b}{2}\right) = n_i''\left(\frac{b}{2}\right) = 0.$$

Решение этой задачи имеет вид [2]: на отрезке $[y_{j-1}, y_j]$ функция $n_i(y)$ определяется уравнением:

$$\begin{cases} (j = 1, 2, \dots, m) \\ n_i(y) = n_{j-1} \cdot \frac{(y_j - y)^3}{6\tau_j} + n_j \cdot \frac{(y - y_{j-1})^3}{6\tau_j} + \\ + \left(Z_{i,j-1} - \frac{n_{j-1}}{6} \cdot \tau_j^2 \right) \cdot \frac{y_j - y}{\tau_j} + \left(Z_{i,j} - \frac{n_j}{6} \cdot \tau_j^2 \right) \cdot \frac{y - y_{j-1}}{\tau_j} \end{cases} \quad (5)$$

$\tau_j = y_j - y_{j-1}$ - расстояние между точками y_j и y_{j-1} .

Неизвестные величины $n_j = n_i''(y_j)$ определяются уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\tau_1 + \tau_2}{3} \cdot n_1 + \frac{\tau_2}{6} \cdot n_2 = \frac{Z_{i,2} - Z_{i,1}}{\tau_2} - \frac{Z_{i,1} - Z_{i,0}}{\tau_1} = \psi_{i,1} \\ \frac{\tau_j}{6} \cdot n_{j-1} + \frac{\tau_j + \tau_{j+1}}{3} \cdot n_j + \frac{\tau_{j+1}}{6} \cdot n_{j+1} = \frac{Z_{i,j+1} - Z_{i,j}}{\tau_{j+1}} - \frac{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}}{\tau_j} = \psi_{i,j} \\ j = 2, 3, \dots, m-2 \\ \frac{\tau_{m-1}}{6} \cdot n_{m-2} + \frac{\tau_{m-1} + \tau_m}{3} \cdot n_{m-1} = \frac{Z_{i,m} - Z_{i,m-1}}{\tau_m} - \frac{Z_{i,m-1} - Z_{i,m-2}}{\tau_{m-1}} = \psi_{i,m-1} \end{array} \right. \quad (6)$$

Система (6) решается методом прогонки. Обозначим

$$\bar{a}_k = \frac{\tau_k}{6}; \quad \bar{b}_k = \frac{\tau_k + \tau_{k+1}}{3}; \quad \bar{c}_k = \frac{\tau_{k+1}}{6}; \quad k = 1, 2, \dots, m-1.$$

Решение ищется в виде:

$$n_k = \bar{\beta}_{k+1} \cdot n_{k+1} + \bar{Z}_{k+1}.$$

Для коэффициентов $\bar{\beta}_{k+1}$, \bar{Z}_{k+1} получаются уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\beta}_2 = -\frac{\bar{c}_1}{\bar{b}_1}; \quad \bar{Z}_2 = \frac{\psi_{i,1}}{\bar{b}_1}; \\ \bar{\beta}_{k+1} = -\frac{\bar{c}_k}{(\bar{a}_k \cdot \bar{\beta}_k + \bar{b}_k)}; \\ \bar{Z}_{k+1} = \frac{(\psi_{i,k} - \bar{a}_k \cdot \bar{Z}_k)}{(\bar{a}_k \cdot \bar{\beta}_k + \bar{b}_k)}; \\ k = 2, 3, \dots, m-2. \end{array} \right. \quad (7)$$

Уравнения (7) составляют прямой ход метода прогонки. Далее получается:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{m-1} = \frac{(\psi_{i,m-1} - \bar{a}_{m-1} \cdot \bar{Z}_{m-1})}{(\bar{a}_{m-1} \cdot \bar{\beta}_{m-1} + \bar{b}_{m-1})} \\ n_k = \bar{\beta}_{k+1} \cdot n_{k+1} + \bar{Z}_{k+1}; \quad k = m-2, m-1, \dots, 1. \end{array} \right. \quad (8)$$

Уравнения (8) составляют обратный ход метода факторизации. После нахождения коэффициентов n_k , $k=1, 2, \dots, m-1$ сплайн $n_i(y)$ рассчитывается по формуле (5).

Предположим теперь, что требуется определить значение $g(x, y)$ в некоторой точке (x, y) . Пусть $x_{i-1} \leq x \leq x_i$; $y_{j-1} \leq y \leq y_j$. Находим значение $g(x, y)$ в точках (x_{i-1}, y) , (x_i, y) по формуле (5):

$$g(x_{i-1}, y) = n_{i-1}(y) = N_{i-1,j-1} \cdot \frac{(y_j - y)^3}{6 \tau_j} + N_{i-1,j} \cdot \frac{(y - y_{j-1})^3}{6 \tau_j} +$$

$$+ \left(Z_{i-1,j-1} - \frac{N_{i-1,j-1} \cdot \tau_j^2}{6} \right) \cdot \frac{y_j - y}{\tau_j} + \left(Z_{i-1,j} - \frac{N_{i-1,j} \cdot \tau_j^2}{6} \right) \cdot \frac{y - y_{j-1}}{\tau_j} .$$

$$g(x_i, y) = n_i(y) = N_{i,j-1} \cdot \frac{(y_j - y)^3}{6 \tau_j} + N_{i,j} \cdot \frac{(y - y_{j-1})^3}{6 \tau_j} +$$

$$+ \left(Z_{i,j-1} - \frac{N_{i,j-1} \cdot \tau_j^2}{6} \right) \cdot \frac{y_j - y}{\tau_j} + \left(Z_{i,j} - \frac{N_{i,j} \cdot \tau_j^2}{6} \right) \cdot \frac{y - y_{j-1}}{\tau_j} .$$

Здесь N_{ij} - значение коэффициента n_j в формуле (5) при $x = x_i$, $N_{ij} = \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}(x_i, y_j)$.

Если будут известны значения $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}(x_{i-1}, y)$ и $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}(x_i, y)$ то по формулам, аналогичным (1), можно найти значение $g(x, y)$. Решим задачу сплайн-интерполяции при $x = x_i$, $i = 0, 1, \dots, n$ для функции $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}$, для которой известны значения $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}(x_i, y_j) = M_{ij}$, где $M_{i,j}$ - значение коэффициента m_i в формуле (1) при $y = y_j$. Обозначим $K_{i,j} = \frac{\partial^4 g}{\partial x^2 \partial y^2}(x_i, y_j)$. Величины K_{ij} находятся из уравнений (6-8) с заменой Z_{ij} на M_{ij} .

При этом $\left(g_{xx} = \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} \right)$.

$$g_{xx}(x_{i-1}, y) = K_{i-1,j-1} \cdot \frac{(y_j - y)^3}{6 \tau_j} + K_{i-1,j} \cdot \frac{(y - y_{j-1})^3}{6 \tau_j} +$$

$$+ \left(M_{i-1,j-1} - \frac{K_{i-1,j-1} \cdot \tau_j^2}{6} \right) \cdot \frac{y_j - y}{\tau_j} + \left(M_{i-1,j} - \frac{K_{i-1,j} \cdot \tau_j^2}{6} \right) \cdot \frac{y - y_{j-1}}{\tau_j} .$$

$$g_{xx}(x_i, y) = K_{i,j-1} \cdot \frac{(y_j - y)^3}{6 \tau_j} + K_{i,j} \cdot \frac{(y - y_{j-1})^3}{6 \tau_j} +$$

$$+ \left(M_{i,j-1} - \frac{K_{i,j-1} \cdot \tau_j^2}{6} \right) \cdot \frac{y_j - y}{\tau_j} + \left(M_{i,j} - \frac{K_{i,j} \cdot \tau_j^2}{6} \right) \cdot \frac{y - y_{j-1}}{\tau_j} .$$

Теперь, используя формулу (1), находим:

$$\left\{ \begin{aligned} g(x, y) = & g_{xx}(x_{i-1}, y) \cdot \frac{(x_i - x)^3}{6 h_i} + g_{xx}(x_i, y) \cdot \frac{(x - x_{i-1})^3}{6 h_i} + \\ & + \left(g(x_{i-1}, y) - \frac{g_{xx}(x_{i-1}, y) \cdot h_i^2}{6} \right) \cdot \frac{x_i - x}{h_i} + \\ & + \left(g(x_i, y) - \frac{g_{xx}(x_i, y) \cdot h_i^2}{6} \right) \cdot \frac{x - x_{i-1}}{h_i} . \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет вычислить значение сплайн-функции $g(x, y)$ в произвольной точке, построить сплайн-интерполяцию и таким образом, по геометрическим размерам получить математическую модель в виде уравнений описывающих изогнутую рабочую поверхность подушки [3].

На рисунке 2 представлена блок схема позволяющая рассчитывать на ЭВМ геометрические размеры рабочих поверхностей, после изгиба, всей номенклатуры плоских гладильных подушек.

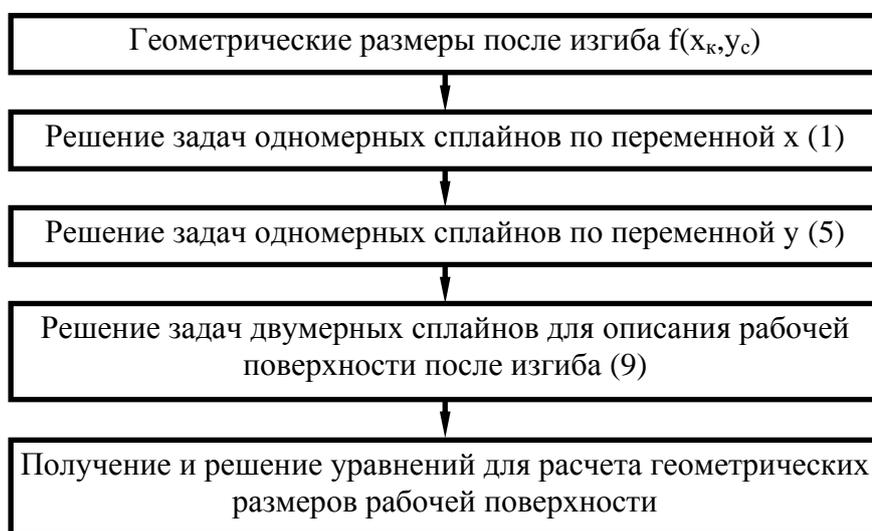


Рисунок 2 – Блок схема расчета геометрических размеров рабочей поверхности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черепенько, А.А. Теплофизические и физико-механические характеристики процесса изгиба рабочих поверхностей гладильных подушек / А.А. Черепенько, Ю.С. Степанов, А.П. Черепенько // Сборник рефератов НИР и ОКР/ВИНИТИ - М., 1997.-. № 3180-В97. - 24с.
2. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. - М.: Наука, 1989 - 608с.
3. Черепенько, А.А. Теоретические исследования процесса изменения геометрических размеров рабочих поверхностей гладильных подушек / А.А. Черепенько, Ю.С. Степанов, В.И. Малько, А.П. Черепенько // Сборник рефератов НИР и ОКР/ВИНИТИ - М., 1998.-. № 678-В98. - 21с.

Черепенько Аркадий Анатольевич

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК г. Орел
 Доктор технических наук, профессор кафедры ТМиКТИ
 E-mail: arkan-68@mail.ru

Черепенько Анатолий Павлович

ФГБОУ ВПО Орловский государственный университет г. Орел
 Доктор технических наук, профессор
 E-mail: arkan-68@mail.ru

Жаворонков Александр Иванович

ФГБОУ ВПО Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса г. Шахты, Ростовской области

Доктор технических наук, профессор

E-mail: arkan-68@mail.ru

A.A. CHEREPENKO, A.P. CHEREPENKO, A.I. ZHAVORONKOV

ANALYTICAL STUDY OF GEOMETRY SURFACE AIR AFTER IRONING BEND CONDITIONS

The article presents an analytical description, as a mathematical model, the working surfaces of ironing after the pillow during the bending operation. Semi-chennoe equation allows be calculated by the geometric dimensions of bent-out work surface.

Keywords: work surfaces ironing pads.

BIBLIOGRAPHY

1. Cherepen'ko, A.A. Teplofizicheskie i fiziko-mehanicheskie harakteristiki processa izgiba rabochih poverhnostej gladil'nyh podushek / A.A. Cherepen'ko, Ju.S. Stepanov, A.P. Cherepen'ko // Sbornik referatov NIR i OKR/VINITI - M., 1997.-. № 3180-V97. - 24s.

2. Marchuk, G.I. Metody vychislitel'noj matematiki / G.I. Marchuk. - M.: Nauka, 1989 - 608s.

3. Cherepen'ko, A.A. Teoreticheskie issledovanija processa izmenenija geometricheskikh razmerov rabochih poverhnostej gladil'nyh podushek / A.A. Cherepen'ko, Ju.S. Stepanov, V.I. Mal'ko, A.P. Cherepen'ko // Sbornik referatov NIR i OKR/VINITI - M., 1998.-. № 678-V98. - 21s.

Cherepenko Arkady Anatolevich

VPO State University - ESPC Orel

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of TMI KTI

E-mail: arkan-68@mail.ru

Cherepenko Anatoly Pavlovich

VPO Orel Orel State University

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: arkan-68@mail.ru

Zavoronkov alexander Ivanovich

VPO South-Russian State University of Economics and Service Shakhty, Rostov Region

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: arkan-68@mail.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 629.78

Е.В. ШАЛОБАЕВ, Р.-Т. ТОЛОЧКА

ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВРЕМЕННОЙ МЕХАТРОНИКИ

Проанализировано современное состояние базовых терминов в области мехатроники, которое зафиксировано в документах Международной федерации по ТММ (IFToMM). Указаны термины, которые введены в научный оборот: «мехатронизированный объект», «мехатронный класс», объединяющий «мехатронные» и «мехатронизированные» машины, «мехатронный комплекс». Дано понятие об «уровневом подходе» к мехатронике, который увязывает между собой собственно мехатронику, микросистемную технику и наноиндустрию. Показана связь между мехатроникой, робототехникой, кибернетикой, электромехатроникой. Даны замечания по использованию термина «мехатронный модуль». Поставлены вопросы о расширении понимания мехатроники до управления состоянием объекта, об установлении взаимосвязи мехатроники с «авионикой», «автоникой», о стандартизации базовых понятий и терминов.

***Ключевые слова:** мехатроника, мехатронные комплексы, орбитальная группировка, малые космические аппараты, мехатронизированные объекты, мехатронные модули и узлы.*

Введение

Мехатроника, как и всякая наука, развивается и со временем появляется необходимость вводить некоторые коррективы, учитывая развитие современной техники. В этом году исполняется 25 лет со дня издания на русском языке монографии японских ученых «Мехатроника» [1]. Вполне понятно, что за это время произошли серьезные изменения в области в определении взаимосвязи мехатроники с рядом смежных научно-технических направлений, в установлении базовой терминологии, в наполнении предложенных терминов реальным содержанием, в ведении в научный оборот новых терминов и понятий.

В своей книге [2], выдержавшей два издания, профессор Ю.В. Подураев высказал мнение, что «до сих пор мехатроника является уделом практиков», но «потребность в теоретическом инструментарии, который имеет эвристическую ценность и позволяет вести целенаправленный поиск новых мехатронных решений, сегодня весьма велика».

Таким образом, пришло понимание в необходимости и даже потребности теоретического инструментария, что вылилось в появление ряда работ, касающихся разных аспектов теоретических основ мехатроники [3-14]. Вместе с тем в вопросах терминологии необходимо четко определиться во взаимосвязи между мехатроникой и пограничными или смежными научно-техническими направлениями такими, как кибернетика, робототехника, микро- и наносистемная техника, существуют проблемы в определении взаимосвязи между мехатроникой и «авионикой», «автоникой», логистикой. С другой стороны введены в научный оборот и успешно используются в публикациях ряд терминов и понятий, которые необходимо зафиксировать в нормативной литературе по мехатронике. В данной статье авторами, членами технического комитета по стандартизации и терминологии IFToMM, делается попытка ответа на указанные вопросы.

Связь мехатроники с другими научно-техническими направлениями

В связи с вышеизложенным, покажем, как связана мехатроника с другими научно-техническими направлениями.

Взаимосвязь мехатроники и робототехники. «Колыбелью» мехатроники принято считать станкостроение [1,15], хотя с этим утверждением спорят специалисты из таких областей, как робототехника, ракетно-космическая отрасль.

Связь между мехатроникой и робототехникой стала проявляться в следующих фактах. В 1996 г. вышел первый сборник трудов «Робототехника и мехатроника» [16], который хотя и не стал периодическим, но заложил основу для выхода в начале 2000 г. всероссийского журнала «Мехатроника». В марте того же года междисциплинарная специальность «мехатроника» вошла наряду с уже ставшей классической специальностью «робототехника» в одно направление подготовки специалистов «Мехатроника и робототехника». Позднее официальную позицию о связи мехатроники и робототехники сформулировали патриарх отечественной робототехники, профессор Е.И. Юревич, и нынешний руководитель ЦНИИ РТК, член-корреспондент РАН В.А. Лопота в работах [17-19], которые указали, что мехатроника входит в родственное робототехнике научно-техническое направление и наиболее близка ей. При этом они согласились с точкой зрения автора работы [15], что робототехника определена по функциональному назначению, а мехатроника по физическому составу. Несмотря на такое начальное различие, ряд робототехнических систем можно отнести к полноценным мехатронным. С другой стороны мехатронные системы в наиболее развитом виде реализуют робототехническую «триаду» – «сенсоры-контроллеры-актюаторы» [17]. Из вышеизложенного следует, что многие принципы построения и методы проектирования мехатроники и робототехники имеют много общего. В первую очередь это относится к системному подходу при проектировании и блочно-модульному принципу построения.

Необходимо заметить, что в работе [9] высказывается мысль, что «робототехника – это всего лишь частное поднаправление мехатроники в комплексном ее понимании, включавшее ранее в свой состав преимущественно манипуляционные машины и агрегаты». В этой же работе указано, что робототехника породила мехатронику. Авторы данной публикации согласны с авторами работы [19], что корректнее считать мехатронику и робототехнику самостоятельными областями науки и техники, имеющими некоторую общую подобласть в виде робототехнических систем и их компонентов, использующих принципы и методы проектирования мехатроники, наработанные в этой области за четверть века.

Претензии на первородство представителей ракетно-космической отрасли подтверждаются тем, что еще в 1960-х годах академики РАН А.Ю. Ишлинский и Д.Е. Охочимский создали первые отечественные мехатронные системы инерциального управления баллистической ракетой и управление входом космической ракеты в плотные слои атмосферы [20].

Взаимосвязь мехатроники и кибернетики. В работе [3] дан вывод о том, что мехатроника сложилась как парадигма технической кибернетики. По своему характеру работа относится к фундаментальным работам, определяющим теоретическую базу мехатроники [6,7,10].

Аргументация авторов следующая. «Кибернетика – это типичная метанаука и, естественно при развитии из нее извлекаются «чистые» науки, которые продолжают жить самостоятельно. А сама «мета» в конечном итоге перестает существовать как наука». Именно данная особенность развития метанаук явилась ключевой метафорой генезиса мехатроники: период зарождения мехатроники – закат кибернетики и рассвет информатики. Среди определений мехатроники есть и такое – «наука о компьютерном управлении в технических системах». В этом контексте термин мехатроника эквивалентен современной, «компьютерной трактовке» ушедшего из научно-технического лексикона термина «техническая кибернетика», означающего управление в технических системах.

Непрерывная эволюция предмета технической кибернетики, обусловленная постепенным усложнением кибернетических систем, а также применением современных средств автоматизации и вычислительной техники, привела в конечном итоге к радикальному изменению ее содержания.

В начале 1980-х гг. техническая кибернетика претерпевает период компьютеризации, связанный с внедрением микропроцессорных технологий, и становится базой широкомаштабной автоматизации технических объектов и технологических процессов на базе встроенных мини- и микрокомпьютеров.

Принципиальной фундаментальной инновацией здесь является переход от механических и электрических к микроэлектронным вычислительным средствам обработки информации и управления на основе микропроцессоров и интегральных схем.

В связи с этим в технической кибернетике наметились два самостоятельных перспективных направления дальнейшего развития по пути разработки, создания и использования компьютерной техники: первое – для обработки информации (техническая информатика) и второе – для управления (мехатроника).

Кибернетика стала материнской наукой для информатики и прародительницей мехатроники. Мехатроника придала «второе дыхание» оказавшейся почти бездыханной кибернетике, обеспечив ее «второе пришествие».

В аннотации к первой монографии по мехатронике [1] прямо указано, что «она посвящена актуальной проблеме построения сложных автоматических систем», что по смыслу прямо совпадает с классическим определением кибернетики, данным академиком А.И. Бергом [21]: «Кибернетика – наука об управлении сложными динамическими системами».

К сожалению, в статье не приводятся работы, с авторами которых полемизируют авторы, где высказываются мнения, что мехатронике «еще предстоит сформироваться как самостоятельной науке, предстоит обрести обязательные атрибуты новой науки».

В работе [3] ее авторы утверждают, что мехатроника уже 20 лет назад приобрела статус самостоятельной фундаментальной технической науки, основанием могут быть работы [2-20].

Мехатроника естественно отражает целостное восприятие информационных, вычислительных и управляющих процессов, выраженное известным шведским специалистом в области компьютерного управления техническими системами К. Острёмом следующей афористичной формулой [22]: «Communication + Computation + Control = C 3».

В подтверждении своей идеи авторы приводят такой факт – еще в 1954 г. Н. Винер дал удивительно точный прогноз именно мехатронной парадигмы развития технической кибернетики, подчеркивая, что ЭВМ будут активно использоваться для непосредственного управления исполнительными механизмами.

Взаимосвязь мехатроники с микро- и наносистемной техникой.

Возникла насущная потребность остановиться на процессе признания уровневого характера мехатроники в целом. Уровневый подход заключается в том, что есть уровни макро-, микро- и нано- [8,15], определенные масштабом рассматриваемых объектов. И если границу между макро- и микромиром представить достаточно просто – она определяется возможностями человеческого зрения, то граница между микро- и наномиром не так однозначна. Существует много мнений, которые можно свести в две группы. Первая – дается численное значение такой границы, наиболее часто встречается цифра равная 100 нм. Авторы разделяют мнение о том, что граница микро- и наномира определяется качественно – при нарушении «сплошности» материала, то есть при переходе к рассмотрению групп молекул, отдельных молекул и атомов. При этом надо помнить, что некоторые молекулы (особенно органические) могут достигать размера до долей мм и даже доходить до единиц мм.

Один из авторов данной публикации уже в начале 2000-х годов в работах [8,15,23] обратил внимание на то, что мехатроника к тому времени уже имела два уровня – «макро-» и «микро-». К первому уровню относились собственно объекты мехатроники, такие как станочные приводы, бытовая и офисная техника. Ко второму уровню – объекты микросистемной техники, в частности МЭМС, МОЭМС и т.п. Таким образом, в работах [8,15,23] были заложены основы уровневого подхода, который был расширен и узаконен в международном трансляторе по ТММ [24] (разрабатывался в 2002 году [25,26]), где закреплены понятия «мехатроника», «микромехатроника» («подобласть мехатроники, относящаяся к устройствам и системам с размерами в несколько миллиметров и меньше», т.е. синоним для термина «микросистемная техника») и «наномехатроника» («подобласть мехатроники, относящаяся к устройствам и системам с размерами соизмеримыми с молекулами», синоним для термина «наносистемная техника»).

Такой подход нашел положительный отклик у ряда отечественных ученых, которые стали использовать термины «микромехатроника» и «наномехатроника», например, в работах [5,27].

Кстати, уровневый подход вводится не только в мехатронике, но и в других научно-технических направлениях, например в трибологии [28-31], где появились такие термины,

как микро- и нанотрибология. В зависимости от масштаба, на котором изучается трение, в современной трибологии принято выделять три раздела: макротрибологию (или просто трибологию), микротрибологию и нанотрибологию. Макротрибология имеет дело с большими объектами и не рассматривает особенностей строения вещества. С другой стороны, нанотрибология в соответствии со своей предметной областью, имеет дело с взаимодействием отдельных атомов и молекул или их групп. Микротрибология является переходным разделом трибологии и занимается исследованием реальных, но элементарных контактов, например в МЭМС [32]. Как правило, подразумевается, что небольшой выступ взаимодействует с некоторой поверхностью.

Введение в научный оборот новых терминов в мехатронике

Необходимо коснуться ряда основополагающих вопросов терминологии в мехатронике, которые в той или иной мере отражались в работах [1-19, 23-27].

Наполнение термина «мехатронные комплексы» реальным содержанием. В работах одного из авторов данной публикации [33,34] и в ряде других работ [35-37] использовался термин «мехатронные комплексы», в первой работе речь шла чисто теоретически о наличии такого перспективного уровня мехатронных объектов (имелась в виду мехатронная распределенная система с отсутствием единого корпуса или оболочки), а в остальных работах – название применено без определения такого термина.

К настоящему времени развитие космической техники, а так же миниатюризация объектов привели к реализации идеи орбитальных группировок космических аппаратов (КА). Появилась возможность нового подхода к проведению космических полетов и исследований. В частности, реализуется идея создания нового класса космических систем, возникающих вследствие снижения массы КА как системообразующего элемента этих систем.

Упомянутые выше КС представляют собой орбитальные группировки малых космических аппаратов (ОГ МКА), объединенных одной целевой задачей и выполняющих совместный полет на небольшом удалении друг от друга (от десятков метров до десятков километров), взаимное положение и движение которых контролируется и управляется [39,40].

В ОГ МКА реализован принцип декомпозиции для получения качественного эффекта, который заключается в снижении общей массы. Необходимо отметить, что прямое, уменьшающее габариты масштабирование [40,41] лишь увеличивает трудоемкость изготовления, например, малогабаритных приводов или реактивных двигателей, при очевидном снижении лишь затрат на материалы. Однако, применяя современные достижения в микроэлектронике, нанотехнологии, материаловедении и нетрадиционные подходы к конструированию, например, мехатронные, удастся создать качественно новые спутники, значительно отличающиеся по массе и размерам в меньшую сторону от традиционных аппаратов [15,42,43].

Отличительной особенностью ОГ из СМКА является большое число аппаратов в ее составе, структура ОГ может быть сложной. Например, главная ОГ может состоять из нескольких подчиненных ОГ, выполняющих частные подзадачи и содержащих КА разного типа и назначения.

Иначе говоря, на каждой МКА, входящей в орбитальную группировку, может быть размещена полностью или частично сенсорная, управляющая и исполнительная, а так же энергетическая подсистемы общей КС. Такая ОГ МКА или просто КС представляет собой высший уровень мехатронных объектов – мехатронный комплекс (т.е. распределенную мехатронную систему) [16,31].

И естественно, что при таком подходе к созданию КС кардинально меняются подходы к созданию систем управления, к созданию самих КА, к целевому применению КС в целом. Подробности такого подхода изложены в цикле работ [41-43].

Таким образом, снижение массы КА на порядки дало увеличение на порядки численности ОГ, что в свою очередь привело к появлению нового класса КС. Иначе говоря, реализован закон перехода количества в качество, тривиальный закон диалектики. Миниатюризация в этом случае средство в арсенале разработчиков новых КС.

Такое направление использования малых спутников особенно важно для России, ибо космическая отрасль, будучи областью приложения высоких технологий из многих отраслей

науки и техники, может и должна служить одним из локомотивов инновационного развития России.

Таким образом, современная космическая техника выходит на первое место в плане наполнения реальным содержанием термина «мехатронные комплексы» [14], который можно найти и в других отраслях промышленности, например, в измерительной технике (системы климат-контроля [44]), в медицинской технике (сканирующие лазерные терапевтические установки [45]), в станкостроении (непоточные технологические линии [36]), в авиационной технике (беспилотные летательные аппараты с пультами управления [39]).

Внедрение в научный оборот термина «мехатронизированный объект». Термин «мехатронизированный» объект или система, введенный в научный оборот в отечественную техническую литературу в работах [8,33,34], за последние годы так прочно вошел в фундаментальные понятия мехатроники, что используется как общепризнанный в следующих работах [2,36,46-52]. Рассматриваемый термин «мехатронизированный объект», позволяет применять мехатронные методы, принципы и подходы к объектам не полностью отвечающим канонам мехатроники. В связи с указанным термином появилось предложение о создании класса мехатронных машин [48-51], включающих в себя и мехатронизированные, вопрос требует фиксации в документах типа MMS-Terms-2003 [24].

Коррекция использования термина «мехатронный модуль». Широкое использование термина «мехатронный модуль», например в работе [52], не совсем корректно без основательного обоснования. Дело в том, что *модуль* согласно определению – унифицированный узел [33,34], а мехатронный объект в настоящее время предполагает эксклюзивный, креативный характер. Поэтому логичнее использовать термин – «мехатронный узел». Из вышеизложенного логично вытекает, что для мехатронных объектов одним из характерных признаков является отсутствие ремонтпригодности, а долговечность носит ресурсный характер [53]. При этом для производства мехатронных объектов используют следующие типы производств: непоточное [36], индивидуальное или мелкосерийное [14].

Взаимосвязь мехатроники с авионикой, автотоникой, логистикой.

В связи с широким внедрением мехатронных технологий в авиа- и автомобилестроении необходимо более четко установить взаимосвязь мехатроники с авионикой [14,34,39,55] и автотоникой [4,14,55,56].

Термин «авионика» появился на Западе в начале 1970-х, когда электронная техника достигла такого уровня развития, что стало возможно применять электронные устройства в бортовых авиационных системах, и за счет этого существенно улучшать качественные показатели применения авиации. В том числе, в этот период времени появились первые бортовые электронные вычислители (компьютеры), а также принципиально новые автоматизированные и автоматические системы управления и контроля [34]. В работе [54] авионика трактуется как приборная часть летательного аппарата.

Широкое внедрение электроники привело к возникновению такой области техники как автомобильная электроника. В иностранной литературе в качестве синонима автомобильной электроники используются также термины «мехатроника» и «электроника» или «автотоника» (объединение слов «автомобильная электроника»). Понятие «автомобильная электроника» широко распространено в современной технической литературе [55,56], но его общепринятое определение отсутствует.

Авторы предлагают трактовать эти понятия как мехатронику в авиационной и автомобильной технике.

О соотношении мехатроники и электромеханотроники. В начале 1986 г. в научный оборот профессором Ю.П. Коськиным введено понятие «электромеханотроника» [57]. Необходимо подчеркнуть, что довольно-таки быстро рассматриваемое понятие в той или иной мере было стандартизировано. Так в ГОСТ Р 50369-92 «Электродвигатели. Термины и определения» дано следующее его толкование:

«Электропривод с электромеханотронным преобразователем – электропривод, содержащий устройство, объединяющее электромеханический преобразователь с обеспечивающими его функционирование электронными компонентами управления, диагностики и защиты».

В работе [58] дается объяснение причин появления электромехатроники, которые заключаются в следующем. При соединении электромеханического преобразователя (ЭМП) с электронными компонентами (ЭК) возникают новые свойства (новое качество), что заставляет выделить эти устройства в самостоятельный класс электромехатронных преобразователей (ЭМТП), изучение, проектирование и производство которых и составляет предмет электромехатроники.

В современной энциклопедии по электротехнике [59] приведено следующее толкование рассматриваемого понятия.

Электромехатроника – это отрасль науки и техники, связанная с разработкой теории и технологии автоматических систем электромеханического преобразования энергии, создаваемых путем функционального и конструктивного объединения электромеханических преобразователей с электронными компонентами. Электромехатроника еще иначе именуется интеллектуальной электромеханикой [60].

В 2010 г. в работе [6] обосновывалось понятие «электромехатроника» как развитие мехатроники по признакам «приводные устройства», «кинематическая мультикоординатная комбинаторика» и «интеллектуальное управление». В настоящее время специалисты, занимающиеся вопросами электромехатроники (электромехатроники), пришли к следующему выводу. По степени подчиненности или взаимозависимости такие науки как электромехатроника (ЭМТ), теория электропривода (ТЭП) и мехатроника (МТ) можно разместить в следующем порядке: ЭМТ → ТЭП → МТ.

Иначе говоря, указанный выше подход свидетельствует о том, что предметная область мехатроники может быть расширена за счет гидравлических и пневматических приводов.

К вопросу о термине «мехатрон». Среди терминов, которые вызывают определенное неприятие и являются спорными, следует назвать термин «мехатрон», предложенный в работе [9] для мехатронных объектов по аналогии с роботом в робототехнике. Дело в том, что мехатронами называли в 1940-1950 гг. и до сих пор называют электронные приборы по преобразованию механических величин (сил, давлений, вибраций, ускорений и т.п.) в электрические сигналы. В 1970-1990 гг. интерес к таким преобразователям вновь возрос, о чем свидетельствует работа [61]. Отсюда необходимо понимать, что подобный термин нарушит однозначность в его толковании.

Некоторые замечания. Резюмируя вышеизложенное необходимо констатировать, что рекомендации ИФТОММ еще не нашли должного применения в научных трудах.

Принципиально можно пойти по пути ряда европейских стран, в которых появились свои нормативные документы в области мехатроники, в частности и терминологии. Так во Франции недавно принят стандарт NF E 01-010, который дает следующее определение: «подход, направленный на синергетическую интеграцию механики, электроники, теории управления и информатики при проектировании и производстве объектов, в целях улучшения и/или оптимизирования их функциональности».

В России нет подобного нормативного документа, а есть лишь отраслевые, в частности ФГОС по направлению «Мехатроника и робототехника» (редакция 2009 г.).

Заключение

Из вышеизложенного следует, что:

- завершается процесс создания базовой терминологии в области мехатроники (о чем свидетельствуют работы [2-14,21-26,28,29,31-36,43,44,65-73];
- установлена взаимосвязь мехатроники с робототехникой и кибернетикой [4,10,17,19,20,22,23];
- успешно идет процесс признания уровневого характера мехатроники (т.е. взаимосвязи мехатроники с микро- и наносистемной техникой) [6,9,17,28,31];
- наполняется реальным содержанием термин «мехатронные комплексы» [16];
- получил признание введенный в научный оборот термин «мехатронизированный объект» [17,31], позволяющий применять мехатронные методы, принципы и подходы проектирования к объектам, не полностью отвечающим канонам мехатроники [2,65-72].

Перечислим тезисно ряд положений, которые нуждаются в уточнении для более успешного развития мехатроники:

- необходимо расширить понимание мехатроники от компьютерного управления движением до управления физическим состоянием объекта [4,6,28,29,44];
- добиться того, чтобы все определения отвечали основным критериям научных-технических терминов (однозначность, точность, четкость, краткость) [3,4];
- сформировать отношение к введенному в научный оборот термину «мехатронный класс», включающему в себя мехатронные и мехатронизированные объекты [66-69];
- необходимо популяризировать применение рекомендаций ИFToMM по применению терминов в области мехатроники [15,31];
- требуется обсудить необходимость создания ГОСТ Р для базовых положений и терминологии в области мехатроники.

Авторы рассматривают данную публикацию в качестве апробации своих предложений, которые выносятся на рассмотрении 25-й рабочей сессии комиссии по стандартизации и терминологии ИFToMM, которое планируется провести на базе НИУ ИТМО в июне 2014 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исии, Т. Мехатроника / Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ / Пер. с яп. С.Л. Масленникова; под ред. В.В. Василькова. – М.: Мир. – 1988. – 318 с.
2. Подураев, Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учебное пособие для вузов. Ю.В. Подураев – 2-е изд. – М.: Машиностроение. – 2007. – 256 с.
3. Теряев, Е.Д. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики / Е.Д. Теряев, Н.Б. Филимонов, К.В. Петрин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 6. – С. 2-10.
4. Алексеев, О.П. Телематика, мехатроника и синергетика на автомобильном транспорте / О.П. Алексеев, В.О. Алексеев, Е.П. Логачов, А.И. Туренко // Автомобильный транспорт (Харьковский национальный автомобильный университет). – 2009. – № 25. – С. 266-269.
5. Теряев, Е.Д. Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы / Е.Д. Теряев, Н.Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 1. – С. 2-14.
6. Осипов, Ю.М. К вопросу о развитии понятия «мехатроника» / Ю.М. Осипов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21). – Ч. 2. – С. 193-198.
7. Кориков, А.М. О развитии понятия «мехатроника» / А.М. Кориков // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21). – Ч. 2. – С. 199-202.
8. Shalobaev, E.V. Mechatronics: Today Problems and Development trends of Terminology / E.V. Shalobaev // Proceeding 23rd Working Meeting of the IFToMM Permanent Commission for Standardization of Terminology on MMS Minsk-Gomel. – Belarus, June 21-26, 2010. – P. 111-118.
9. Кононыхин, Б.Д. Терминологические аспекты современной робототехники и мехатроники / Б.Д. Кононыхин, В.И. Кулешов, Ю.В. Сауленко // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 10. – С. 58-60.
10. Кориков, А.М. Еще раз о мехатронике как науке / А.М. Кориков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 5. – С. 2-8.
11. Сергеев, С.Ф. Мехатроника как конвергентная научно-практическая дисциплина / С.Ф. Сергеев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 1. – С. 2-6.
12. Шалобаев, Е.В. К вопросу о терминологии в области мехатроники / Е.В. Шалобаев, Т.-Р.А. Толочка // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 5 (87). – С. 148-151.
13. Шалобаев, Е.В. О рекомендациях ИFToMM по терминологии в области мехатроники / Е.В. Шалобаев, Т.-Р.А. Толочка // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 2. – С. 2-5.
14. Шалобаев, Е.В. Вопросы терминологии и миниатюризации космических аппаратов / Е.В. Шалобаев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №10. – С. 60-66.
15. Шалобаев, Е.В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней / Е.В. Шалобаев // Микросистемная техника. – 2000. – № 4. – С. 5-9.
16. Робототехника и мехатроника // Сборник трудов под ред. А.М. Потапова. – М.-СПб.: БГТУ. – 1996. – 235 с.
17. Юревич, Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2005. – 401 с.
18. Лопота, В.А. Экстремальная робототехника и мехатроника. Принципы и перспективы развития / В.А. Лопота, Е.И. Юревич // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 4. – С. 37-42.
19. Лапота, В.А. Закономерности развития мехатроники и робототехники / В.А. Лапота, Е.И. Юревич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – № 3. – С. 12-18.
20. Александров, В.В. Несколько слов о мехатронике / В.В. Александров // Мехатроника. – 2000. – № 1. – С. 4.
21. Кибернетика, мышление, жизнь; под ред. А.И. Берга, Б.В. Бирюкова, И.Б. Новика и др. – М.: Мысль. – 1964. – 511 с.

22. Острём, К. Введение в стохастическую теорию управления / К. Острём – М.: Мир. – 1973. – 324 с.
23. Шалобаев, Е.В. Теоретические и практические проблемы развития мехатроники / Е.В. Шалобаев // Сборник: Современные технологии / под ред. С.А. Козлова. – СПб.: ГИТМО (ТУ). – 2001. – С. 46-66.
24. Официальный сайт университета Делфт (Нидерланды). Международный транслятор по ТММ. Standardization of terminology for the mechanism and machine science, (MMS-Terms-2003). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iftomm.3me.tudelft.nl/1049/frames.html>, свободный.
25. Аршанский, М.М. Мехатроника: основы глоссария / М.М. Аршанский, Е.В. Шалобаев // Мехатроника. – 2001. – № 4. – С. 47-48.
26. Шалобаев, Е.В. К вопросу о международном трансляторе по мехатронике / Е.В. Шалобаев // Мехатроника. – 2002. – № 2. – С. 13-14.
27. Лопота, В.А. Мехатроника – основа интеллектуальной техники будущего / В.А. Лопота, Е.И. Юревич // Микросистемная техника. – 2003. – № 1. – С. 38.
28. Шалобаев, Е.В. Проблемы и тенденции развития терминологии в современных условиях / Е.В. Шалобаев // Датчики и системы. – 2004. – № 4. – С. 29-32.
29. Scherge Matthias Biological micro- and nanotribology: Nature's solutions. – Springer. – 2001.
30. Шилько, С.В. Особенности расчета сопряжений компонентов МЭМС / С.В. Шилько, В.Е. Старжинский, А.П. Бабин, М.В. Зернин, Е.В. Шалобаев // Микросистемная техника. – 2003. – № 6. – С. 16-20.
31. Шалобаев, Е.В. Микросистемная техника и тенденции развития современной трибологии / Е.В. Шалобаев // Микросистемная техника. – 2003. – № 9. – С. 26-27.
32. Шилько, С.В. Особенности расчета сопряжений компонентов МЭМС / С.В. Шилько, В.Е. Старжинский, А.П. Бабин, М.В. Зернин, Е.В. Шалобаев // Микросистемная техника. – 2003. – № 6. – С. 16-20.
33. Шалобаев, Е.В. К вопросу об определении мехатроники и иерархии мехатронных объектов / Е.В. Шалобаев // Датчики и системы. – 2001. – № 7. – С. 62-64.
34. Шалобаев, Е.В. Теоретические и практические проблемы развития авионики и мехатроники / Е.В. Шалобаев // В кн.: Проблемы интеллектуального управления в авионике. – СПб.: СПбГУ ИТМО. – 2005. – С. 12-43.
35. Шахнин, В.А. Адаптивный интерполятор для гибких мехатронных комплексов неразрушающего контроля / В.А. Шахнин // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – № 3. – С. 12-16.
36. Белоновская, И.Д. К вопросу выбора технологического оборудования непоточного производства / И.Д. Белоновская, К.Е. Цветкова, Ю.С. Осадчий // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – № 1(3). – С. 521-524.
37. Бобцов, А.А. Применение мехатронных комплексов в обучении, автоматизации и робототехнике / А.А. Бобцов, А.С. Боргуль, К.А. Зименко, А.А. Маргун // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2013. – № 2. – С. 22-30.
38. Фатеев, В.Ф. Концепция создания орбитальных группировок сверхмалых космических аппаратов в интересах информационного обеспечения северных территорий России / В.Ф. Фатеев // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – № 4. – С. 5-9.
39. Распопов, В.Я. Микросистемная авионика / В.Я. Распопов. – Тула: Гриф и К°. – 2010. – 248 с.
40. Овчинников, М.Ю. Малые мира сего / М.Ю. Овчинников // Компьютерра. – 2007. – № 15. – С. 37-43.
41. Трошин, Е.В. О проблеме классификации космических аппаратов, порожденной миниатюризацией / Е.В. Трошин // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – № 1. – С. 45-48.
42. Фатеев, В.Ф. Межуниверситетская программа развития технологий на основе малых и сверхмалых КА / В.Ф. Фатеев, В.С. Шутов, Г.В. Кремз // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – № 4. – С. 15-17.
43. Ардашов, А.А. Основные тенденции в конструировании МКА / А.А. Ардашов // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – № 4. – С. 9-15.
44. Петров, С.Ю. Универсальные регистрирующие и показывающие приборы как элемент иерархии мехатронных объектов / С.Ю. Петров, Е.В. Шалобаев // Мехатроника. – 2001. – № 5. – С. 29-34.
45. Шалобаев, Е.В. Сканирующие лазерные установки в медицине / Е.В. Шалобаев, Г.Н. Юркова, Ефименко В.Т., Ефименко А.В. // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). – Вып. 4. – 2001. – С. 147-150.
46. Подураев, Ю.В. Анализ и проектирование мехатронных систем на основе критерия функционально-структурной интеграции. Часть I / Ю.В. Подураев // Мехатроника. – 2002. – № 4. – С. 28-34.
47. Горбатов, П.А. Горные машины для подземной добычи угля / П.А. Горбатов, Г.В. Петрушкин, Н.М. Лысенко, С.В. Павленко, В.В. Косарев. – Донецк: ДонНТУ. – 2006. – 669 с.
48. Стадник, Н.И. Мехатроника в угольном машиностроении / Н.И. Стадник, А.В. Сергеев, В.П. Кондрахин // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 4. – С. 20-29.
49. Горбатов, П.А. Математическая и структурная модели для оптимального проектирования подсистем подвески и перемещения исполнительного органа проходческих комбайнов мехатронного класса / П.А. Горбатов, Н.М. Лысенко, Н.И. Подобедов // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 7. – С. 9-15.
50. Горбатов, П.А. Особенности параллельного проектирования горных выемочных машин новых поколений как энергетических систем мехатронного класса / П.А. Горбатов // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 10. – С. 39-42.
51. Краснов, С.В. Интеллектуальное управление в мехатронных системах / С.В. Краснов, Д.А. Гурьянов, С.С. Краснов // Вестник Волжского ун-та им. В.В.Татищева. – 2011. – № 17. – С. 100-104.
52. Егоров, О.Д. Конструирование мехатронных модулей: учебник / О.Д. Егоров, Ю.В. Подураев. – М.: МГТУ Станкин. – 2004. – 360 с.

53. Козырев, Ю.Г. Промышленная роботизация, мехатроника и проблемы автоматизации сборочных операций / Ю.Г. Козырев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2006. – № 2. – С. 24-26.
54. Авионика России: Энциклопедический справочник; под общ. ред. С.Д. Бодрунова. – СПб.: НААП. – 1999. – 780 с.
55. Сига, Х. Автомобильная электроника / Х. Сига, С.Мидзутани. – М.: Мир. – 1989. – 227 с.
56. Алексієв О.П., Алексієв В.О., Богаєвські О.Б. Електронний варіант термінологічного словника. Атомобільна мехатроніка (укр.). – Харків: ХНАДУ. – 2011. – 39 с.
57. Коськин, Ю.П. Оптимизация динамических характеристик электрических машин / Ю.П. Коськин // Известия ЛЭТИ. – 1986. – Вып. 373. – С. 3-8.
58. Коськин, Ю.П. Электромехатроника. Основные особенности и современное состояние / Ю.П. Коськин, А.Г. Микеров // Робототехника и мехатроника. Сб. трудов под ред. А.М. Потапова. – М.-СПб.: БГТУ. – 1996. – С. 125-133.
59. Электротехническая энциклопедия в 4-х тт.; гл. ред. А.Ф. Дьяков. – М.: изд-во МЭИ. – 2010. – Т. 4. – 261 с.
60. Сайт Электромехатроника Википедия. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>
61. Карпенко Г.Н., Берлин Г.С., Барсуков И.И. Применение мехатронной техники в медико-биологических исследованиях; под ред. Ю.А. Аксельрода. – Саратов: СГУ. – 1991. – 184 с.

Шалобаев Евгений Васильевич

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург
Кандидат технических наук, профессор
Тел.: дом. (812) 592-02.94, моб. +7-921-988-00-86
E-mail: shalobaev47@mail.ru

Толочка Римантас-Гадас

Каунасский технологический университет, Литва, Каунас
Доктор технических наук, профессор
Тел.: (+370-37) 30-00-36
E-mail: tadas.tolocka@ktu.lt

E. V. SHALOBAEV, R.-T. TOLOCHKA

TERMINOLOGICAL ASPECTS MODERN MECHATRONICS

The paper analyzes the modern condition of the basic terms in the field of mechatronics, which documented the International Federation for MMS (IFTOMM). Are terms that are introduced into science «mechatronic class», «mechatronic complex». The notion of «tier approach» to mechatronics, which links between the mechatronics, microsystem technique and nanotechnologies. Shows the relationship between mechatronics, robotics, cybernetics, electromechatronics. Given the comments on the use of the term «mechatronic module». The questions of expansion of understanding of mechatronics to control the state of the object, about the establishment of the relationship mechatronics with «avionics», «avtonics» on standardization of basic concepts and terms.

Keywords: mechatronics, mechatronics complexes, the orbital group, small satellites, mechatronic modules and units.

BIBLIOGRAPHY

1. Isii, T. Mehatronika / T. Isii, I. Simojama, H. Inouje / Per. s jap. S.L. Maslennikova; pod red. V.V. Vasil'kova. – М.: Мир. – 1988. – 318 с.
2. Poduraev, Ju.V. Mehatronika: osnovy, metody, primenenie: uchebnoe posobie dlja vuzov. Ju.V. Poduraev – 2-e izd. – М.: Mashinostroenie. – 2007. – 256 с.
3. Terjaev, E.D. Mehatronika kak komp'juternaja paradigma razvitija tehničkoj kibernetiki / E.D. Terjaev, N.B. Filimonov, K.V. Petrin // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2009. – № 6. – С. 2-10.
4. Alekseev, O.P. Telematika, mehatronika i sinergetika na avtomobil'nom transporte / O.P. Alekseev, V.O. Alekseev, E.P. Logachov, A.I. Turenko // Avtomobil'nyj transport (Har'kovskij nacio-nal'nyj avto-dorozhnyj universitet). – 2009. – № 25. – С. 266-269.
5. Terjaev, E.D. Nanomehatronika: sostojanie, problemy, perspektivy / E.D. Terjaev, N.B. Filimonov // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2010. – № 1. – С. 2-14.
6. Osipov, Ju.M. K voprosu o razvitii ponjatija «mehatronika» / Ju.M. Osipov // Doklady TUSURa. – 2010. – № 1 (21). – Ch. 2. – С. 193-198.

7. Korikov, A.M. O razvitii ponjatija «mehatronika» / A.M. Korikov // Doklady TUSURa. – 2010. – № 1 (21). – Ch. 2. – S. 199-202.
8. Shalobaev, E.V. Mechatronics: Today Problems and Development trends of Terminology / E.V. Shalobaev // Proceeding 23rd Working Meeting of the IFToMM Permanent Commission for Standardization of Terminology on MMS Minsk-Gomel. – Belarus, June 21-26, 2010. – P. 111-118.
9. Kononyhin, B.D. Terminologicheskie aspekty sovremennoj robototekhniki i mehatroniki / B.D. Kononyhin, V.I. Kuleshov, Ju.V. Saulenko // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. – 2010. – № 10. – S. 58-60.
10. Korikov, A.M. Eshhe raz o mehatronike kak nauke / A.M. Korikov // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2011. – № 5. – S. 2-8.
11. Sergeev, S.F. Mehatronika kak konvergentnaja nauchno-prakticheskaja disciplina / S.F. Sergeev // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2012. – № 1. – S. 2-6.
12. Shalobaev, E.V. K voprosu o terminologii v oblasti mehatroniki / E.V. Shalobaev, T.-R.A. Tolochka // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. – 2012. – № 5 (87). – S. 148-151.
13. Shalobaev, E.V. O rekomendacijah IFToMM po terminologii v oblasti mehatroniki / E.V. Shalobaev, T.-R.A. Tolochka // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2013. – № 2. – S. 2-5.
14. Shalobaev, E.V. Voprosy terminologii i miniatjurizacii kosmicheskikh apparatov / E.V. Shalobaev // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2013. – № 10. – S. 60-66.
15. Shalobaev, E.V. Mikrosistemnaja tehnika i mehatronika: osobennosti sootnoshenija mikro- i makrourovnej / E.V. Shalobaev // Mikrosistemnaja tehnika. – 2000. – № 4. – S. 5-9.
16. Robototekhnika i mehatronika // Sbornik trudov pod red. A.M. Potapova. – M.-SPb.: BGTU. – 1996. – 235 s.
17. Jurevich, E.I. Osnovy robototekhniki / E.I. Jurevich. – 2-e izd. – SPb.: BHV-Peterburg. – 2005. – 401 s.
18. Lopota, V.A. Jekstremal'naja robototekhnika i mehatronika. Principy i perspektivy razvitija / V.A. Lopota, E.I. Jurevich // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2007. – № 4. – S. 37-42.
19. Lapota, V.A. Zakonomernosti razvitija mehatroniki i robototekhniki / V.A. Lapota, E.I. Jurevich // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. – 2008. – № 3. – S. 12-18.
20. Aleksandrov, V.V. Neskol'ko slov o mehatronike / V.V. Aleksandrov // Mehatronika. – 2000. – № 1. – S. 4.
21. Kibernetika, myshlenie, zhizn'; pod red. A.I. Berga, B.V. Birjukova, I.B. Novika i dr. – M.: Mysl'. – 1964. – 511 s.
22. Ostrjom, K. Vvedenie v stohasticheskiju teoriju upravlenija / K. Ostrjom – M.: Mir. – 1973. – 324 s.
23. Shalobaev, E.V. Teoreticheskie i prakticheskie problemy razvitija mehatroniki / E.V. Shalobaev // Sbornik: Sovremennye tehnologii / pod red. S.A. Kozlova. – SPb.: GITMO (TU). – 2001. – S. 46-66.
24. Oficial'nyj sajt universiteta Delft (Niderlandy). Mezhdunarodnyj transljator po TMM. Standardization of terminology for the mechanism and machine science, (MMS-Terms-2003). – [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.iftomm.3me.tudelft.nl/1049/frames.html>, svobodnyj.
25. Arshanskij, M.M. Mehatronika: osnovy glossarija / M.M. Arshanskij, E.V. Shalobaev // Mehatronika. – 2001. – № 4. – S. 47-48.
26. Shalobaev, E.V. K voprosu o mezhdunarodnom transljatore po mehatronike / E.V. Shalobaev // Mehatronika. – 2002. – № 2. – S. 13-14.
27. Lopota, V.A. Mehatronika – osnova intellektual'noj tehniki budushhego / V.A. Lopota, E.I. Jurevich // Mikrosistemnaja tehnika. – 2003. – № 1. – S. 38.
28. Shalobaev, E.V. Problemy i tendencii razvitija terminologii v sovremennyh uslovijah / E.V. Shalobaev // Datchiki i sistemy. – 2004. – № 4. – S. 29-32.
29. Scherge Matthias Biological micro- and nanotribology: Nature's solutions. – Springer. – 2001.
30. Shil'ko, S.V. Osobennosti rascheta soprjazhenij komponentov MJeMS / S.V. Shil'ko, V.E. Starzhin-skij, A.P. Babin, M.V. Zernin, E.V. Shalobaev // Mikrosistemnaja tehnika. – 2003. – № 6. – S. 16-20.
31. Shalobaev, E.V. Mikrosistemnaja tehnika i tendencii razvitija sovremennoj tribologii / E.V. Shalobaev // Mikrosistemnaja tehnika. – 2003. – № 9. – S. 26-27.
32. Shil'ko, S.V. Osobennosti rascheta soprjazhenij komponentov MJeMS / S.V. Shil'ko, V.E. Starzhin-skij, A.P. Babin, M.V. Zernin, E.V. Shalobaev // Mikrosistemnaja tehnika. – 2003. – № 6. – S. 16-20.
33. Shalobaev, E.V. K voprosu ob opredelenii mehatroniki i ierarhii mehatronnyh ob'ektov / E.V. Shalobaev // Datchiki i sistemy. – 2001. – № 7. – S. 62-64.
34. Shalobaev, E.V. Teoreticheskie i prakticheskie problemy razvitija avioniki i mehatroniki / E.V. Shalobaev // V kn.: Problemy intellektual'nogo upravlenija v avionike. – SPb.: SPbGU ITMO. – 2005. – S. 12-43.
35. Shahnin, V.A. Adaptivnyj interpoljator dlja gibkikh mehatronnyh kompleksov nerazrushajushhego kontrolja / V.A. Shahnin // Avtomatizacija i sovremennye tehnologii. – 2009. – № 3. – S. 12-16.
36. Belonovskaja, I.D. K voprosu vybora tehnologicheskogo oborudovanija nepotochnogo proizvodstva / I.D. Belonovskaja, K.E. Cvetkova, Ju.S. Osadchij // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2011. – № 1(3). – S. 521-524.
37. Bobcov, A.A. Primenenie mehatronnyh kompleksov v obuchenii, avtomatizacii i robototekhnike / A.A. Bobcov, A.S. Borgul', K.A. Zimenko, A.A. Margun // Distancionnoe i virtual'noe obuchenie. – 2013. – № 2. – S. 22-30.
38. Fateev, V.F. Konceptcija sozdanija orbital'nyh gruppirovok sverhmal'nyh kosmicheskikh apparatov v interesah informacionnogo obespechenija severnyh territorij Rossii / V.F. Fateev // Izvestija vuzov. Pribo-rostroenie. – 2004. – № 4. – S. 5-9.

39. Raspopov, V.Ja. Mikrosistemnaja avionika / V.Ja. Raspopov. – Tula: Grif i K°. – 2010. – 248 s.
40. Ovchinnikov, M.Ju. Malye mira sego / M.Ju. Ovchinnikov // Komp'juterra. – 2007. – № 15. – S. 37-43.
41. Troshin, E.V. O probleme klassifikacii kosmicheskikh apparatov, porozhdennoj miniatjurizacii / E.V. Troshin // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. – 2005. – № 1. – S. 45-48.
42. Fateev, V.F. Mezhniversitetskaja programma razvitija tehnologij na osnove malyh i sverhmalyh KA / V.F. Fateev, V.S. Shutov, G.V. Kremz // Izvestija vuzov. Priborostroenie. – 2004. – № 4. – S. 15-17.
43. Ardashov, A.A. Osnovnye tendencii v konstruirovanii MKA / A.A. Ardashov // Izvestija vuzov. Priborostroenie. – 2004. – № 4. – S. 9-15.
44. Petrov, S.Ju. Universal'nye registrirujushhie i pokazyvajushhie pribory kak jelement ierarhii mehatronnyh ob#ektov / S.Ju. Petrov, E.V. Shalobaev // Mehatronika. – 2001. – № 5. – C. 29-34.
45. Shalobaev, E.V. Skanirujushhie lazernye ustanovki v medicine / E.V. Shalobaev, G.N. Jurkova, Efi-menko V.T., Efimenko A.V. // Nauchno-tehnicheskij vestnik SPb GITMO (TU). – Vyp. 4. – 2001. – S. 147-150.
46. Poduraev, Ju.V. Analiz i proektirovanie mehatronnyh sistem na osnove kriterija funkcio-nal'no-strukturnoj integracii. Chast' I / Ju.V. Poduraev // Mehatronika. – 2002. – № 4. – S. 28-34.
47. Gorbatov, P.A. Gornye mashiny dlja podzemnoj dobychi uglja / P.A. Gorbatov, G.V. Petrushkin, N.M. Lysenko, S.V. Pavlenko, V.V. Kosarev. – Doneck: DonNTU. – 2006. – 669 s.
48. Stadnik, N.I. Mehatronika v ugol'nom mashinostroenii / N.I. Stadnik, A.V. Sergeev, V.P. Kon-drahin // Gornoe oborudovanie i jelektromehanika. – 2007. – № 4. – S. 20-29.
49. Gorbatov, P.A. Matematicheskaja i strukturnaja modeli dlja optimal'-nogo proektirovanija podsi-stem podveski i peremeshhenija ispolnitel'nogo organa prohodcheskikh kombajnov mehatronnogo klassa / P.A. Gorbatov, N.M. Lysenko, N.I. Podobedov // Gornoe oborudovanie i jelektromehanika. – 2010. – № 7. – S. 9-15.
50. Gorbatov, P.A. Osobennosti paralel'nogo proektirovanija gornyh vyemochnyh mashin novyh po-kolenij kak jenergeticheskikh sistem mehatronnogo klassa / P.A. Gorbatov // Gornoe oborudovanie i jelektrome-hanika. – 2010. – № 10. – S. 39-42.
51. Krasnov, S.V. Intellektual'noe upravlenie v mehatronnyh sistemah / S.V. Krasnov, D.A. Gur'ja-nov, S.S. Krasnov // Vestnik Volzhskogo un-ta im. V.V.Tatishheva. – 2011. – № 17. – S. 100-104.
52. Egorov, O.D. Konstruirovanie mehatronnyh modulej: uchebnik / O.D. Egorov, Ju.V. Poduraev. – M.: MGTU Stankin. – 2004. – 360 s.
53. Kozyrev, Ju.G. Promyshlennaja robotizacija, mehatronika i problemy avtomatizacii sboroch-nyh operacij / Ju.G. Kozyrev // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. – 2006. – № 2. – S. 24-26.
54. Avionika Rossii: Jenciklopedicheskij spravocnik; pod obshh. red. S.D. Bodrunova. – SPb.: NAAP. – 1999. – 780 s.
55. Siga, X. Avtomobil'naja jelektronika / X. Siga, S.Midzutani. – M.: Mir. – 1989. – 227 s.
56. Aleksiev O.P., Aleksiev V.O., Bogaevski O.B. Elektronnij variant terminologichnogo slovnika. Atomobil'na mehatronika (ukr.). – Har'kiv: HNADU. – 2011. – 39 s.
57. Kos'kin, Ju.P. Optimizacija dinamicheskikh harakteristik jelektricheskikh mashin / Ju.P. Kos'kin // Izvestija LJeTI. – 1986. – Vyp. 373. – S. 3-8.
58. Kos'kin, Ju.P. Jelektromehanotronika. Osnovnye osobennosti i sovremennoe sostojanie / Ju.P. Kos'kin, A.G. Mikerov // Robototehnika i mehatronika. Sb. trudov pod red. A.M. Potapova. – M.-SPb.: BGTU. – 1996. – S. 125-133.
59. Jelektrotehnicheskaja jenciklopedija v 4-h tt.; gl. red. A.F. D'jakov. – M.: izd-vo MJeI. – 2010. – T. 4. – 261 s.
60. Sajt Jelektromehanotronika Vikipedija. – [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>
61. Karpenko G.N., Berlin G.S., Barsukov I.I. Primenenie mehanotronnoj tehniki v mediko-biologicheskikh is-sledovanijah; pod red. Ju.A. Aksel'roda. – Saratov: SGU. – 1991. – 184 s.

Shalobaev Evgeniy Vasil'evich

St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg

Candidate of Technical Sciences, Professor

Tel.: (812) 592-02.94, +7-921-988-00-86

E-mail: shalobaev47@mail.ru

Tolochka Rimantas-Tadas

Kaunas University of Technology, Lithuania, Kaunas

Doctor of Technical Sciences, Professor

Tel.: (+370-37) 30-00-36

E-mail: tadas.tolocka@ktu.lt

УДК: 681.5.08:621.317.799

Ю.А. ДЕМИНА, Е.Г. ДЕМИНА, В.Ю. ПРЕСНЕЦОВА, Т.Г. ДЕНИСОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРИТЕЛЯ В ВИДЕ СПИРАЛЬНОГО ЗМЕЕВИКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ЗАДАНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Статья отражает результаты работы по второму (итоговому) этапу соглашения №14.В37.21.1567, выполненного в рамках проведения научных исследований по направлению «Многофункциональное приборостроение для промышленных систем управления» и результаты работы по теме №12-08-975. В данной статье рассматривается математическая модель, составленная для определения оптимальных параметров проточного теплообменника, выполненного в виде спирального змеевика испарителя парокompрессионной машины.

Ключевые слова: экспериментальная система, холодильное оборудование, изделия приборостроения, охлаждающий испаритель, спиральный змеевик, теплообменник.

ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературные жидкостные циркуляционные термостаты предназначены для статирования температуры в отдельном жидкостном объеме измерительной камеры в заданном температурном диапазоне. Циркуляция теплоносителя по замкнутому гидравлическому контуру обеспечивается отдельным циркуляционным насосом. Для охлаждения теплоносителя в контур обычно вводится проточный теплообменник в виде охлаждающего испарителя парокompрессионной машины. Энергетические параметры термостата во многом зависят от выбора оптимальной конструкции теплообменника.

ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ

В данной статье рассматривается математическая модель, составленная для определения оптимальных параметров проточного теплообменника, выполненного в виде спирального змеевика испарителя парокompрессионной машины (рис. 1).

Хладагент подается с температурой t_a от парокompрессионной машины через терморегулирующий вентиль (1) в испаритель (3), где кипит при температуре t_0 за счет тепловой энергии, отводимой от потока теплоносителя. Терморегулирующий вентиль регулирует подачу хладагента в испаритель, поддерживая перегрев пара на выходе испарителя на уровне θ_n . Теплообмен теплоносителя происходит на участке змеевика, смачиваемого жидким кипящим хладагентом L_l , и на участке теплообмена с паровой фазы хладагента L_g .

На рисунке отражены геометрические параметры спирали змеевика испарителя и параметры канала проточной части устройства:

D_s, H – диаметр и высота спирали змеевика испарителя;

D, d – внешний и внутренний диаметр трубы змеевика испарителя;

S_1, S_2 – поперечный и продольный шаг;

$a = \frac{S_1}{D}, b = \frac{S_2}{D}$ – безразмерные поперечный и продольный шаги;

$\varphi' = \arctg\left(\frac{S_2}{2 \cdot D_s}\right), \varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi'$ – угол наклона витка к основанию спирали и угол накло-

на витка к оси спирали;

θ_n – величина перегрева пара на выходе испарителя;

$L_1 = \frac{\pi \cdot D_s}{\cos(\varphi')}$ – длина витка спирали.

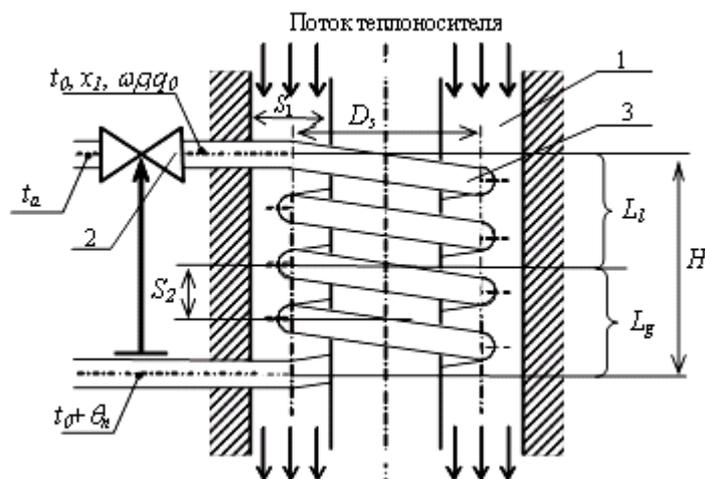


Рисунок 1 – Поперечное сечение теплообменника

1 – проточная часть теплообменника; 2 – терморегулирующий вентиль; 3 – змеевик испарителя

Параметры реализуемого термодинамического цикла, отражающие состояние хладагента на разных участках змеевика, следующие:

t_a – температура конденсации хладагента (температура перед ТРВ);

t_0 – температура кипения хладагента в испарителе;

x_1 – паросодержание хладагента на входе в испаритель, для $x_1 > 0,05$ характерен кольцевой режим течения хладагента в трубе испарителя:

$$x_1 = \frac{c_m \cdot (t_a - t_0)}{r},$$

где c_m – средняя теплоемкость хладагента в рассматриваемом диапазоне температур $t_0 \dots t_a$;

r – удельная теплота парообразования хладагента при температуре кипения t_0 ;

q_0 – удельная холодопроизводительность реализуемого термодинамического цикла испарителя при полном испарении хладагента (паросодержание на выходе $x_2 = 1$):

$$q_0 = r - c_m \cdot (t_a - t_0);$$

$M_a, \omega\rho$ – массовая подача и массовая скорость движения хладагента в трубе:

$$M_a = \frac{Q}{q_0}, \quad \omega\rho = \frac{M_a}{F},$$

где Q – тепловая нагрузка на испаритель;

F – площадь проходного сечения трубы испарителя.

Общие положения, лежащие в основе процессов теплообмена между средами, участвующими в процессе теплообмена, описываются следующими уравнениями:

$$q = k \cdot \Delta T_{lm}, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока от теплоносителя к хладагенту;

k – коэффициент теплопередачи;

ΔT_{lm} – среднелогарифмическая разность температур между средами, участвующими в теплообмене.

При этом коэффициент теплопередачи, отнесенный к внутренней поверхности трубы змеевика, можно определить по уравнению:

$$k = \left[\left(\frac{1}{\alpha_T} + \frac{\delta}{\lambda} \right) \cdot \frac{d}{D} + \frac{1}{\alpha} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где α_T – коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя;

α – коэффициент теплоотдачи со стороны хладагента;

D, d – внешний и внутренний диаметр трубы испарителя;

δ, λ – толщина стенки трубы и коэффициент теплопроводности материала испарителя.

Среднеарифметическая разность температур определяется следующим образом:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{1,in} - T_{2,out}) - (T_{1,out} - T_{2,in})}{\ln(T_{1,in} - T_{2,out}) / (T_{1,out} - T_{2,in})}, \quad (3)$$

где $T_{1,in}$, $T_{2,in}$ и $T_{1,out}$, $T_{2,out}$ – температура сред, участвующих в теплообмене, на входе и выходе в теплообменник.

Теплообмен с теплоносителем происходит на длине спирали, смачиваемой жидкой фазой хладагента L_l , и теплообмена на участке с паровой перегретой фазой хладагента L_g , следовательно, тепловая нагрузка на испаритель складывается из тепловых нагрузок на соответствующие участки испарителя:

$$Q = Q_l + Q_g.$$

Для определения коэффициента теплоотдачи со стороны теплоносителя используются критерии, характеризующие процесс теплообмена. К ним относятся число Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad Re = \frac{(\omega/\chi) \cdot l}{\nu}, \quad Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda},$$

где l – характерная длина, принятая как длина обтекания для одиночной трубы, $l = \pi \cdot D/2$;
 α – средний коэффициент теплоотдачи с поверхности трубы;
 λ – теплопроводность жидкости, рассчитанная по средней температуре;
 ν , η – коэффициенты кинематической и динамической вязкости;
 c – удельная теплоемкость;
 ω/χ – характерная скорость – средняя скорость в области, занятой спиралью испарителя;
 ω – скорость жидкости в свободном от спирали поперечном сечении канала;
 χ – доля пустот, зависит от безразмерного поперечного шага a :

$$\chi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot a}.$$

Теплофизические свойства (λ , ν , η , c) теплоносителя рассчитываются для средней температуры $T = 0,5 \cdot (T_{in} + T_{out})$.

Средние числа Нуссельта при поперечном обтекании пучка гладких труб (спираль змеевика испарителя) определяются с помощью соотношений для средних чисел Нуссельта одиночного ряда:

$$Nu = k_f \cdot k_q \cdot k_\psi \cdot Nu_1, \quad (4)$$

где Nu_1 – число Нуссельта для одиночного ряда,
 k_f – структурный коэффициент, учитывающий также количество рядов в пучке n ;
 k_q – коэффициент, учитывающий направление теплового потока;
 k_ψ – коэффициент, учитывающий угол набегающего потока.

$$Nu_1 = 0,3 \cdot \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2},$$

где Nu_{lam} – среднее число Нуссельта для ламинарного пограничного слоя;
 Nu_{turb} – среднее число Нуссельта для турбулентного пограничного слоя.

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr},$$

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{1/3} - 1)}.$$

Структурный коэффициент:

$$k_f = \frac{1 + (n-1) \cdot f_A}{n} \quad \text{при } n \leq 10;$$

$$k_f = f_A \quad \text{при } n > 10,$$

где $f_A = 1 + \frac{0,7}{\chi^{1,5}} \cdot \frac{\frac{b}{a} - 0,3}{\left(\frac{b}{a} + 0,7\right)^2}$.

Коэффициент, учитывающий направление теплового потока:

$$k_q = \left(\frac{Pr}{Pr_\omega}\right)^{0,25}, \text{ если } \frac{Pr}{Pr_\omega} > 1 \text{ (нагревание жидкости);}$$

$$k_q = \left(\frac{Pr}{Pr_\omega}\right)^{0,11}, \text{ если } \frac{Pr}{Pr_\omega} < 1 \text{ (охлаждение жидкости).}$$

Здесь Pr – число Прандля при средней температуре жидкости; Pr_ω – число Прандля при температуре стенки. В таблице 1 приведены значения коэффициента k_ψ , учитывающего угол набегающего потока.

Таблица 1 – Коэффициент k_ψ , учитывающий угол набегающего потока

ψ , град	90	80	70	60	50	40	30	20
k_ψ	1,0	1,0	0,99	0,95	0,86	0,75	0,63	0,5

Приведенные соотношения справедливы в следующем диапазоне параметров:
 $10 < Re < 10^5$; $0,6 < Pr < 10^3$.

Для определения коэффициента теплоотдачи со стороны жидкой фазы хладагента используются числа Нуссельта, Рейнольдса:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad Re = \frac{\omega \rho \cdot d}{\eta},$$

где α – средний коэффициент теплоотдачи со стороны жидкой фазы хладагента;
 d – характерная длина, принятая за внутренний диаметр трубы змеевика;
 λ – теплопроводность жидкости, рассчитанная по средней температуре;
 η – коэффициент динамической вязкости;
 $\omega \rho$ – массовая скорость движения хладагента в трубе змеевика.

При кольцевом режиме течения хладагента в трубе ($x_1 > 0,05$), при условии полного ($x_2 = 1$) или неполного ($x_2 < 1$) испарения, для определения средней теплоотдачи используется следующее расчетное уравнение:

$$\alpha = 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\lambda}{\eta^{0,8}} \cdot \frac{(\omega \rho \cdot q)^{0,4}}{d^{0,6}}, \quad x_2 = 1$$

$$\alpha = 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\lambda}{\eta} \cdot \frac{(\omega \rho \cdot q)^{0,5}}{d}, \quad x_2 < 1$$
(5)

где x_1, x_2 – величина относительного паросодержания на входе и выходе испарителя;
 q – средняя величина теплового потока от поверхности испарителя;
 d – внутренний диаметр трубы змеевика испарителя.

Соотношения справедливы в пределах изменения $Re^2 \cdot K_f = 10^9 \dots 0,7 \cdot 10^{12}$,

где $K_f = (x_2 - x_1) \cdot \frac{r}{g \cdot L_l}$ – критерий, характеризующий скорость парообразования в трубе;

r – теплота парообразования;

L_l – длина трубы испарителя.

Теплофизические параметры жидкой фазы кипящего хладагента λ, η, ρ , берутся при температуре кипения.

Длина спирали испарителя, смачиваемой хладагентом:

$$L_l = \frac{Q}{q} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d}. \quad (6)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи со стороны паровой фазы хладагента так же используются числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad Re = \frac{\omega \rho \cdot d}{\eta}, \quad Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda}.$$

Теплофизические параметры перегретого пара (λ , μ , ρ , c) берутся при температуре кипения хладагента.

Теплота перегрева пара на длине L_g при заданной величине общего перегрева θ_n :

$$Q = c \cdot (\omega \rho \cdot F) \cdot \theta_n, \quad (6)$$

где F – площадь внутреннего поперечного сечения трубы змеевика.

Теплота перегрева пара складывается из теплопритока от обмена с теплоносителем и теплопритока от работы сил трения $Q = Q_i + Q_\xi$.

Коэффициент теплоотдачи со стороны пара:

$$Nu = 0,0225 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,6} \cdot \psi_p \cdot \psi_z, \quad (7)$$

где ψ_p , ψ_z – поправочные коэффициенты, учитывающие режим течения газа в трубе и влияние вторичной циркуляции из-за кривизны канала. В таблице 2 приведена зависимость значений коэффициента ψ_p от числа Re .

Таблица 2 – Зависимость коэффициента ψ_p от числа Re

$Re \cdot 10^{-3}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ψ_p	0,15	0,54	0,71	0,82	0,89	0,94	0,97	0,99	1,0

Влияние вторичной циркуляции при движении жидкости или пара в винтовых змеевиках на процесс теплообмена для $Re \geq 18500 \cdot (d/2 \cdot R)^{-0,28}$ учитывается величиной коэффициента ψ_z :

$$\psi_z = 1 + 1,8 \cdot (d/R),$$

где d – внутренний диаметр трубы;

R – радиус закругления змеевика.

Теплоприток от теплоносителя на участке L_g :

$$Q_i = k \cdot \Delta T_{lm} \cdot \pi \cdot d \cdot L_g = q \cdot \pi \cdot d \cdot L_g.$$

Теплоприток от работы сил трения на участке L_g :

$$Q_\xi = \xi \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\omega \rho^2}{2 \cdot \rho} \cdot \theta_{cn} \cdot V \cdot L_g = q_\xi \cdot L_g, \quad (8)$$

где ξ – коэффициент сопротивления трению, $\xi = 0,3164 \cdot Re^{-0,25}$,

V – объемный расход пара:

$$V = \frac{\omega \rho}{\rho} \cdot F,$$

θ_{cn} – коэффициент поправки на влияние вторичной циркуляции для спиральных змеевиков. В таблице 3 приведены значения коэффициента поправки.

Таблица 3 – Коэффициент поправки

$D/(2 \cdot d')$	3	4	5	6	8	10	20	250
θ_{cn}	1,9	1,7	1,6	1,5	1,35	1,25	1,1	1

На основании уравнения теплового баланса

$$L_g = \frac{Q}{q \cdot \pi \cdot d + q_{\xi}}. \quad (9)$$

Основная задача моделирования при заданной тепловой нагрузке змеевика испарителя и выбранного термодинамического цикла охлаждения – подобрать оптимальное сочетание размерных параметров змеевика – D, H, b .

ВЫВОДЫ

Данные математические модели совместно с математическими моделями, описывающими гидродинамические процессы в теплообменнике, позволяют рассчитать оптимальную конструкцию теплообменника при максимально ожидаемых статических нагрузках. Рассмотренные модели являются основой для разработки математических моделей, описывающих динамическое поведение экспериментальной системы при изменяющихся нагрузках, и служат основой для построения замкнутой системы регулирования температуры с заданным температурным градиентом в измерительном объеме термостата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнштейн, В.Д. Низкотемпературные холодильные установки / В.Д. Вайнштейн, В.И. Канторович. – М: Пищевая промышленность. – 1972. – 351 с.
2. Данилова, Г.Н. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов. – Л.: Машиностроение. – 1986. – 303 с.
3. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко. – 3-е изд. – М.: Энергия. – 1975. – 488 с.
4. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т.1 / Пер. с англ.; под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 560 с.
5. Демина, Ю.А. Экспериментальная автоматизированная система контроля манометрических терморегуляторов / Ю.А. Демина, Е.Г. Демина, В.Ю. Преснецова, Т.Г. Денисова // Автоматизация процессов управления. – Ульяновск: ФНПЦ ОАО "НПО "Марс". – 2011. – С. 92-98.
6. Демина, Ю.А. Математическая модель тепловых и аэродинамических процессов термостата с модулями Пельтье / Ю.А. Демина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – 2/210. – С. 204-209.
7. Демина, Ю.А. Автоматизированная система контроля манометрических терморегуляторов на основе термоэлектрических модулей Пельтье / Ю.А. Демина, О.В. Пилипенко, Е.Г. Демина // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – 1/273 (559). – С. 102-108.

Демина Юлия Александровна

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры «Прикладная математика и информатика»

E-mail: virginia97@mail.ru

Демина Елена Григорьевна

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и информатика»

E-mail: maxvolos@mail.ru

Преснецова Виктория Юрьевна

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Информационные системы»

E-mail: alluvian@mail.ru

Денисова Татьяна Геннадьевна

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел

Аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика»

E-mail: tessa88@bk.ru

Y.A. DEMINA, E.G. DEMINA, V.Y. PRESNECOVA, T.G. DENISOVA

MODELLING EVAPORATOR IN THE FORM OF THE SPIRAL COIL MULTIFUNCTIONAL EXPERIMENTAL MODULAR SYSTEM INTENDED FOR THE TASK AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PRODUCTS OF INSTRUMENT MAKING

This article reflects the results of the second (final) stage of the agreement №14.B37.21.1567 executed within carrying out scientific researches on the "Multipurpose Instrument Making for Industrial Control Systems" direction and results of work on a subject No. 12-08-975. In this article In this article is considered the mathematical model made for determination of optimum parameters of the flowing heat exchanger, the evaporator of the vapor-compression car executed in the form of a spiral coil.

Keywords: *experimental system, refrigerating appliances, instrument making products, the cooling evaporator, spiral coil, the heat exchanger.*

BIBLIOGRAPHY

1. Vajnshtejn, V.D. Nizkotemperaturnye holodil'nye ustanovki / V.D. Vajnshtejn, V.I. Kantorovich. – M: Pishhevaj promyshlennost'. – 1972. – 351 s.
2. Danilova, G.N. Teploobmennye apparaty holodil'nyh ustanovok / G.N. Danilova, S.N. Bogdanov. – L.: Mashinostroenie. – 1986. – 303 s.
3. Isachenko, V.P. Teploperedacha / V.P. Isachenko. – 3-e izd. – M.: Jenergija. – 1975. – 488 s.
4. Spravochnik po teploobmennikam: v 2 t. T.1 / Per. s angl.; pod red. B.S. Petuhova, V.K. Shikova. – M.: Jenergoatomizdat. – 1987. – 560 s.
5. Demina, Ju.A. Jeksperimental'naja avtomatizirovannaja sistema kontrolja manometricheskikh termoreguljatorov / Ju.A. Demina, E.G. Demina, V.Ju. Presnecova, T.G. Denisova // Avtomatizacija processov upravlenija. – Ul'janovsk: FNPC OAO "NPO "Mars". – 2011. – S. 92-98.
6. Demina, Ju.A. Matematicheskaja model' teplovyh i ajerodinamicheskikh processov termostata s modulyami Pel'te / Ju.A. Demina // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologij. – 2010. – 2/210. – S. 204-209.
7. Demina, Ju.A. Avtomatizirovannaja sistema kontrolja manometricheskikh termoreguljatorov na osnove termojelektricheskikh modulej Pel'te / Ju.A. Demina, O.V. Pilipenko, E.G. Demina // Izvestija OrelGTU. Serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologij». – 2009. – 1/273 (559). – S. 102-108.

Demina Yulia Alexandrovna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of Technical Sciences, senior teacher of "Applied Mathematics and Informatics" chair

E-mail: virginia97@mail.ru

Demina Elena Grigirjevna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of Technical Sciences, associate professor of "Applied Mathematics and Informatics" chair

E-mail: maxvolos@mail.ru

Presnecova Victorija Yurjevna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of Technical Sciences, senior teacher of "information systems" chair

E-mail: alluvian@mail.ru

Denisova Tatjana Gennadjevna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post graduate student of "Applied Mathematics and Informatics" chair

E-mail: tessa88@bk.ru

К.А. БАТЕНКОВ, С.Н. ЩЕКОТИХИН

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ НЕПРЕРЫВНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Поставлена задача синтеза дискретного отображения непрерывного канала связи для общих рандомизированных операторов модуляции и демодуляции, имеющая форму минимизации среднего байесовского риска с ограничениями на энергию передаваемых сигналов на выходе модулятора, условиями нормировки и неотрицательности условных плотностей.

Ключевые слова: дискретное отображение непрерывного канала связи, модулятор, демодулятор, дискретный канал связи, средний риск.

Как хорошо известно [1], для стохастических систем, а также для детерминированных, подверженных случайным воздействиям, применяют статистические критерии качества, на основе которых оценивают эффект функционирования системы в среднем для достаточно большого количества реализаций как входных сигналов, так и внутренних процессов самой системы. Следовательно, синтез подобных систем должен быть обязательно статистическим, а критерий качества должен соответствовать их функциональному предназначению.

С точки зрения предназначения любая система связи разрабатывается для передачи некоторой информации, вследствие принципиальной случайности которой, а также стохастичности канала связи неизбежны расхождения переданной информации от принятой, то есть в общем случае возникают ситуации, при которых сигнал на входе модулятора \mathbf{x} не соответствует сигналу на выходе демодулятора \mathbf{x}' . Степень же расхождения переданной и принятой информации (эффект от принятия того или иного решения) характеризуется количественной мерой, задаваемой функцией потерь (штрафа) $g(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$. По сути, функция потерь является априорной оценкой величины убытков от появления сигнала на выходе демодулятора \mathbf{x}' при условии, что передавался вектор \mathbf{x} .

Наличие определенной непрерывным многопараметрическим каналом связи H , а также операциями модуляции Φ и демодуляции Φ' взаимосвязи между сигналом на входе дискретного канала связи \mathbf{x} и его выходе \mathbf{x}' позволяет рассматривать вероятностную меру, заданную на этих множествах сигналов и представляющую собой двухпараметрическую многомерную совместную плотность вероятности векторов на входе модулятора и выходе демодулятора $\omega_{\mathbf{x}, \mathbf{x}'}(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$. В результате ожидаемая величина расхождения между переданной и принятой информацией вычисляется как математическое ожидание функции потерь, называемое также риском и характеризующее данную неточность в среднем:

$$R = \int \int_{\mathbf{x}' \mathbf{x}} g(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \omega_{\mathbf{x}, \mathbf{x}'}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') d\mathbf{x} d\mathbf{x}', \quad (1)$$

где интегрирование трактуется в рамках всего заданного множества переменных интегрирования, что подразумевает наличие интегралов кратности равной размерностям сигналов \mathbf{x} и \mathbf{x}' , то есть N и N' соответственно.

Следовательно, задача синтеза оптимального дискретного отображения непрерывного многопараметрического канала заключается в минимизации среднего риска (1) по набору в общем случае стохастических операторов модуляции Φ и демодуляции Φ' , представляющих

собой условные плотности вероятностей $\Phi: \omega_{\mathbf{x}/\mathbf{x}'}[\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{x}; \{t_j, \mathbf{r}_j\}]$ и $\Phi': \omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}}[\mathbf{x}', \bar{\mathbf{x}}'; \{t'_j, \mathbf{r}'_j\}]$:

$$\int \int_{\mathbf{x}' \mathbf{x}} g(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \omega_{\mathbf{x}, \mathbf{x}'}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') d\mathbf{x} d\mathbf{x}' \rightarrow \min_{\Phi, \Phi'} . \quad (2)$$

При этом как совместная плотность вероятностей, так и функция потерь могут зависеть от операторов модуляции и демодуляции. Так, условная плотность вероятностей вектора на выходе демодулятора при известном векторе на входе модулятора $\omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}}(\mathbf{x}', \mathbf{x})$ определяется на основе уравнения Колмогорова-Чепмена, поскольку отдельные блоки системы связи соединены последовательно и обладают свойством марковости:

$$\omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}}(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = \int_{\bar{\mathbf{x}}'} \omega_{\mathbf{x}'/x'}[\mathbf{x}', \bar{\mathbf{x}}'; \{t'_j, \mathbf{r}'_j\}] \int_{\bar{\mathbf{x}}} \omega_{x'/x}[\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}; \{t'_j, \mathbf{r}'_j\}, \{t_j, \mathbf{r}_j\}] \omega_{x/x}[\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{x}; \{t_j, \mathbf{r}_j\}] d\bar{\mathbf{x}} d\bar{\mathbf{x}}',$$

где $H: \omega_{x'/x}[\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}; \{t'_j, \mathbf{r}'_j\}, \{t_j, \mathbf{r}_j\}] = P[\bar{x}'_j = x(t'_j, \mathbf{r}'_j) | \bar{x}_j = x(t_j, \mathbf{r}_j)]$ – условная плотность вероятности сигнала на выходе канала связи $x'(t', \mathbf{r}')$ при известном входном $x(t, \mathbf{r})$, по сути описывающая в общем виде модель непрерывного многопараметрического канала связи.

Совместная же плотность вероятности определяется на основе правила умножения вероятностей:

$$\omega_{\mathbf{x}, \mathbf{x}'}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}}(\mathbf{x}', \mathbf{x}) \omega_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}),$$

где $\omega_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ – плотность распределения вероятности появления сигнала на входе модулятора \mathbf{x} .

Таким образом, варьируемыми параметрами при отыскании решения задачи (2) являются многомерные плотности вероятности, описывающие в общем рандомизированном виде операторы модуляции Φ и демодуляции Φ' . В этой связи следует учесть наличие проблемы, предполагающей введение дополнительного ограничения на входы канала связи, или выходы модулятора. Так, для операции демодуляции характерно стремление приблизить векторы на его выходе к исходным передаваемым векторам, что выливается в локализацию выходных сигналов вблизи области определения передаваемых сигналов. Причем степень локализации, определяющая точность воспроизведения информации, напрямую связана с соотношением между неопределенностью, вносимой каналом связи, и неопределенностью, обусловленной стохастической природой самой информации. Поскольку оператор модуляции позволяет формировать сигналы на его выходе в общем случае произвольным образом, то естественно, что оптимальное решение будет соответствовать произвольно большому разнесению между различными передаваемыми сигналами. Данное обстоятельство приводит к необходимости использования бесконечно большой мощности (энергии) для формирования сигналов на выходе модулятора, что приводит к невозможности реализации подобных преобразований на практике. В результате следует рассматривать дополнительное ограничение на мощность (энергию) передаваемых сигналов по каналу связи.

Среднее значение сигнала на выходе модулятора определяется как первый начальный момент [2, 3] определенного сечения данного случайного поля $x(t, \mathbf{r})$:

$$M_x(t, \mathbf{r}) = \int_{\bar{x}} \bar{x} \omega_x(\bar{x}; t, \mathbf{r}) d\bar{x}, \quad (3)$$

где $\omega_x(\bar{x}; t, \mathbf{r})$ – одномерная плотность распределения вероятностей значений сигнала на выходе модулятора $x(t, \mathbf{r})$, задающая вероятностную меру в некоторой точке пространства \mathbf{r} в определенный момент времени t :

$$\omega_x(\bar{x}_k; t_k, \mathbf{r}_k) = \int \dots \int_{\bar{x}_1} \int_{\bar{x}_{k-1}} \int_{\bar{x}_{k+1}} \dots \int_{\bar{x}_\infty} \omega_x[\bar{\mathbf{x}}; \{t_j, \mathbf{r}_j\}] d\bar{x}_1 \dots d\bar{x}_{k-1} d\bar{x}_{k+1} \dots d\bar{x}_\infty, \quad k = \overline{1, \infty}.$$

Мгновенная энергия сигнала на выходе демодулятора, соответствующая плотности энергии для пространственно-временного сигнала [4] или мгновенной мощности для временного сигнала [5], вычисляется как второй начальный момент сечения [3, 6]:

$$D_x(t, \mathbf{r}) = \int_{\bar{x}} \bar{x}^2 \omega_x(\bar{x}; t, \mathbf{r}) d\bar{x}.$$

Таким образом, в общем случае мгновенная энергия сигнала на выходе модулятора зависит от рассматриваемой точки пространства и момента времени. Кроме того, реальные сигналы в большинстве случаев локализованы как во времени так и в пространстве

(например, в цифровых системах рассматривают сигнал на конечном временном промежутке, антенная система имеет конечные линейные размеры, а следовательно излучающая поверхность также ограничена). Следовательно не целесообразно рассматривать величины, приведенные к единицам измерения как по временным так и пространственным координатам, поскольку в этом случае плотность энергии будет стремиться к нулю. Более подходящей оказывается интегральная характеристика в форме энергии, имеющей конечные значения для локализованных сигналов:

$$E_x = \int \int_{t \mathbf{r}} D_x(t, \mathbf{r}) dt d\mathbf{r}.$$

Таким образом, ограничение на выход модулятора соответствует не превышению некоторого порога e_x энергии передаваемых сигналов:

$$\int \int \int_{t \mathbf{r} \bar{x}} \bar{x}^2 \omega_x(\bar{x}; t, \mathbf{r}) d\bar{x} dt d\mathbf{r} \leq e_x. \quad (4)$$

Поскольку варьируемыми параметрами в задаче (2) являются по сути некоторые плотности вероятности, то для них должны выполняться условия нормировки:

$$\int_{\bar{x}} \omega_{x/\mathbf{x}}[\bar{x}, \mathbf{x}; \{t_j, \mathbf{r}_j\}] d\bar{x} = 1, \quad \forall \mathbf{x}, \quad (5)$$

$$\int_{\mathbf{x}'} \omega_{\mathbf{x}'/x}[\mathbf{x}', \bar{x}; \{t'_j, \mathbf{r}'_j\}] d\mathbf{x}' = 1, \quad \forall \bar{x}, \quad (6)$$

а также условия неотрицательности условных плотностей:

$$\omega_{x/\mathbf{x}}[\bar{x}, \mathbf{x}; \{t_j, \mathbf{r}_j\}] \geq 0, \quad \forall \bar{x}, \mathbf{x}, \quad (7)$$

$$\omega_{\mathbf{x}'/x}[\mathbf{x}', \bar{x}; \{t'_j, \mathbf{r}'_j\}] \geq 0, \quad \forall \mathbf{x}', \bar{x}. \quad (8)$$

Таким образом, задача синтеза дискретного отображения непрерывного многопараметрического канала связи для общих рандомизированных операторов модуляции и демодуляции имеет форму минимизации среднего байесовского риска (2) с ограничениями на энергию передаваемых сигналов на выходе модулятора (4), условиями нормировки (5), (6) и неотрицательности условных плотностей (7), (8).

Подобную задачу целесообразно классифицировать как задачу вариационного исчисления (вариационную задачу) [7], где в качестве целевого используется интегральный функционал, представляющий собой средний байесовский риск (2). Поскольку варьируемыми параметрами являются условные плотности вероятности как оператора модуляции $\omega_{x/\mathbf{x}}$, так и демодуляции $\omega_{\mathbf{x}'/x}$, то интегрант функционала зависит от двух данных функций переменных интегрирования \mathbf{x} и \mathbf{x}' . Так как их число определяется размерностями сигналов на входе модулятора N и выходе демодулятора N' соответственно, то и целевой функционал оказывается определенным на множествах условных плотностей, являющихся функциями N и N' переменных. В общем случае функция потерь $g(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ может зависеть от варьируемых параметров, что приводит к нелинейному виду целевого функционала. Подобные ситуации возникают, например, в случае, когда функция потерь представляет собой некоторую условную собственную информацию [8] или же информационные потери [9]. Линейность же возможна только в случае независимости функции потерь от операций модуляции и демодуляции, что предполагает строгую определенность функции потерь для любой комбинаций сигналов на входе модулятора и выходе демодулятора. Также следует отметить, что поскольку в общем случае функция потерь может иметь не просто функциональные зависимости от условных плотностей вероятности, а и операторные, то отнести данную задачу к простейшей задаче вариационного исчисления не представляется возможным. Опять же в случае линейности целевого функционала подобная трактовка вполне допустима.

Наличие ограничений приводит к задаче на условный экстремум. При этом ограничения на энергию (4) и условия нормировки (5) и (6) относятся к изопериметрическим (интегральным) связям, а условия неотрицательности (7) и (8) являются голономными (фазовыми ограничениями) [7]. Все условия имеют линейный вид, который может приобретать и ограничение на энергетiku в случае равенства нулю математического ожидания сигнала на выходе модулятора (3). Как будет показано далее, для довольно обширного класса функций потерь данное допущение может предполагаться без потери общности.

Таким образом, задача синтеза дискретного отображения непрерывного многопараметрического канала связи для общих рандомизированных операторов модуляции и демодуляции (2), (4)–(8) классифицируется как нелинейная вариационная задача на условный экстремум с изопериметрическими и голономными связями.

Естественно, в общем виде решение подобной задачи получить не представляется возможным, однако необходимые условия, которым должны удовлетворять рандомизированные операторы модуляции и демодуляции, в данной довольно абстрактной постановке задачи синтеза сформулировать и доказать в дальнейшем вполне реально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Репин, В.Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский. – М.: Советское радио. – 1977. – 432 с.
2. Тихонов, В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устойчивых систем: учеб. пособие для вузов / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь. – 1991. – 608 с.
3. Рытов, С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2 / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – М.: Наука. – 1978. – 464 с.
4. Зоммерфельд, А. Электродинамика: пер. с нем.; под ред. С.А. Элькинда. – М.: ИЛ. – 1958. – 501 с.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер с англ. / Б. Скляр. – изд. 2-е испр. – М.: Вильямс. – 2003. – 1104 с.
6. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник / С.И. Баскаков. – М.: Высш. Школа. – 1983. – 536 с.
7. Ванько, В.И. Вариационное исчисление и оптимальное управление: учеб. для вузов / В.И. Ванько, О.В. Ермошина, Г.Н. Кувыркин. – под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 3-е изд., исправл. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2006. – 488 с.
8. Галлагер, Р. Теория информации и надежная связь: пер. с англ.; под ред. М.С. Пинскера и Б.С. Цыбакова. – М.: Советское радио. – 1974. – 720 с.
9. Пугачев, В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В.С. Пугачев. – М.: Физматгиз. – 1962. – 883 с.

Батенков Кирилл Александрович

Академия ФСО, г. Орел

Кандидат технических наук, докторант

E-mail: pustur@yandex.ru

Щекотихин Сергей Николаевич

Академия ФСО, г. Орел

Кандидат технических наук, преподаватель

E-mail: schekotichin @yandex.ru

K.A. BATENKOV, S.N. SCHEKOTIKHIN

SYNTHESIS PROBLEM STATEMENT OF OPTIMAL RANDOMIZED CONTINUOUS CHANNEL DISCRETE MAPPING

Problem statement of continuous channel discrete mapping for general randomized modulation and demodulation operators is stand. It has form of average risk minimization with energy output modulator transmission limitation, normality condition and conditional probability density nonnegative.

Keywords: *continuous channel discrete mapping, modulation, demodulation, discrete channel, average risk.*

BIBLIOGRAPHY

1. Repin, V.G. Statisticheskij sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptacija informacionnyh sistem / V.G. Repin, G.P. Tartakovskij. – M.: Sovetskoe radio. – 1977. – 432 s.
2. Tihonov, V.I. Statisticheskij analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustojchivyh sistem: ucheb. posobie dlja vuzov / V.I. Tihonov, V.N. Harisov. – M.: Radio i svjaz'. – 1991. – 608 s.
3. Rytov, S.M. Vvedenie v statisticheskiju radiofiziku. Ch. 2 / S.M. Rytov, Ju.A. Kravcov, V.I. Tatarskij. – M.: Nauka. – 1978. – 464 s.
4. Zommerfel'd, A. Jelektrodinamika: per. s nem.; pod red. S.A. Jel'kinda. – M.: IL. – 1958. – 501 s.
5. Skljjar B. Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie: per s angl. / B. Skljjar. – izd. 2-e ispr. – M.: Vil'jams. – 2003. – 1104 s.
6. Baskakov, S.I. Radiotekhnicheskie cepi i signaly: uchebnik / S.I. Baskakov. – M.: Vyssh. Shkola. – 1983. – 536 s.
7. Van'ko, V.I. Variacionnoe ischislenie i optimal'noe upravlenie: ucheb. dlja vuzov / V.I. Van'ko, O.V. Ermoshina, G.N. Kuvyrkin. – pod red. B.C. Zarubina, A.P. Krishhenko. – 3-e izd., ispravl. – M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana. – 2006. – 488 s.
8. Gallager, R. Teorija informacii i nadezhnaja svjaz': per. s angl.; pod red. M.S. Pinskera i B.S. Cybakova. – M.: Sovetskoe radio. – 1974. – 720 s.
9. Pugachev, B.C. Teorija sluchajnyh funkcij i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo upravlenija / B.C. Pugachev. – M.: Fizmatgiz. – 1962. – 883 s.

Batenkov Kirill Aleksandrovich

Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel
Candidate of Engineering Sciences, doctoral candidate
E-mail: pustur @yandex.ru

Schekotikhin Sergey Nikolaevich

Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel
Candidate of Engineering Sciences, educator
E-mail: schekotichin @yandex.ru

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА НА ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЯХ ЛКИ-301

Проблеме увеличения коэффициента теплопроводности твердотельных матриц для лазеров на органических красителях посвящено большое количество работ. Для решения указанной задачи, органические красители внедрялись в целый ряд различных материалов и в них вводились разнообразные добавки. В данной статье предлагается использовать в качестве активного элемента твердотельную матрицу с внедренным в нее органическим красителем, которая заключена в оболочку из металла.

Ключевые слова: матрица, органические красители, эпоксиполимер, твердотельный лазер, теплопроводность, накачка, пористое стекло.

Созданные в 60-х годах XX века лазеры получили широкое распространение в различных областях науки и техники. Использование лазеров в спектроскопии с самого начала представлялось весьма перспективным. Однако первые лазеры работали на ограниченном числе дискретных частот видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Для большинства методов атомной и молекулярной спектроскопии необходимо, чтобы частота излучения лазера совпадала с частотой определенного квантового перехода. Поэтому, создание лазеров с перестраиваемой частотой привело к глубоким преобразованиям в оптической спектроскопии.

Наиболее эффективными перестраиваемыми лазерами являются лазеры на органических красителях. Они охватывают область длин волн от ближней ультрафиолетовой до ближней инфракрасной. Отечественная промышленность выпускает лазеры на жидких растворах красителей с ламповой и когерентной накачкой. Однако они обладают рядом эксплуатационных недостатков, связанных с необходимостью прокачки растворов красителя и возможностью испарения растворителя, что взрывоопасно, особенно в закрытых помещениях.

С целью устранения недостатков присущих жидкостным лазерам отечественной промышленностью был освоен выпуск твердотельного лазера на красителях с когерентной накачкой типа ЛКИ-301 с матрицей на основе полиметилметакрилата (ПММА), (рис. 1). Однако, у лазерного материала на основе ПММА низкая теплопроводность ($\lambda=0,18 \text{ Вт}\cdot\text{К}^{-1}\text{м}^{-1}$); не высокое значение твердости (по Бринеллю 130 МПа), что затрудняет механическую обработку; низкая фотостойкость, что вызвало необходимость сканирования при накачке пучком света по поверхности лазерного элемента; невысокая теплостойкость матрицы из ПММА (температура размягчения порядка 70°C).

Для улучшения указанных характеристик были разработаны матрицы на основе целого ряда других материалов, например, на основе эпоксиполимеров, которые обладают большей теплопроводностью ($\lambda=0,23 \text{ Вт}\cdot\text{К}^{-1}\text{м}^{-1}$), большей твердостью (по Бринеллю 140-500 МПа), фотостойкостью и теплостойкостью [1].

Лазерные элементы на эпоксиполимерах, активированные красителями с концентрацией порядка 10^{-4} г/г, выполненные в форме параллелепипеда размерами $3\times 10\times 25$ мм вводились в лазер с недисперсионным резонатором. Накачка производилась второй гармоникой лазера ИАГ: Nd^{+3} . Матрица с родамином Ж показала следующие результаты: КПД достигал 15-20 %, пороговая мощность накачки оставляла $0,15 \text{ мВт}/\text{см}^2$, спектр широкополосной генерации лежал в области 580-596 нм с максимумом в районе 587 нм. Расходимость излучения генерации в режиме одиночных импульсов при небольшом превышении над порогом составляла 1,5 мрад. При частоте повторения импульсов накачки 12,5 Гц расходимость выросла вдвое. При такой же концентрации и условиях этанольный раствор родамина Ж показал следующие результаты: КПД – 45 %, пороговая плотность мощности – $0,1 \text{ мВт}/\text{см}^2$, диапазон генерации 572-588 нм с максимумом 580 нм. При частоте повторения импульсов накачки 12,5 Гц расходимость выросла почти на порядок. Матрица с внедренным в нее красителем родамином С показала следующие результаты: КПД – 25 %, пороговая плотность мощности – $0,13 \text{ мВт}/\text{см}^2$, спектр широкополосной генерации лежал в диапазоне 612-640 нм с максимумом

мом в районе 626 нм. Этанольный раствор родамина С при тех же условиях показал: КПД – 32 %, пороговая плотность мощности накачки – 0,11 мВт/см², спектр широкополосной генерации – 610-630 нм с максимумом 620 нм.

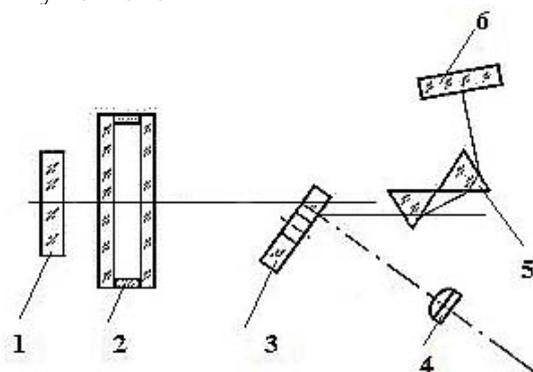


Рисунок 1 – Оптическая схема твердотельного лазера на красителях ЛКИ-301

1 – зеркало оптического резонатора; 2 – интерферометр; 3 – активный лазерный элемент; 4 – линза; 5 – призма; 6 – выходное зеркало оптического резонатора

Исследования по ресурсу работы эпоксиполимерных матриц, активированных красителями, дали следующие результаты: активный элемент с родамином Ж выдерживал 10⁴ вспышек при плотности мощности накачки 500 кВт/см², элемент на основе родамина С – 3·10⁴. Вышеприведенные данные о результатах испытаний взяты из работы [1].

Применение матрицы на основе эпоксиполимеров позволило производить накачку «в одну точку» и отказаться от сканирования лазерного элемента.

Интенсивность люминесценции красителей, внедренных в эпоксиполимер, уменьшается с ростом температуры (см. рис. 2, взятый из работы [1]). Поэтому, увеличение коэффициента теплопроводности и уменьшение рабочей температуры матриц повысит их ресурс и положительно скажется на КПД лазера.

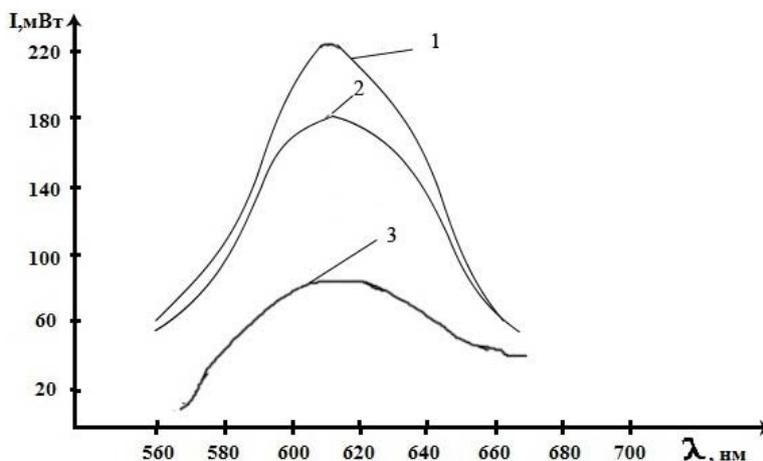


Рисунок 2 – Спектры люминесценции красителя родамина С в эпоксиолигомере ЭД-24 при разных температурах: 1 – при 39⁰ С; 2 – при 57⁰ С; 3 – при 115⁰ С

Для увеличения коэффициента теплопроводности и механической твердости эпоксиполимерных матриц в них вводились добавки в виде измельченного стекла, коэффициент преломления которого равен коэффициенту преломления эпоксиполимера ($n=1,501$). Стекла выбирали следующего состава: Si-B₂O₅BaO-Na₂O-K₂O-As₂O₃; Si-O₂-Al₂O₃; SiO₂-Li₂O и др.

Коэффициент теплопроводности таких стекол $\lambda = 0,923 \text{ Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Данные взяты из работы [1].

Для увеличения теплопроводности матриц красители были введены в ряд других материалов, например, в пористые стекла. В работе [2] приведен пример внедрения полимерного красителя в микропористое кварцевое стекло. Однако ресурс работы такого активного элемента не превышает 10²-10³ вспышек, что на 1-2 порядка ниже, чем у полимерных с оптимальным сочетанием полимер-краситель, но по своим механическим и термооптическим характеристикам они превосходят полимерные. В работе [2] приведено использование

эпоксиполимера на основе диглицидового эфира камфорной кислоты и метилгексагидрофталевого ангидрида. Данный эпоксиполимер активировался красителем родамин С и внедрялся в микропористое стекло. Диапазон генерации данного активного элемента лежал в диапазоне 607-655 нм, КПД составлял 20 %. Ресурс работы достигал 10^4 вспышек. Данные по плотности мощности накачки в работе [2] отсутствуют.

Существенно больший ресурс был достигнут при использовании микропористого кварцевого стекла, заполненного полимером, активированного красителем пиррометен (Pyromethene) 580, 597, 650 и родамином 11Б. Максимально достигнутая эффективность преобразования энергии накачки была достигнута для пиррометена 597 – 70 %, при ресурсе $6 \cdot 10^4$ импульсов при интенсивности накачки 25 МВт/см^2 [2].

Наибольший ресурс работы был достигнут для родамина 11Б – 10^5 импульсов, но при более низкой эффективности порядка 50 %. Размер тестируемого активного элемента составлял $20 \times 14 \times 4 \text{ мм}$ [2].

Однако эпоксиполимеры и стекла имеют теплопроводность намного меньшую, чем металлы (табл. 1, [3]). Поэтому в данной работе предлагается эпоксиполимерную матрицу или матрицу на основе пористого стекла с внедренными в них органическими красителями заключить в оболочку из металла с высоким коэффициентом теплопроводности, (рис. 3). На рисунке 3 активный лазерный элемент 3 из эпоксиполимера, активированного красителем, заключен в оболочку 2 из металла с высоким коэффициентом теплопроводности. В оболочке выполнены кольцевые пазы 4 (рис. 3, сечение А-А), значительно увеличивающие площадь его контакта с генерирующей средой. Таким образом, получается легко заменяемая конструкция, которая вставляется в стойку 1, выполненную из того же высокотеплопроводного металла, что и оболочка 2.

Излучение накачки падает на активный лазерный элемент 3, заключенный в оболочку 2. Под действием излучения накачки краситель люминесцирует. Оболочка 2 и стойка 1 проводят тепло, полученное от активного лазерного элемента 3. Данная конструкция была описана в работе [4].

Таблица 1 – Теплопроводность некоторых металлов

Теплопроводность $\lambda \text{ Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ при температуре 300 К				
Алюминий	Бронза	Железо	Латунь	Медь
237	105	80	110	401

Ее предлагается использовать в качестве активного элемента 3 в лазере ЛТИ-301, (рис. 1). Корпус, боковые наклонные стойки, зажимные фланцы и металлическое днище лазера, на которую монтируется вся конструкция, проводят теплоту, полученную от генерирующей матрицы. Согласно закону Фурье они будут служить радиатором, рассеивающим это тепло в окружающую среду конвективной теплоотдачей по закону Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha(t_c - t_b) \cdot S,$$

где Q – конвективный тепловой поток от всех поверхностей стенок к окружающему воздуху, Вт;

α – средний коэффициент конвективной теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

t_c – температура поверхности стенок, $^{\circ}\text{C}$;

t_b – температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

S – площадь всех поверхностей теплообмена, м^2 .

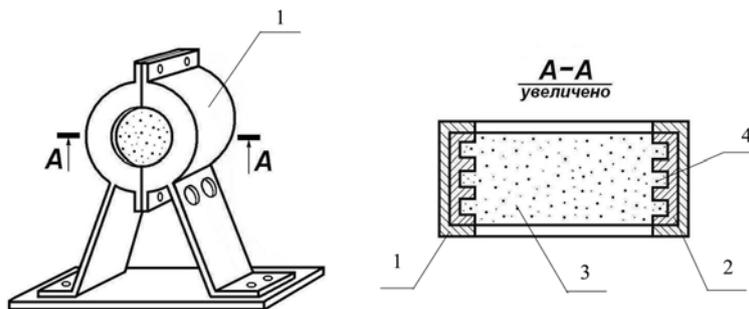


Рисунок 3 – Стойка и генерирующая матрица лазера в оболочке из металла

1 – корпус; 2 – оболочка из металла с высоким коэффициентом теплопроводности;

3 – эпоксиполимерная матрица, активированная органическим красителем; 4 – кольцевые пазы

Однако такая конструкция обладает недостатком, который заключается в том, что ей присущи температурные деформации и она неразъемная. В оболочку лазерный элемент можно только залить, т.е. лазерный элемент может быть выполнен только из полимерного материала. Кроме того, при выходе лазерного элемента из строя его приходится выбрасывать вместе с оболочкой, что приводит к дополнительным трудовым и материальным затратам. Для устранения указанного недостатка была предложена конструкция, приведенная на рисунке 4. В ней оболочка выполнена разъемной, она состоит из фланца 2, в который вставляется матрица 3 из эпоксиполимера или пористого стекла, активированная органическими красителями. Во избежание радиальных температурных деформаций диаметр отверстия фланца 2, в которое вставляется матрица 3, больше последней на 0,5-0,8 мм. Для устранения воздушного зазора между фланцем 2 и активным лазерным элементом 3 с целью более высокого теплоотвода от последней, следует применить термопасту. Термопасту следует нанести тонким слоем на боковую поверхность отверстия фланца 2 перед вставкой в него матрицы 3. Для устранения осевых температурных деформаций, матрица 3 при помощи упругих пружин 7, укрепленных на винтах 4, прижимается крышкой 8 к фланцу 2.

Таким образом, получается разъемная конструкция, которая легко вставляется в корпус 1 из того же высокотеплопроводного металла, что и оболочка. Данная конструкция позволяет использовать лазерные элементы на эпоксиполимерах и на пористых стеклах, а так же позволяет легко их заменять.

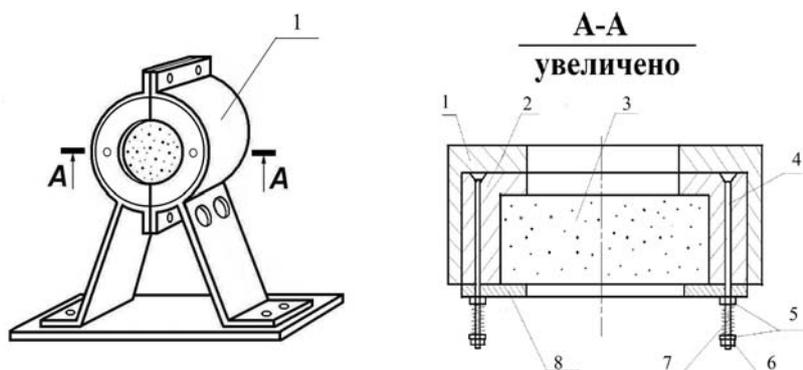


Рисунок 4 – Стойка для генерирующей матрицы твердотельного лазера на красителях
 1 – корпус; 2 – фланец; 3 – активная матрица; 4 – винт; 5 – шайбы; 6 – гайка; 7 – пружина; 8 – крышка

Более компактный вариант конструкции, в которой устранены выступающие части от пружин, представлен на рисунке 5. Ее устройство и принцип действия аналогичен конструкции, представленной на рисунке 4. Отличие состоит в том, что в качестве крышки использована упругая мембрана 5 с отверстием, закрепленная на фланце 2 винтами 4. Она прижимает активный лазерный элемент 3 к фланцу 2. Применение упругой мембраны позволяет избежать осевых температурных деформаций, обусловленных нагревом всех частей конструкции, состоящей из различных материалов.

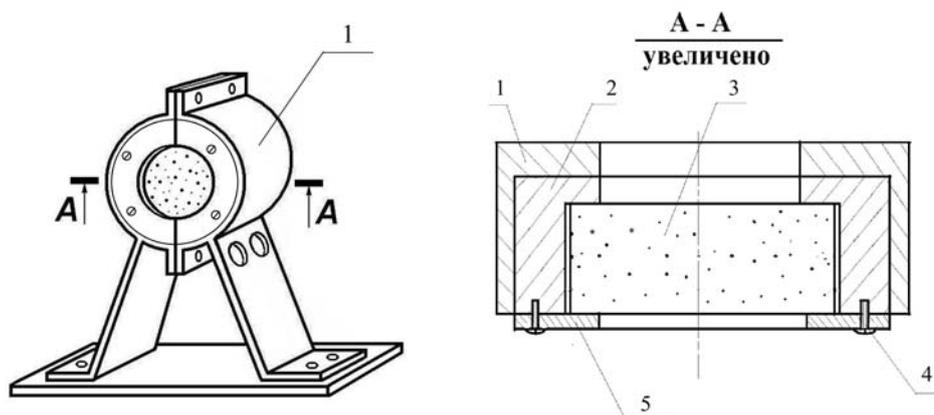


Рисунок 5 – Стойка с активным лазерным элементом
 1 – стойка; 2 – фланец; 3 – матрица; 4 – винты; 5 – упругая мембрана

Применение матриц на эпоксиполимерах или пористых стеклах позволяет отказаться от механизма сканирования и производить накачку «в одну точку».

Высокая теплопроводность металла, обширная площадь контакта стойки с окружающей средой, а так же с металлическим днищем лазера обеспечат достаточный теплоотвод от генерирующей среды, что приведет к увеличению ресурса матрицы и повышению КПД лазера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деулин, Б.И. Сравнительные характеристики твердотельных лазеров на красителях с различными матрицами / Б.И. Деулин // Материалы VI Международной заочной научно-практической Интернет-конференции «Инновационные, фундаментальные и прикладные исследования в области химии сельскохозяйственному производству». – Орел: ОрелГАУ. – 2013. – С. 162-166.

2. Земский, В.И. Физика и техника импульсных лазеров на красителях / В.И. Земский, Ю.Л. Колесников, И.К. Мешковский. – СПб.: СПбГУ ИТМО. – 2005. –176 с.

3. Теплопроводность металлов и сплавов. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatConductivity/HeatConductivityMetalls1/>

4. Патент РФ на полезную модель № 129307. Активный лазерный элемент. Деулин Б.И., Карпович Э.В., опуб. 20.06.2013.

Деулин Борис Иванович

Орловский государственный аграрный университет, г. Орел

Старший преподаватель кафедры «Теплотехника и электротехника»

E-mail: lobo10@rambler.ru

B.I. DEULIN

MODERNIZATION OF SOLID STATE ORGANIC DYE LASER LCI-301

The problem of increasing the thermal conductivity coefficient of solid-state lasers matrices for organic dyes subject of many papers. To solve this problem, the organic dyes were introduced to a variety of different materials and various additives are introduced. This article is proposed as an active element of a solid matrix is incorporated in an organic dye, which is enclosed in a sheath of metal.

Keywords: *matrix, organic dyes, epoxy resin, solid-state laser, thermal conductivity, pumping, porous glass.*

BIBLIOGRAPHY

1. Deulin, B.I. Sravnitel'nye harakteristiki tverdotel'nyh lazerov na krasitel'jah s razlichnyimi matricami / B.I. Deulin // Materialy VI Mezhdunarodnoj zaochnoj nauchno-prakticheskoy Internet-konferencii «Innovacionnye, fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti himii sel'skokochozaj-stvennomu proizvodstvu». – Орел: ОрелГАУ. – 2013. – С. 162-166.

2. Zemskij, V.I. Fizika i tehnika impul'snyh lazerov na krasitel'jah / V.I. Zemskij, Ju.L. Kolesnikov, I.K. Meshkovskij. – SPb.: SPbGU ITMO. – 2005. –176 s.

3. Teploprovodnost' metallov i splavov. – [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatConductivity/HeatConductivityMetalls1/>

4. Patent RF na poleznuju model' № 129307. Aktivnyj lazernyj jelement. Deulin B.I., Karpovich Je.V., opub. 20.06.2013.

Deulin Boris Ivanovich

Orel State Agrarian University, Orel

Senior lecturer of department "Heat and Electrical Engineering"

E-mail: lobo10@rambler.ru

УДК 620.179.1.082.7

А.В. СЕЛИХОВ, С.Г. ПУЗЫРЕВ, А.В. КОЗЮРА, В.И. НЕКРАСОВ, Р.В. ШАТЕЕВ

РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ

Настоящая статья содержит основные зависимости, необходимые для построения математической модели подшипника качения, результаты математического моделирования функции электрического сопротивления от различных параметров, результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: подшипник качения, электрическое сопротивление, математическая модель.

Подшипники качения входят в состав многих подвижных механизмов, и контроль их качества необходим для сокращения брака, повышения надежности оборудования, в состав которого будут входить контролируемые образцы, повышения безопасности производства и транспортных средств. Для выявления зависимостей между качеством контактирующих поверхностей и диагностического параметра и формирования принципов диагностирования требуется составить математическую модель подшипника качения. В качестве диагностического параметра предполагается использовать электрическое сопротивление подшипника качения.

Контакт тела качения с внутренним и внешним кольцом происходит не по точке, а по некоторой площади, вследствие того, что тела не являются абсолютно упругими, таким образом электрическое сопротивление контакта двух электропроводных поверхностей определяется

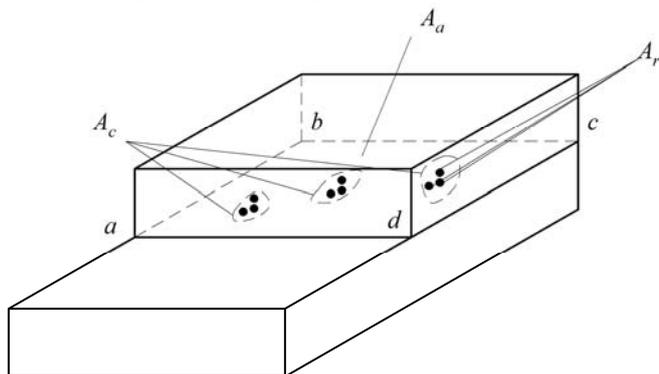


Рисунок 1 – Схема фрикционного контакта твердых тел

A_r – фактическая площадь контакта,

A_c – контурная площадь контакта,

A_a – номинальная площадь контакта на участке $abcd$

фактического контакта:

$$\Delta A_r = 0,33 \cdot K_r \cdot r \cdot Ra \cdot \left(\frac{p_c}{p_r} \right)^{0,33}; \quad (1)$$

где K_r – коэффициент, зависящий от вида контакта выступов, $K_r=11$ для упругого, $K_r=21$ для пластического;

r – приведенный радиус закругления вершин неровностей двух поверхностей;

Ra – среднее арифметическое отклонение профиля;

p_c – контурное давление;

p_r – фактическое давление.

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}, \quad (2)$$

где r_1, r_2 – приведенный радиус неровностей для первой и второй контактирующей поверхности.

Ввиду неоднородности поверхностей, наличия шероховатостей, макроотклонений профиля контакт рабочих поверхностей происходит в некотором вероятном числе z_k контак-

тов, число контактов поверхностей влияет на электрическое сопротивление контакта, так как различное число контактов будет создавать различное сопротивление прохождению электрического тока. Число пятен фактического контакта:

$$n_r = \frac{3,1 \cdot A_c}{K_r \cdot r \cdot Ra} \cdot \left(\frac{p_c}{p_r} \right)^{0,66}, \quad (3)$$

где A_c – контурная площадь контакта.

Для небольших поверхностей, когда волнистость не обнаруживается, контурная площадь контакта будет равна номинальной, т.е. $A_c = A_a$. Номинальная площадь контакта определяется:

$$A_a = \pi \cdot a_a \cdot b_a, \quad (4)$$

где a_a, b_a – полуоси эллипса контакта.

Контурное давление определяется выражением [4]:

$$p_c = \frac{N}{A_c}. \quad (5)$$

Формулы для определения фактического давления приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Расчетные формулы фактического давления

Деформация	Поверхности и давление	Расчетная формула
упругая	две шероховатые поверхности	$p_r = 0,61 \cdot \left(\frac{Ra}{r \cdot \Theta^2} \right)^{0,43} \cdot p_c^{0,14},$ где Θ – упругая постоянная материала
	шероховатая с гладкой	$p_r = 0,8 \cdot \left(\frac{Ra}{r \cdot \Theta^2} \right)^{0,4} \cdot p_c^{0,2}$
пластическая	$p_c \leq \frac{HB}{3}$	$p_r \approx H,$ где H – микротвердость
	$p_c > \frac{HB}{3}$	$p_r \approx p_c - 0,4 \cdot \sqrt{\frac{H^3}{p_c}}$

Упругая постоянная материала для случая контакта двух поверхностей определяется:

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_2, \quad (6)$$

где Θ_1, Θ_2 – упругие постоянные контактирующих поверхностей.

$$\Theta_{1,2} = \frac{1 - \mu_{1,2}^2}{E_{1,2}}, \quad (7)$$

где $\mu_{1,2}$ – коэффициент Пуассона;

$E_{1,2}$ – модуль упругости.

Для расчетов давления первом приближении можно считать, что микротвердость примерно равна твердости по Бринеллю HB и Виккерсу HV, т.е. $H \approx HB \approx HV$ [3].

Критерий на индексе пластичности [5]:

$$\psi = \frac{E'}{H} \sqrt{\frac{\sigma'}{r}}, \quad (8)$$

где E' – приведенный модуль упругости для двух контактирующих поверхностей;

$H = \min(H_1, H_2)$ – микротвердость материала, принимаемая равной меньшему из значений микротвердости двух соприкасающихся материалов;

σ' – среднее квадратическое отклонение профиля относительно средней линии шероховатой поверхности;

R – средний радиус закругления вершин.

Приведенный модуль упругости для двух контактирующих поверхностей [5]:

$$E' = \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}, \quad (9)$$

среднее квадратическое отклонение профиля относительно средней линии шероховатой поверхности [5]:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot (Ra_1^2 + Ra_2^2)}. \quad (10)$$

В зависимости от значения, которое принимает ψ можно судить о виде контакта [5]:

- $\psi < 0,6$ контакт упругий;
- $0,6 < \psi < 1$ упругопластическая деформация;
- $\psi > 1$ контакт пластический.

При этом, для упругопластического контакта расчеты ведутся как при пластическом контакте [4].

Электрическое сопротивление зоны трения будет определяться электрическим сопротивлением элементов, входящих в электрическую схему замещения. Воспользуемся электрической схемой замещения, представленной на рисунке 2 [5].

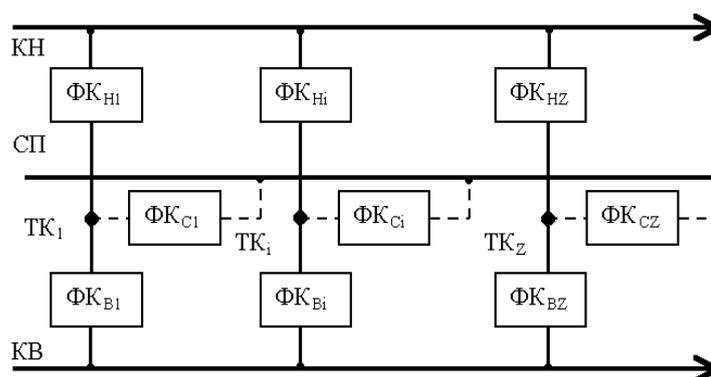


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения подшипника качения

$ПК$ – подшипник; $КН$, $КВ$ – кольцо наружное и внутреннее; $ТК_i$ – i -е тело качения; $СП$ – сепаратор; $ФК_{Нi}$, $ФК_{Вi}$, $ФК_{Сi}$ – фрикционные контакты i -го тела качения с наружным кольцом, внутренним кольцом и сепаратором

На основе представленной схемы замещения электрическое сопротивление зоны трения определяется:

$$R = R_M + R_{ОП} + R_{СТ} + R_{СП}, \quad (11)$$

где R_M – электрическое сопротивление контактирующих тел;

$R_{ОП}$ – электрическое сопротивление окисных пленок;

$R_{СТ}$ – электрическое сопротивление стягивания;

$R_{СП}$ – электрическое сопротивление смазочных пленок.

Сопротивление R_M определяется удельным сопротивлением материалов деталей пары трения, которое для сталей составляет порядка $10^{-7} \dots 10^{-6}$ Ом·м [6], что является пренебрежимо малым значением, по сравнению с остальными составляющими сопротивления, потому в рамках решаемой задачи можно пренебречь данной составляющей.

Сопротивление окисных пленок определяется из выражения [7]:

$$R_{ОП} = \frac{\rho_{СМ} \cdot l_{СМ}}{A_r \cdot n_r}. \quad (12)$$

Причем сопротивление окисных пленок следует учитывать только при упругом контакте, так как если контакт пластический, то происходит разрушение контактирующих выступов, следовательно, окисный слой так же разрушается, тогда выражение примет вид:

$$\begin{cases} R_{\text{ОП}} = \frac{\rho_{\text{СМ}} \cdot l_{\text{СМ}}}{A_r \cdot n_r}, & \text{если } \psi < 0,6; \\ R_{\text{ОП}} = 0, & \text{если } \psi \geq 0,6. \end{cases} \quad (13)$$

Воспринимающая усилие контактная поверхность очень мала, и только часть ее может пропускать электрический ток. Во всех случаях линии тока должны стягиваться вместе, проходя через ограниченные площадки кажущейся контактной поверхности, вызывающие увеличение сопротивления по сравнению со случаем полной проводимости. Это увеличение сопротивления есть сопротивление стягивания.

Электрическое сопротивление контакта шарика подшипника качения с одним кольцом определяется [2, 8]:

$$R_{\text{СТ}} = \frac{\rho \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot \sqrt{z \cdot A_r}}; \quad (14)$$

где ρ – удельное сопротивление пятна контакта;

z – число вероятных контактов (пятен контакта).

Для случая смешанной смазки, близкой к гидродинамической, толщина смазочного материала, разделяющего поверхности, является достаточной для предотвращения большей части контактов выступающих неровностей поверхностей. При этом смазочная пленка воспринимает основную нагрузку, а нагрузка воспринимаемая микронеровностями существенно меньше [2].

Сопротивления подшипника в условиях смешанного трения:

$$R_{\text{СП}} = \frac{\rho_{\text{СМ}}}{\rho} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r} \cdot R_{\text{СТ}}. \quad (15)$$

Радиус пятна контакта [3]:

$$r_k = n_a \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (1 - \eta^2) \cdot F_r}{E \cdot \sum \rho}}. \quad (16)$$

При жидкостной смазке смазочной материал полностью разделяет поверхности и контакта между ними не происходит, тогда для контакта между двумя поверхностями, сопротивление смазочной пленки определяется:

$$R_{\text{СМ}} = \rho_{\text{СМ}} \cdot \frac{h}{S_h}. \quad (17)$$

Параметром, позволяющим судить о режиме трения, является параметр смазочной пленки λ [9]:

$$\begin{cases} 0 < \lambda < 1 - \text{граничное трение;} \\ 1 \leq \lambda < 3 - \text{смешанное трение;} \\ 3 \leq \lambda - \text{жидкостное трение.} \end{cases} \quad (18)$$

Сам параметр λ определяется [9]:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}}, \quad (19)$$

где h_0 – толщина смазочного слоя:

$$h_0 = \left(1,82 - 0,68 \cdot \frac{R_{2m}}{R_{1m}} \right) \cdot (\mu_0 \cdot n_V \cdot V)^{0,75} \cdot \left(\frac{E \cdot R_{2m}}{p_0} \right)^{0,25}, \quad (20)$$

где R_{1m}, R_{2m} – коэффициенты, определяемые кривизной контактирующих поверхностей;

μ_0, n_V – соответственно, динамическая вязкость и пьезокоэффициент вязкости смазочного материала;

V – скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей.

В случае жидкостной смазки сопротивление зоны трения определяется толщиной смазочной пленки и её удельным сопротивлением, вследствие этого сопротивление будет значительным; в условиях смешанной смазки толщина смазочного слоя будет недостаточна для предотвращения контактов выступов шероховатостей поверхностей, сопротивление зоны трения определяется сопротивлением поверхностных пленок и сопротивлением стягивания; в случае граничного трения сопротивление зоны трения определяется только сопротивлением стягивания.

Было выполнено моделирование электрического сопротивления зоны трения подшипника качения 1000900, для случая вращения внутреннего кольца относительно неподвижного внешнего, в итоге была получена функция зависимости сопротивления $R(\alpha)$ от угла α положения сепаратора. На рисунке 3 представлен пример расчетной функции.

В полученном графике, для случая идеально круглых дорожек качения и постоянных во времени начальных параметров, наблюдается периодическая составляющая, возникающая вследствие прохождения шариков через зону нагружения.

Согласно [10] в результате финишной обработки рабочих поверхностей подшипника шероховатость дорожки качения внутреннего и наружного колец $Ra_1=0,06$ мкм, так как шероховатость тел качения и дорожек примерно одинаковая, то шероховатость шариков $Ra_2=Ra_1=0,06$ мкм. Приведенный радиус кривизны вершин выступов поверхностей $r_1=r_2=400$ мкм [3].

Полученная обобщенная математическая модель позволяет оценить влияние шероховатости тел и дорожек качения на некоторые характеристики (например, на математическое ожидание) функции распределения сопротивления контакта тела качения с кольцами. На рисунке 4 представлено изменение математического ожидания электрического сопротивления подшипника качения 1000900 в зависимости от изменения среднего арифметического отклонения профиля от средней линии Ra при разных частотах вращения внутреннего кольца, при неподвижном наружном кольце.

Важным моментом, для понимания изменения электрического сопротивления подшипника качения, является анализ вида трения (граничное, смешанное, жидкостное) и вида контакта (упругий, пластический). На рисунке 5 представлена зависимость параметра смазочной пленки λ , позволяющего определить вид трения, и критерия на индекс пластичности ψ , в зависимости от изменения среднего арифметического отклонения профиля от средней линии Ra при разных частотах вращения внутреннего кольца, при неподвижном наружном кольце.

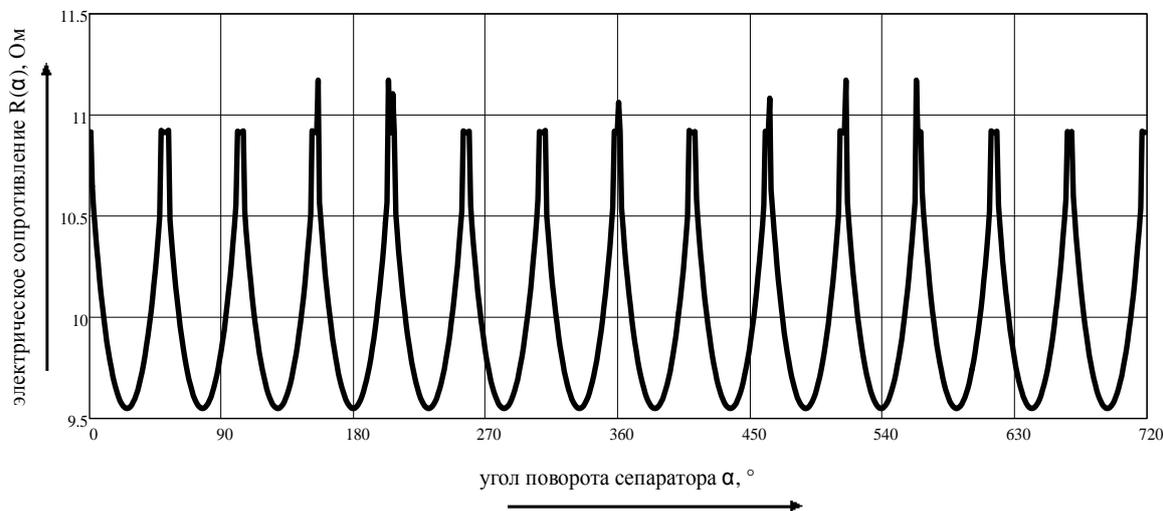


Рисунок 3 – Графики расчетных функций $R(\alpha)$ для подшипников типов 1000900

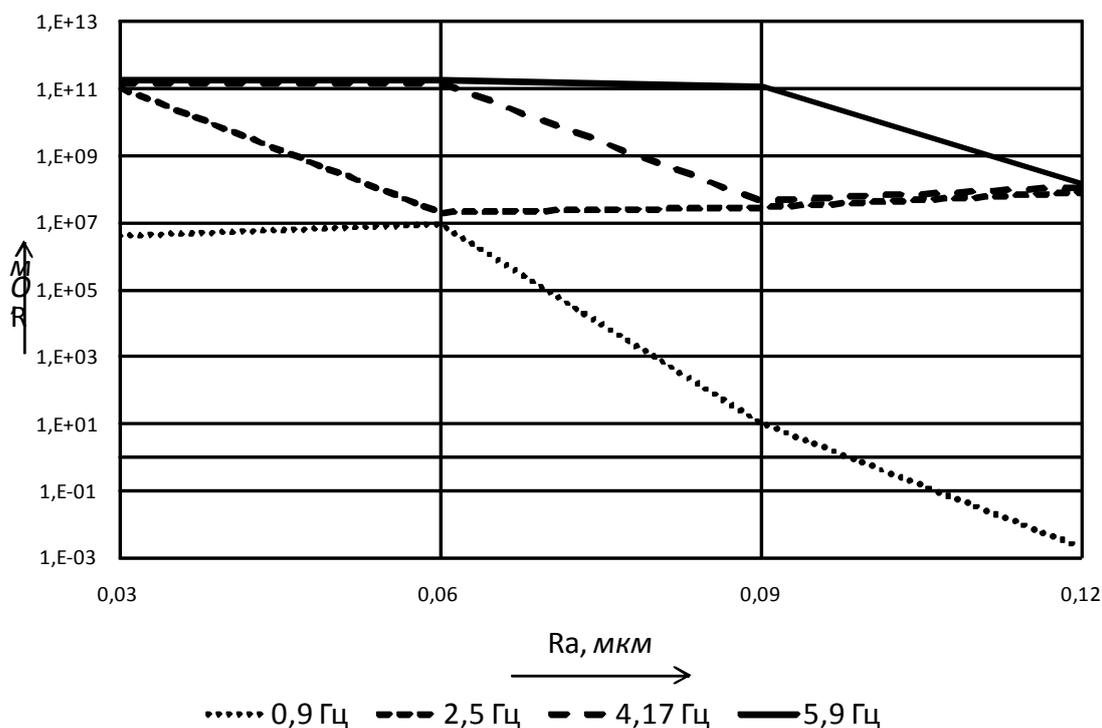


Рисунок 4 – График изменения электрического сопротивления подшипника качения

На графике отмечены границы, соответствующие различным видам трения и контактов. Область выше границы жидкостного трения соответствует жидкостному режиму трения, когда электрическое сопротивления подшипника преимущественно определяется толщиной смазочной пленки, область между границей смешанного трения и жидкостного трения соответствует смешанному режиму трения, когда электрическое сопротивление преимущественно определяется как толщиной смазочной пленки, так и сопротивлением стягивания микроконтактов, область ниже границы смешанного трения соответствует граничному трению, когда влияние смазочных пленок мало и электрическое сопротивление преимущественно определяется сопротивлением стягивания микроконтактов.

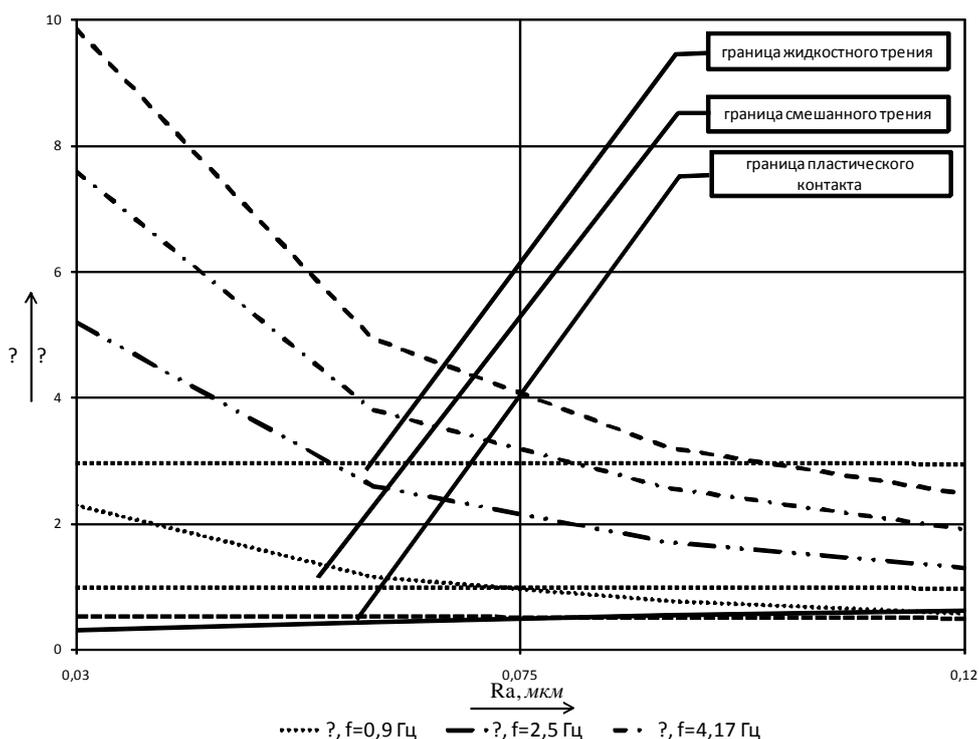


Рисунок 5 – График изменения параметра смазочной пленки λ , критерия на индекс пластичности ψ

Выше границы упругопластического контакта располагается область, в которой происходит пластический контакт, а ниже – область упругого контакта. При пластическом контакте происходит разрушение окисных слоев, и оксидные пленки не оказывают существенного влияния на электрическое сопротивление, в то время как при упругом, их влияние становится существенным.

Согласно (4) вид режима трения определяется шероховатостью поверхностей и толщиной смазочной пленки, которая, в свою очередь, зависит от максимального давления в зоне контакта и скорости относительного перемещения контактирующих поверхностей (5), таким образом, при постоянном давлении и скорости вид трения будет определяться шероховатостью, а так как сопротивление является отражением вида трения, то измеряя и контролируя математическое ожидание электрического сопротивление подшипника качения можно судить о качестве контактирующих поверхностей подшипника качения.

Для проверки адекватности полученной модели были проведены экспериментальные исследования. Объектом исследования является подшипник марки 1000900, радиальная нагрузка 20 Н, масло И-20, цифровой осциллограф DSO-2090, на рисунке 6 приведено изображение стенда для приработки подшипников качения (СППК), разработан совместно ООО «НПП Астронэлектроника» и ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК.

Электрическое сопротивление подшипника качения записывалось при разных частотах вращения и разном количестве смазочного материала. На рисунке 7 показано изменение электрического сопротивления подшипника качения в зависимости от частоты вращения, объема смазочного материала, добавленного в зону трения.



Рисунок 6 – Испытательный стенд

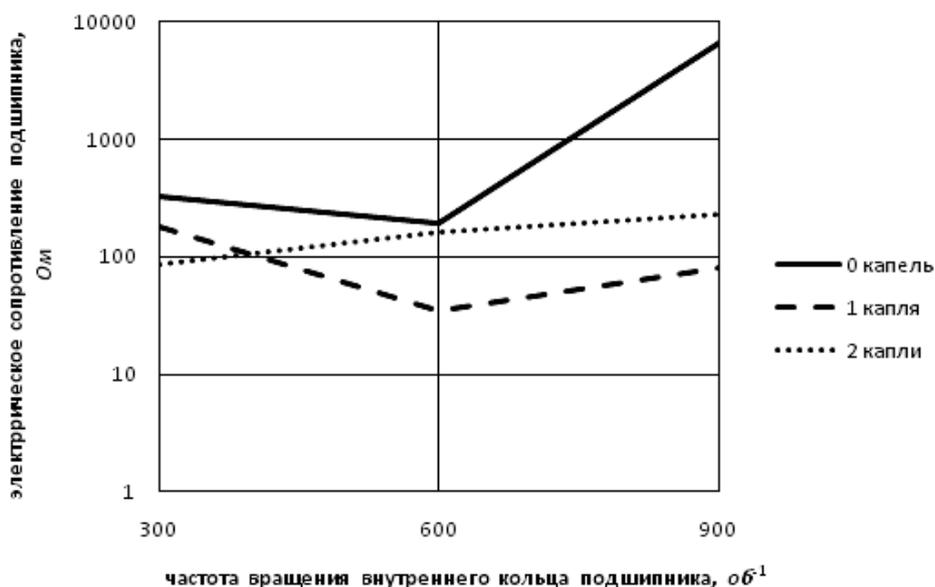


Рисунок 7 – Зависимость электрического сопротивления подшипника качения от различных параметров

Вывод: сравнивая полученные экспериментальные и теоретические данные можно сделать вывод, что полученная математическая модель является адекватной.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1603.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжов, Э.В. Контактная жесткость деталей машин / Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение. – 1966. – 194 с.
2. Мышкин, Н.К. Контакт шероховатых тел и его проводимость / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец // Трение и износ. – 1983. – Т.4. – № 5. – С. 845-853.
3. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. Кн. 1. – М.: Машиностроение. – 1978 – 400 с.
4. Дёмкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Дёмкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 244 с.
5. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1. – 2001. – 376 с.
6. Кончиц, В.В. Триботехника электрических контактов / В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин. – Минск: Наука и техника. – 1986. – 256 с.
7. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература. – 1961. – 464 с.
8. Демкин, Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология / Н.Б. Демкин // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.
9. Коднир, Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин / Д.С. Коднир. – М.: Машиностроение. – 1976. – 304 с.
10. Технология производства подшипников [электронный ресурс]. – http://bearings-ua.com/news/tekhnologija_proizvodstva_podshipnikov/2011-06-26-8.

Селихов Алексей Владимирович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел
Аспирант кафедры «ПМиС»
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: pms35@ostu.ru

Пузырев Станислав Григорьевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел
Аспирант кафедры «Химия»
Тел. (4862) 41-98-76

Козюра Алексей Вячеславович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел
Аспирант кафедры «ПМиС»
Тел. (4862) 41-98-76

Некрасов Вадим Игоревич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел
Аспирант кафедры «ПМиС»
Тел. (4862) 41-98-76

Шатеев Роман Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел
Аспирант кафедры «Информационные системы»
Тел. (4862) 41-98-76

A.V. SELIHOV, S.G. PUZYREV, A.V. KOZJURA, V.I. NEKRASOV, R.V. SHATEEV

DEVELOPMENT OF COMMON MATHEMATICAL MODEL OF BALL BEARING

The article is containing main functions, which necessary for making mathematical model of ball bearing, results of mathematical researches of electrical resistance's function from variable parameter, results of experimental researches.

Keywords: ball bearing, electrical resistance, mathematical model.

BIBLIOGRAPHY

1. Ryzhov, Je.V. Kontaktnaja zhestkost' detalej mashin / Je.V. Ryzhov. – M.: Mashinostroenie. – 1966. – 194 s.
2. Myshkin, N.K. Kontakt sherohovatyh tel i ego provodimost' / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovec // Trenie i iznos. – 1983. – T.4. – № 5. – S. 845-853.
3. Trenie, iznashivanie i smazka: Spravochnik. V 2-h kN. / Pod red. I.V. Kragel'skogo, V.V. Alisina. Kn. 1. – M.: Mashinostroenie. – 1978 – 400 s.
4. Djomkin, N.B. Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin / N.B. Djomkin, Je.V. Ryzhov. – M.: Mashinostroenie. – 1981. – 244 s.
5. Podmaster'ev, K.V. Jelektroparametricheskie metody kompleksnogo diagnostirovanija opor kachenija / K.V. Podmaster'ev. – M.: Mashinostroenie-1. – 2001. – 376 s.
6. Konchic, V.V. Tribotehnika jelektricheskikh kontaktov / V.V. Konchic, V.V. Meshkov, N.K. Myshkin. – Minsk: Nauka i tehnika. – 1986. – 256 s.
7. Hol'm, R. Jelektricheskie kontakty / R. Hol'm. – M.: Inostrannaja literatura. – 1961. – 464 s.
8. Demkin, N.B. Teorija kontakta real'nyh poverhnostej i tribologija / N.B. Demkin // Trenie i iznos. – 1995. – T. 16. – № 6. – S. 1003-1024.
9. Kodnir, D.S. Kontaktnaja gidrodinamika smazki detalej mashin / D.S. Kodnir. – M.: Mashinostroe-nie. – 1976. – 304 s.
10. Tehnologija proizvodstva podshipnikov [jelektronnyj resurs]. – http://bearings-ua.com/news/tehnologija_proizvodstva_podshipnikov/2011-06-26-8.

Selihov Aleksey Vladimirovich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Postgraduate of department “Instrument engineering, metrology and certification”
Tel. (4862) 41-98-76
E-mail: pms35@ostu.ru

Puzyrev Stanislav Grigorevich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Postgraduate of department «Chemistry»
Tel. (4862) 41-98-76

Kozjura Aleksej Vjacheslavvovich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Postgraduate of department “Instrument engineering, metrology and certification”
Tel. (4862) 41-98-76

Nekrasov Vadim Igorevich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Postgraduate of department “Instrument engineering, metrology and certification”
Tel. (4862) 41-98-76

Shateev Roman Valer'evich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Postgraduate of department «Informational systems »
Tel. (4862) 41-98-76

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 621.3.08

Б.Р. ИВАНОВ, В.Г. ЛИСИЧКИН, М.А. ЛИСИЧКИН

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДВУХПАРАМЕТРОВОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТРОЛЯ

Предложен подход к оценке эффективности контроля в условиях случайного воздействия помех в виде системы иерархически взаимосвязанных показателей, позволяющий оценивать достоверность результатов двухпараметрового резонансного контроля в зависимости от точности измерений параметров.

Ключевые слова: двухпараметровый резонансный контроль, точность измерений, оценка достоверности.

На многих этапах промышленного производства различной продукции и в сельском хозяйстве применяются разнообразные системы автоматического контроля технологических процессов. Значительная часть таких систем основана на применении частотных методов измерений и предназначена для резонансного контроля эквивалентных магнитных и электрических параметров веществ и материалов с помощью индуктивных и емкостных измерительных преобразователей.

Пространственная неоднородность магнитных или электрических свойств объектов измерения приводит к пропорциональным изменениям информативных параметров измерительного резонансного преобразователя: амплитуды, частоты и фазы высокочастотного сигнала, возбуждающего преобразователь, что позволяет проводить измерения с достаточно высокой точностью. Однако в производственных условиях измерения осуществляются при воздействии множества побочных факторов, большая часть из которых имеет стохастический характер, поэтому неизбежно возникают погрешности различного рода, что приводит к снижению достоверности контроля.

Один из основных побочных факторов – активная проводимость контролируемого материала, существенно снижающая точность измерений. Известные подходы к моделированию резонансного контроля основаны на определении значения резонансной частоты измерительного преобразователя, в котором скрыта информация о контролируемой величине, по максимальному значению резонансной кривой. Это приводит в условиях активных потерь к появлению методической погрешности измерений, которая возрастает при увеличении потерь в контролируемом материале.

В [1] получены соотношения, показывающие частотные зависимости изменений амплитуды V_m , резонансной частоты ω_δ и начальной фазы φ_δ сигнала на выходе измерительного преобразователя при возбуждении его сигналом изменяющейся частоты:

$$V_m(\omega) = 1 / \sqrt{\left[1 - (\omega / \omega_0)^2\right]^2 + 4(\delta')^2 (\omega / \omega_0)^2} ; \quad (1)$$

$$\omega_\delta = \omega_0 \sqrt{1 - 2(\delta')^2} ; \quad (2)$$

$$\varphi_\delta(\omega) = -\arctg \left\{ 2\delta' / (\omega_0 / \omega) \left[1 - (\omega / \omega_0)^2\right] \right\} , \quad (3)$$

где ω_0 – частота резонанса измерительного преобразователя без учета потерь;

δ' – коэффициент затухания.

Анализ выражений (1)-(3) позволяет сделать следующие выводы. При значениях $0 < \delta' < \sqrt{2}$ функция $V_m(\omega)$ имеет максимум на частоте ω_δ . Величина этого максимума

$(V_m)_{\max}(\omega) = 1/\delta' \sqrt{1 - 2(\delta')^2}$ уменьшается при увеличении коэффициента затухания, при этом абсцисса максимума смещается влево от значения резонансной частоты ω_0 по закону (2). Фазовая характеристика имеет постоянное значение на частоте резонанса ω_0 независимо от затухания, величина коэффициента затухания влияет только на крутизну этой характеристики вблизи резонансной частоты: чем меньше δ' , тем выше скорость изменения фазы в окрестностях ω_0 .

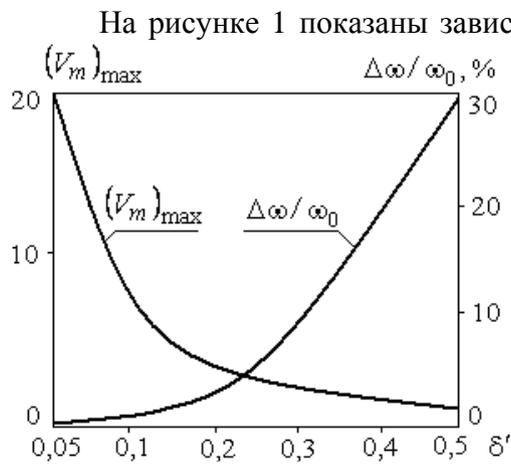


Рисунок 1 – Графики зависимости резонансной частоты и амплитуды от затухания

На рисунке 1 показаны зависимости относительного смещения абсциссы точки максимума функции (1) $\Delta\omega/\omega_0 = (\omega_0 - \omega_\delta)/\omega_0$ и изменения величины этого максимума $(V_m)_{\max}$ от значения коэффициента затухания.

Из графиков на рисунке 1 видно, что при увеличении коэффициента затухания δ' от значения 0,05 до 0,5 происходит смещение абсциссы максимума характеристики (1) относительно ω_0 почти на 30 % с одновременным уменьшением амплитуды этого максимума более чем на 17 дБ. Это означает, что измерение контролируемого параметра, величина которого является известной функцией от частоты резонанса измерительного преобразователя ω_0 , по максимуму резонансной кривой (что реализуется в большинстве существующих измерительных систем), осуществляется с

погрешностью, которая растет с увеличением потерь в контролируемом материале и может достигать существенных значений.

Компенсация этой погрешности возможна при использовании двухпараметрового метода контроля, отличающегося тем, что принятие решения о значении измеряемой величины основано на измерении двух параметров – резонансной частоты и амплитуды сигнала на выходе измерительного преобразователя. Поскольку от коэффициента затухания резонансной системы зависит максимальное значение амплитуды колебаний на выходе измерительного преобразователя, то по изменению амплитуды определяется значение коэффициента затухания и, соответственно, величина активных потерь в контролируемом материале. Это используется при обработке результатов для компенсации погрешности при оценке измеряемого параметра – частоты резонанса. При этом частота резонанса выделяется не по максимальному значению амплитуды колебаний на выходе измерительного преобразователя, а с помощью фазовой характеристики, которая принимает постоянное значение на частоте $\omega = \omega_0$ независимо от величины потерь.

Реальные измерения контролируемых параметров происходят в условиях воздействия различных помех и шумов $\Xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l)$, которые имеют случайный характер и ухудшают точность и стабильность измерений. Задача оценки параметров $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в этих условиях имеет стохастический характер и может быть сформулирована следующим образом. По наблюдаемой реализации случайного процесса $Z(t)$, являющейся смесью полезного сигнала $Y(t, X)$ и шума $\Xi(t)$: $Z(t) = Y(t, X) + \Xi(t)$ необходимо определить некоторым наилучшим образом, какое конкретное значение x_i^* принял измеряемый параметр x_i в этой реализации на интервале наблюдения $[0, T]$, при этом данная оценка должна быть несмещенной и эффективной:

$$M \{ x_i^* / x_i \} = 0, \quad D \{ x_i^* / x_i \} \Rightarrow \min,$$

где $M \{ \cdot \}$ и $D \{ \cdot \}$ – это математическое ожидание и дисперсия получаемой оценки соответственно.

Наиболее полные сведения о возможных значениях контролируемых параметров X даются апостериорной плотностью вероятностей $W_{ps}(X) = W \{ X / Z(t) \}$ [2]:

$$W_{ps}(X) = W_{pr}(X)W(Z/X) / \int_{\Theta} W_{pr}(X)W(Z/X)dX,$$

где $W_{pr}(X)$ – априорная плотность вероятностей оцениваемого параметра;

$W(Z/X)$ – функция правдоподобия;

Θ – область всех возможных значений контролируемого параметра.

Предлагается использовать байесовский подход к решению поставленной задачи, который основан на получении оценок контролируемых параметров, позволяющих минимизировать средний риск $R(X^*)$ принятия решения в пользу оценки X^* :

$$R(X^*) = \int_Z W(Z) \left[\int_{\Theta} C(X^*, X) W_{ps}(X) dX \right] dZ \Rightarrow \min_{X^*}, \quad (4)$$

где $C(X^*, X)$ – функция потерь от принятия решения.

Критерий (4) позволяет получать наилучшие оценки с точки зрения минимизации погрешности измерений, однако его применение связано с необходимостью иметь полную априорную информацию о контролируемом процессе, что в большинстве практических случаев затруднительно. Для преодоления таких трудностей предлагается использовать наименее предпочтительный вариант в виде равномерного априорного распределения оцениваемого параметра и простую функцию потерь $C(X^*, X) = 1 - \delta(X^* - X)$, где $\delta\{\cdot\}$ – импульсная функция Дирака. В этом случае средний риск записывается в виде $R(X^*) = 1 - W_{ps}(X)$ и задача минимизации среднего риска формулируется как задача максимизации апостериорной плотности вероятностей измеряемого параметра [3]:

$$W_{ps}(X) = W_{pr}(X)W(Z/X) / \int_{\Theta} W_{pr}(X)W(Z/X)dX \Rightarrow \max_{X^*}. \quad (5)$$

Задача оценки контролируемого параметра формулируется в виде классической задачи распознавания. В зависимости от конкретного значения вектора параметров $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ контролируемая среда находится в одном из множества классов состояний $S = (S_1, S_2, \dots, S_\nu)$. Контроль любого состояния будет заключаться в измерении всей совокупности параметров X , сопоставлении результатов измерений $Y(X)$ с областью допустимых значений и принятии решения о принадлежности контролируемого состояния к одному из заданных классов.

Предлагается подход к решению такой задачи в виде концепции представления результатов измерений контролируемых параметров Z как вектор-функции байесовских апостериорных вероятностей $[P\{S_k / Z_i(t)\}]$. Данные вероятности характеризуют степень принадлежности любого результата измерений $Z_i(t)$ к каждому из множества заданных классов:

$$[P\{S_k / Z_i(t)\}] = \left[\frac{P\{S_k\} \cdot P\{Z_i(t) / S_k\}}{\sum_{k=1}^{\nu} P\{S_k\} \cdot P\{Z_i(t) / S_k\}} \right], \quad i = \overline{1, n}; \quad k = \overline{1, \nu},$$

где $P\{S_k\}$ – априорная вероятность k -го класса состояний;

$P\{Z_i(t) / S_k\}$ – условная по k -му классу априорная вероятность i -той реализации Z .

Если упростить задачу распознавания и свести ее к двухальтернативной, то в этом случае состояние среды может принадлежать одному из двух классов: S_1 , когда в контролируемой среде отсутствуют отклонения от норм, и S_2 при наличии хотя бы одного отклонения. Решающее правило объективного распознавания в этом случае записывается в виде

$$P\{S_1 / Z_i(t)\} \underset{Z_i \in S_2}{\overset{Z_i \in S_1}{\geq}} P\{S_2 / Z_i(t)\}, \quad i = 1, 2.$$

Это правило принятия решения (критерий идеального наблюдателя) является оптимальным в том смысле, что в данном случае суммарная по всему пространству Z вероятность

ошибки является минимально возможной для любых разбиений пространства на классы по этому правилу и принципиально не уменьшаемой при распознавании состояний среды по единичной реализации измерений.

В силу случайного разброса значений параметров и погрешностей измерений при осуществлении контроля, а также из-за различных факторов, имеющих методический характер (неполнота контроля, невозможность учета взаимозависимости параметров и сопутствующих влияний, несовершенство выбранного метода, критериев и способов обработки данных измерений) результаты контроля Z имеют четыре исхода с вероятностями:

$$P\{S_1 / Z_1(t)\} = P_{\bar{0}/\bar{0}}^* = \frac{P\{S_1\} \cdot P\{Z_1(t) / S_1\}}{P\{S_1\} \cdot P\{Z_2(t) / S_1\} + P\{S_2\} \cdot P\{Z_2(t) / S_2\}};$$

$$P\{S_1 / Z_2(t)\} = P_{\bar{0}/\text{H}}^* = \frac{P\{S_1\} \cdot P\{Z_2(t) / S_1\}}{P\{S_1\} \cdot P\{Z_2(t) / S_1\} + P\{S_2\} \cdot P\{Z_2(t) / S_2\}};$$

$$P\{S_2 / Z_1(t)\} = P_{\text{H}/\bar{0}}^* = \frac{P\{S_2\} \cdot P\{Z_1(t) / S_2\}}{P\{S_1\} \cdot P\{Z_1(t) / S_1\} + P\{S_2\} \cdot P\{Z_1(t) / S_2\}};$$

$$P\{S_2 / Z_2(t)\} = P_{\text{H}/\text{H}}^* = \frac{P\{S_2\} \cdot P\{Z_2(t) / S_2\}}{P\{S_1\} \cdot P\{Z_2(t) / S_1\} + P\{S_2\} \cdot P\{Z_2(t) / S_2\}}.$$

При контроле одиночного параметра вероятность отсутствия или наличия отклонения по любому параметру x с плотностью распределения $W_1(x)$ определяется выражениями

$$P(S_1) = P_{\bar{0}} = \int_a^b W_1(x)dx; \quad P(S_2) = P_{\text{H}} = 1 - P_{\bar{0}} = \int_{-\infty}^a W_1(x)dx + \int_b^{+\infty} W_1(x)dx,$$

где $a = x_{\min}, b = x_{\max}$ – нижняя и верхняя допустимые границы изменения параметра x .

Если случайные погрешности измерений имеют плотность распределения $W_2(\varepsilon')$ и не зависят от измеряемых параметров, то априорные условные и безусловные вероятности правительных $P_{\bar{0}/\bar{0}}, P_{\bar{0}/\text{H}}, P_{\text{H}/\bar{0}}, P_{\text{H}/\text{H}}$, а также ошибочных $P_{\text{H}/\bar{0}}, P_{\bar{0}/\text{H}}, P_{\bar{0}/\text{H}}, P_{\text{H}/\text{H}}$ заключений о состоянии среды записываются в виде:

$$P_{\bar{0}/\bar{0}} = P\{S_1\} \cdot P\{Z_1(t) / S_1\} = \int_a^b W_1(x) \left(\int_a^b W_2(\varepsilon') d\varepsilon' \right) dx;$$

$$P_{\bar{0}/\text{H}} = P\{Z_1(t) / S_1\} = P_{\bar{0}/\bar{0}}^{-1} \left(\int_a^b W_1(x) dx \right); \quad P_{\text{H}/\text{H}} = P\{S_2\} \cdot P\{Z_2(t) / S_2\} =$$

$$= \int_{-\infty}^a W_1(x) \left(\int_{-\infty}^a W_2(\varepsilon') d\varepsilon' + \int_b^{+\infty} W_2(\varepsilon') d\varepsilon' \right) dx +$$

$$+ \int_b^{+\infty} W_1(x) \left(\int_{-\infty}^a W_2(\varepsilon') d\varepsilon' + \int_b^{+\infty} W_2(\varepsilon') d\varepsilon' \right) dx;$$

$$P_{\text{H}/\bar{0}} = P\{Z_2(t) / S_2\} = P_{\text{H}/\text{H}}^{-1} \left(1 - \int_a^b W_1(x) dx \right); \quad P_{\bar{0}/\text{H}} = P\{S_2\} \cdot P\{Z_1(t) / S_2\} =$$

$$= \int_a^b W_1(x) \left(\int_{-\infty}^a W_2(\varepsilon') d\varepsilon' + \int_b^{+\infty} W_2(\varepsilon') d\varepsilon' \right) dx; \quad P_{\bar{0}/\text{H}} = P\{S_1\} \cdot P\{Z_2(t) / S_1\} =$$

$$= \int_{-\infty}^a W_1(x) \left(\int_a^b W_2(\varepsilon') d\varepsilon' \right) dx + \int_b^{+\infty} W_1(x) \left(\int_a^b W_2(\varepsilon') d\varepsilon' \right) dx; \quad P_{\text{H}/\bar{0}} = P\{Z_1(t) / S_2\} =$$

$$= P_{\bar{0}/\text{H}}^{-1} \left(\int_a^b W_1(x) dx \right) = \alpha; \quad P_{\bar{0}/\text{H}} = P\{Z_2(t) / S_1\} = P_{\text{H}/\bar{0}}^{-1} \left(1 - \int_a^b W_1(x) dx \right) = \beta,$$

где $P_{\text{H}/\bar{0}} = \alpha$ – ошибка первого рода, связанная с ложным выявлением отклонения от нормы, а $P_{\bar{0}/\text{H}} = \beta$ – ошибка второго рода (пропуск имеющегося отклонения). Для оценки эффективности контроля предлагается использовать два вида показателей: $D'_1 = 1 - \alpha - \beta$, если все ошибки одинаково важны, и $D'_2 = 1 - \beta$, максимально учитывающий вероятность ошибки второго рода, при этом ошибка первого рода ограничивается в допустимых пределах: $\alpha \leq A$.

В [1] выполнен расчет и приведены графические зависимости вероятностей ошибок первого и второго родов от среднеквадратических отклонений измеряемого параметра σ_x и

погрешности его измерения $\sigma_{\varepsilon'}$, а также от величины допуска на контролируемый параметр $d_x = |x_{\max} - x_{\min}|$. Эти зависимости рассчитаны для нормального и равномерного законов распределений $W_1(x)$, $W_2(\varepsilon')$, поэтому позволяют оценить диапазон значений достоверности контроля параметров: ошибки измерений будут максимальны для равномерного и минимальны для нормального законов распределения.

Для оценки достоверности с помощью введенных показателей D'_1 и D'_2 прежде всего необходимо определить повышение точности измерений за счет применения двухпараметрового метода резонансного контроля. Из графиков на рисунке 1 можно сделать вывод, что использование фазовой характеристики измерительного преобразователя для принятия решения о наступлении резонанса позволяет существенным образом (более 30 % в условиях повышенных потерь) уменьшить погрешность резонансных измерений. Это эквивалентно пропорциональному уменьшению соотношения $\sigma_{\varepsilon'}/\sigma_x$ и снижению вероятностей ошибок контроля [4].

С учетом уменьшения $\sigma_{\varepsilon'}/\sigma_x$ выполнен расчет относительного увеличения достоверности резонансного контроля за счет применения двухпараметрового метода. На рисунках 2, а, б приведены графики зависимости $\Delta D'/D'$ для введенных показателей достоверности: D'_1 (рис. 2, а) и D'_2 (рис. 2, б). Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что наибольшая эффективность двухпараметрового метода резонансного контроля достигается в условиях повышенной активной проводимости контролируемого материала, когда оценка резонансной частоты по амплитудной характеристике дает максимальную погрешность измерений [5].

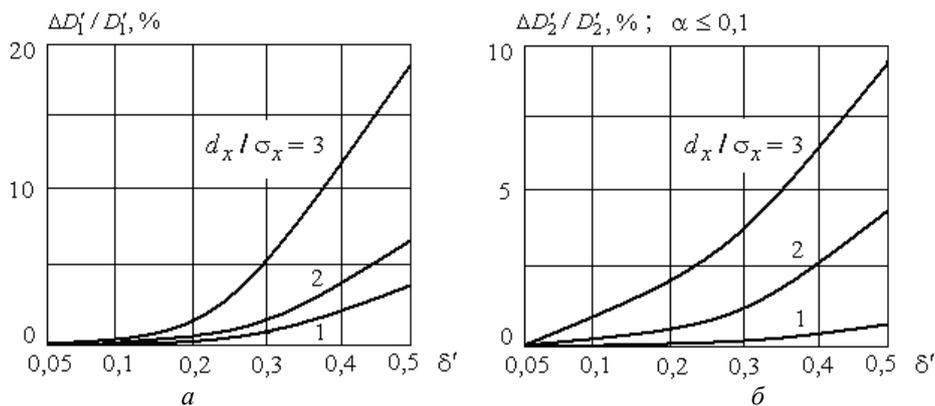


Рисунок 2 – Графики изменения достоверности двухпараметрового резонансного контроля

Применение байесовского подхода при получении оценок контролируемых величин позволит повысить точность измерений за счет двухпараметрового метода резонансного контроля, когда измеренные значения одного параметра контролируемой величины (например, амплитуды), используются для получения априорного распределения этой величины. Это дает возможность уточнить апостериорную вероятность контролируемой величины за счет измерения второго параметра (фазы или частоты) сигнала и увеличить достоверность резонансного контроля с использованием критерия (5).

С учетом полученных результатов может быть предложен следующий алгоритм обработки измерительной информации при двухпараметровом резонансном контроле. По амплитудной характеристике измерительной системы выполняется предварительная оценка контролируемого параметра, а с помощью фазовой характеристики рассчитываются его различные апостериорные оценки, после чего из множества апостериорных значений выбирается наиболее вероятное, что и будет являться наиболее достоверным результатом контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисичкин, В.Г. Резонансные измерения параметров окружающей среды: монография / В.Г. Лисичкин. – Орел: Изд-во Академии ФСО России. – 2011. – 286 с.
2. Тихонов, В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь. – 1991. – 608 с.

3. Куликов, Е.И. Методы измерений случайных процессов / Е.И. Куликов. – М.: Радио и связь. – 1986. – 296 с.
4. Иванов, Б.Р. Снижение погрешности измерений и потребляемой мощности в приборах резонансного контроля / Б.Р. Иванов, В.Г. Лисичкин // Измерительная техника, № 1, 2012. – С. 66 – 70.
5. Лисичкин, В.Г. Двухпараметровый прибор резонансного контроля влажности / В.Г. Лисичкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, ОрелГТУ, № 2 (286), 2011. – С. 134 – 140.

Иванов Борис Рудольфович

Академия ФСО России, г. Орел

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Электроника и теория связи"

Тел. (4862) 42-08-92

Лисичкин Владимир Георгиевич

Академия ФСО России, г. Орел

Доктор технических наук, доцент, доцент кафедры "Электроника и теория связи"

Тел. (4862) 47-00-96

E-mail: lisichkin-vg@rambler.ru

Лисичкин Михаил Александрович

Концерн "СОЗВЕЗДИЕ", г. Воронеж

Инженер

Тел (4732) 31-08-15

B.R. IVANOV, V.G. LISICHKIN, M.A. LISICHKIN

**RELIABILITY ESTIMATION OF TWO-PARAMETER
RESONANCE CONTROL**

The approach to control efficiency estimation under random noise conditions in the system of hierarchical characteristics is presented. It is specially noted, that Bayesian framework allows to estimate the reliability of two-parameter resonance control results depending on measurement accuracy.

Keywords: two-parameter resonance control, measurement accuracy, reliability estimation.

BIBLIOGRAPHY

1. Lisichkin, V.G. Rezonansnye izmerenija parametrov okruzhajushhej sredy: monografija / V.G. Lisichkin. – Орел: Izd-vo Akademii FSO Rossii. – 2011. – 286 s.
2. Tihonov, V.I. Statisticheskij analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustrojstv i sistem / V.I. Tihonov, V.N. Harisov. – М.: Радио и связь. – 1991. – 608 s.
3. Kulikov, E.I. Metody izmerenij sluchajnyh processov / E.I. Kulikov. – М.: Радио и связь. – 1986. – 296 s.
4. Ivanov, B.R. Snizhenie pogreshnosti izmerenij i potrebljaemoj moshhnosti v priborah rezonansnogo kontrolja / B.R. Ivanov, V.G. Lisichkin // Izmeritel'naja tehnika, № 1, 2012. – S. 66 – 70.
5. Lisichkin, V.G. Dvuhparametrovyj pribor rezonansnogo kontrolja vlazhnosti / V.G. Lisichkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, OrelGTU, № 2 (286), 2011. – S. 134 – 140.

Ivanov Boris Rudol'fovich

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of department "Electronics and communication theory"

Tel. (4862) 42-08-92

Lisichkin Vladimir Georgievich

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol

Doctor of Technical Sciences, associate professor, associate professor of department "Electronics and communication theory"

Tel. (4862) 47-00-96

E-mail: lisichkin-vg@rambler.ru

Lisichkin Mihail Alexandrovich

Concern "Constellation", Voronezh

engineer

Tel. (4732) 31-08-15

Е.Б. АНДРОСОВА, В.В. МИШИН

МЕТОД И СРЕДСТВО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКА С УЧЁТОМ ВИБРОУДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕЦ И ТЕЛ КАЧЕНИЯ

В данной статье рассматривается метод диагностирования подшипников качения с учётом виброударных процессов, происходящих в рабочей зоне трения. А также описано средство диагностирования, реализующее метод.

Ключевые слова: метод и средство диагностирования, ударное взаимодействие, электрический импульс, электрическое сопротивление, частота.

ВВЕДЕНИЕ

Для подшипников качения вибрация и шум являются их неотъемлемым свойством [1]. Следствием соударения тела качения с кольцом подшипника является контактный резонанс, так как контакт действует, как пружина с переменной жесткостью, увеличивающейся с увеличением нагрузки, который аномально повышает интенсивность пластической деформации и накопление повреждаемости.

Характер прилагаемой нагрузки ко всем деталям подшипника различен, но общий срок службы зависит от работоспособности каждой из них [1]. При тяжёлых условиях работы срок службы подшипника значительно снижается. Выявление наличия виброударных процессов и граничного режима работы смазки при диагностировании подшипника даёт возможность определения остаточного ресурса работы.

Метод диагностирования построен на следующих принципах:

- механический износ элементов шарикоподшипника в рабочей зоне в основном происходит в те интервалы времени, когда смазочная плёнка становится тоньше микровыступов на рабочих поверхностях;
- качение тел по кольцам сопровождается проскальзыванием, при котором происходит разрушение эластогидродинамического смазочного слоя;
- по наличию длительных по времени разрывов масляной плёнки можно судить о наличии проскальзывания и ударного взаимодействия контактирующих поверхностей;
- взаимодействия соприкасающихся поверхностей в моменты входа трибосопряжения в зону проскальзывания и выхода из нее могут носить ударный характер.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Для получения диагностической информации из зон трения подшипника используется сигнал электрического сопротивления [2,3], представленный в виде функции изменения электрического сопротивления $R(t)$ во времени. Для получения функции $R(t)$ путем инструментального измерения мгновенных значений электрического сопротивления подшипника применяется измерительная цепь, структурная схема которой показана на рисунке 1. При измерении сигнала электрического сопротивления подшипник (1) с помощью токосъемника (2) включаются в электрическую цепь, состоящую из источника (3) постоянного напряжения, ограничительного резистора (4) и регистрирующего устройства (5). Функция $R(t)$ образуется как совокупность мгновенных значений сопротивления, зарегистрированных с заданным периодом

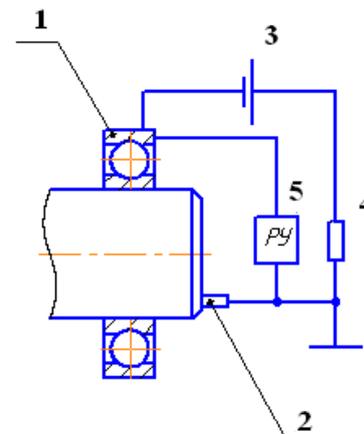


Рисунок 1 – Схема измерительной цепи
 1 – подшипник; 2 – токосъемник;
 3 – источник постоянного напряжения;
 4 – регистрирующее устройство

дискретизации за некоторое время измерения, определяемое регистрирующим устройством.

Предлагаемый электрический метод диагностирования, учитывающий виброударные взаимодействия деталей подшипника, основан на том, что электрический сигнал, пропорциональный сопротивлению подшипника, содержит импульсы в виде резкого уменьшения сопротивления до заранее установленного уровня ($0,25R_{\max}$, $0,5R_{\max}$, $0,75R_{\max}$) с наличием колебательной составляющей, которые несут информацию о процессах, происходящих в рабочей зоне подшипника, т.е. непосредственно о проскальзывании и ударных взаимодействиях колец и тел качения.

Характеризовать эти импульсы целесообразно отдельными локальными значениями. Для этого наиболее часто используют следующие параметры: длительность импульса τ , максимальное амплитудное значение импульса, среднее значение импульса за время и среднеквадратичное значение импульса за то же время, длительность колебательной составляющей, полную энергию импульса. Следует отметить, что значение каждого параметра отдельного импульса необходимо считать случайной величиной и при обработке диагностической информации использовать методы работы со случайными величинами и методы математической статистики. Необходимо учитывать то, что в функции сопротивления также будет иметься детерминированная составляющая, определяемая макровзаимодействием деталей подшипника.

Характер функции сопротивления $R(t)$, вызванный случайным изменением фактической площади контакта [3,4] и числа вероятных контактов в пятне касания тела и дорожки качения, от которых зависит и длительность импульсов [5] и наличием колебательных процессов в зоне трения, определяет случайную составляющую. Средняя длительность импульса за время измерения:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{j=1}^N \tau_j}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N (t_{kj} - t_{hj})}{N}, \quad (1)$$

где τ_j – длительность j -го импульса;

N – количество исследованных импульсов.

При анализе процессов, происходящих в работающем подшипнике, можно предположить, что детерминированные составляющие должны иметь определенный период. Это основано на том, что при работе подшипника через некоторое время все его детали условно принимают исходное положение. Т.е. электрические импульсы резкого падения сопротивления при проскальзывании будут появляться на определённых частотах.

В первом приближении детерминированные частотные составляющие можно определить следующим образом.

Частота перекатывания тел качения по наружному кольцу [6]:

$$f_{\text{ТК-нар}} = \frac{1}{2} \cdot f_{\text{В}} \cdot z \cdot \left(1 - \frac{d_{\text{Ш}}}{d_{\text{сеп}}} \cdot \cos \gamma\right), \quad (2)$$

где $d_{\text{Ш}}$ – диаметр шарика подшипника;

$d_{\text{сеп}}$ – диаметр сепаратора;

z – число тел качения подшипника;

$f_{\text{В}}$ – частота вращения вала.

Частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу [2]:

$$f_{\text{ТК-вн}} = \frac{1}{2} \cdot f_{\text{В}} \cdot z \cdot \left(1 + \frac{d_{\text{Ш}}}{d_{\text{сеп}}} \cdot \cos \gamma\right). \quad (3)$$

Частота вращения сепаратора [2]:

$$f_{\text{сеп}} = \frac{1}{2} \cdot f_{\text{В}} \cdot \left(1 - \frac{d_{\text{Ш}}}{d_{\text{сеп}}} \cdot \cos \gamma\right). \quad (4)$$

На рисунке 2, в качестве примера, показаны сигналы электрического сопротивления, снимаемого с подшипника качения с разными по длительности импульсами.

Как видно из примера диаграмм, сигнал электрического сопротивления изменяется в широких пределах (динамический диапазон более двух порядков), при этом наличествуют импульсы сопротивления как амплитудными изменениями до уровней $0,25R_{\max}$, $0,5R_{\max}$, $0,75R_{\max}$, так и с наличием колебательной составляющей. Оценивая вид, длительность и другие локальные параметры таких импульсов можно определить наличие в работающем подшипнике режима проскальзывания и виброударного взаимодействия контактирующих поверхностей. Так же предлагается при диагностировании подшипника выполнять разделение импульсов сопротивления (контактирования) по длительности с учетом гипотезы: импульсы контактирования длительностью более чем время смены половины контактной площадки (сотни микросекунд в зависимости от кинематики подшипника) относятся к микропроскальзыванию или к виброударному типу; импульсы контактирования длительностью менее времени смены контактной площадки (эллипса контакта) относятся к взаимодействию микронеровностей; импульсы с наличием колебательной составляющей и значительной длительностью относятся к импульсам виброударного типа.

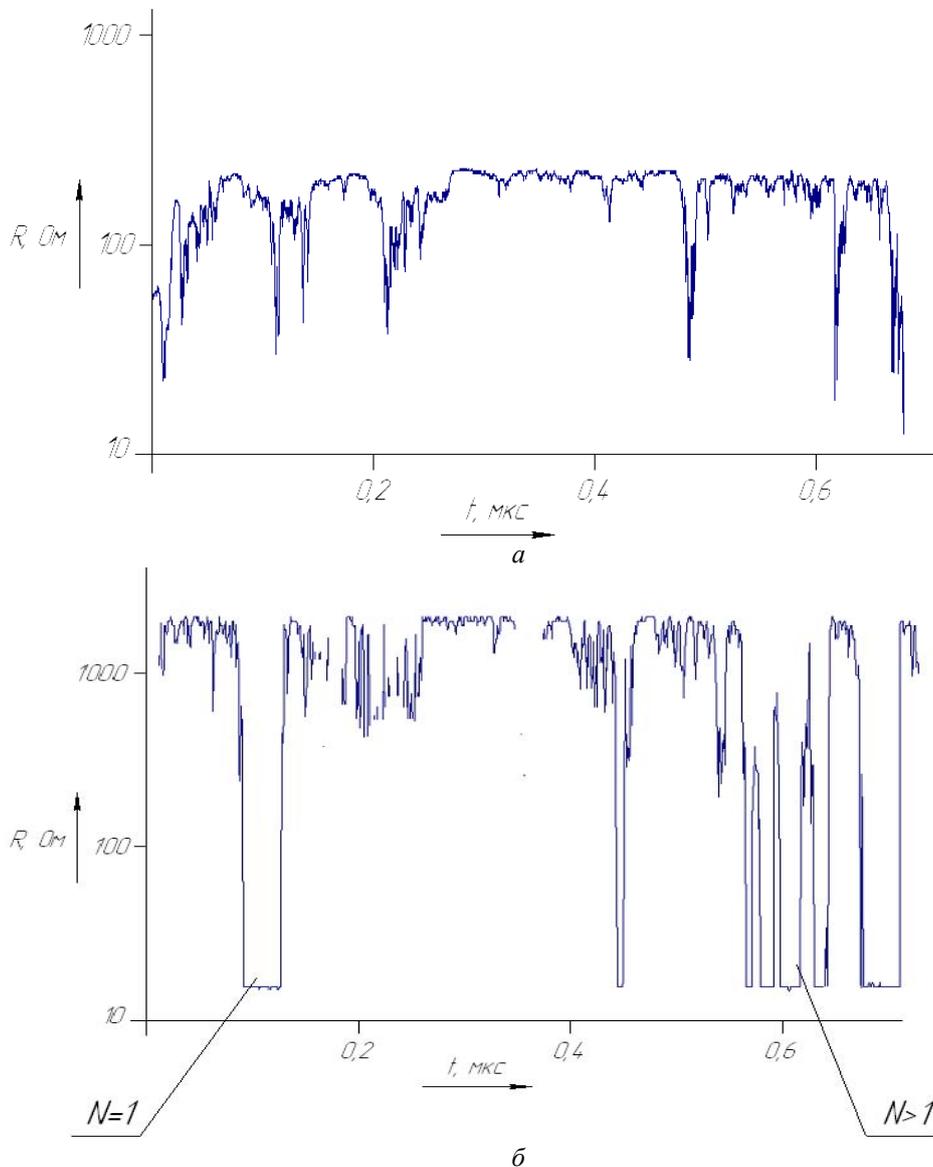


Рисунок 2 – Графики функции электрического сопротивления подшипника с наличием импульсов резкого падения $N=1$ сопротивления с переменной длительностью и наличием колебательной составляющей

СРЕДСТВО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Предлагаемая структура измерения и анализа сигнала сопротивления, учитывающего вышеуказанный подход, представлена на рисунке 3 (а, б). Входной величиной для схемы является сопротивление подшипника R_{Π} , при этом кольца подшипника (эквивалентное сопротивление подшипника) включены в мостовую схему 2. Сопротивление резисторов моста выбрано таким образом, чтобы со стороны входа цепи обеспечивалось малое входное сопротивление с согласованным кабелем для подключения устройства к исследуемому подшипнику, согласование выполняется на уровне 50 Ом. Питание моста для обеспечения его стабильной работы осуществляется от транзисторного источника тока. Как известно, подшипник помимо постоянных флуктуаций сопротивления является ещё и генератором ЭДС.

Источники ЭДС весьма разнообразны, например: термоЭДС, трибоЭДС, статическое электричество и пр. Суммарная ЭДС через кабель поступает с подшипника на вход цепи. Сюда же поступают дополнительные составляющие напряжения (ЭДС), определяемые наводками на кабель, корпус устройства и в других цепях. Низкое сопротивление входной цепи устройства в значительной степени подавляет действие помех и наводок, однако, для полной уверенности в отсутствии влияния наводок и составляющих ЭДС с подшипника на результаты измерения в цепи предусмотрен режим контроля влияния помехи. Он реализован в виде холостой (при отключенном подшипнике) записи сигнала сопротивления и последующем удалении из общего сигнала данной составляющей (на структурной схеме блок подавления помехи условно не показан, т.к. схема может быть выполнена в виде виртуального прибора на ЭВМ). Согласование цепей по входному сопротивлению и обеспечение низкоомного входа так же снижает влияние паразитных ЭДС.

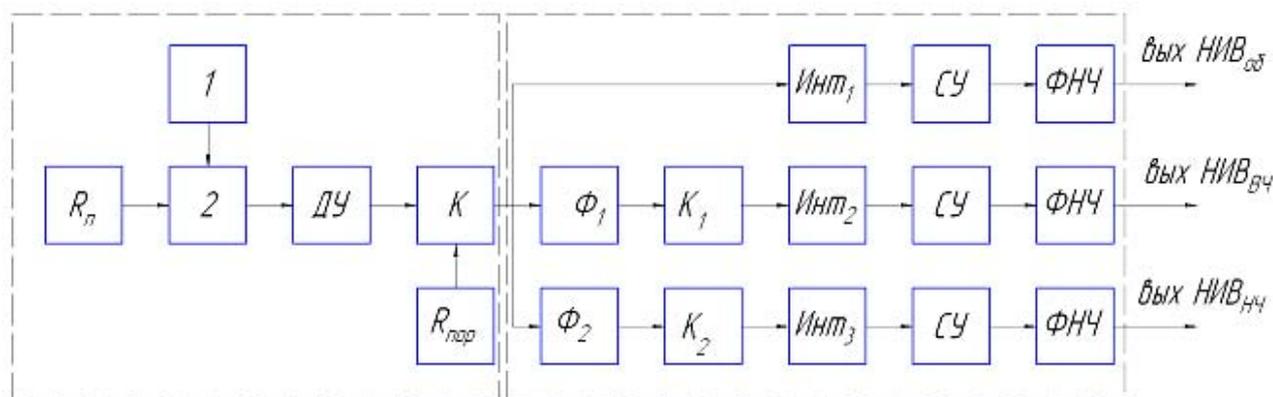


Рисунок 3 – Схема средства диагностирования

*1 – источник тока; 2 – мостовая схема; ДУ – дифференциальный усилитель;
К – компаратор; Φ_1 , Φ_2 – фильтры НЧ и ВЧ; СУ – согласующее устройство;
ФНЧ – выходной фильтр низких частот*

Сопротивление подшипника может изменяться в значительных пределах (до десятков мегаом), и соответственно при больших значениях R_{Π} возможно увеличение напряжения на нём. Дифференциальный усилитель, предназначенный для усиления дифференциального выходного напряжения моста и приведения этого напряжения в удобный для дальнейшей обработки вид относительно общей точки, реализованном на высокочастотном операционном усилителе. Так как исследуются импульсные сигналы сопротивления (проводимости) подшипника, то основной характеристикой операционного усилителя для данной схемы является скорость нарастания выходного напряжения. Выбор большого значения скорости нарастания позволит сохранить фронты импульсов сопротивления. Для рассматриваемой схемы предлагается применять интегральную микросхему АД812 (или аналогичную) – сдвоенный операционный усилитель с единичной полосой пропускания 145 МГц и скоростью нарастания 1600 В/мкс, что с учетом изменения амплитудно-частотной характеристики при наложении обратных связей на операционный усилитель, позволит исследовать импульсы

контактирования длительностью в единицы микросекунд практически без потери их фронта в канале усиления. Дифференциальный усилитель построен по классической схеме.

Информативным параметром при анализе импульсов контактирования является их длительность, которая выделяется с помощью компаратора, построенного на быстродействующем ОУ. В качестве ОУ можно применить также AD812 или AD8055. При значении сопротивления подшипника в диапазоне от 0 Ом до 100 Ом на выходе схемы должна быть сформирована логическая 1 (высокий уровень сигнала). В диапазоне R_{Γ} от 100 Ом до ∞ выход схемы должен иметь низкий уровень. Порог срабатывания компаратора может изменяться в зависимости от условий проведения эксперимента в соответствии с предлагаемым методом (например, $0,25R_{\max}$, $0,5R_{\max}$, $0,75R_{\max}$). Предлагаемое средство диагностирования позволяет исследовать импульсы контактирования с длительностью в доли микросекунды. Экспериментально подтверждена работоспособность схемы для $\tau_{\Gamma} = 0,2$ мкс.

Для разделения импульсов контактирования в схеме предусмотрен селектор импульсов, состоящий из фильтров $\Phi_{1,2}$ и компараторов $K_{1,2}$, которые разделяют импульсы с компаратора К по длительности в зависимости от частотных характеристик фильтров. Компараторы $K_{1,2}$ формируют фронты и амплитуды импульсов для подсчета их обобщенной длительности с помощью интеграторов $\text{Инт}_{1,3}$, которые в аналоговом виде определяют относительную за время интегрирования длительность импульсов контактирования продолжительных НЧ и коротких ВЧ импульсов. Варьируя порогом срабатывания компаратора К и частотными характеристиками фильтров $\Phi_{1,2}$ можно исследовать любые импульсы контактирования и производить их классификацию по длительности и амплитуде.

ВЫВОДЫ

1. В подшипнике качения при контактировании его деталей, в зонах трения возможно микропроскальзывание и наличие виброударного режима взаимодействия контактирующих поверхностей деталей.

2. Предложенный подход к анализу сигнала электрического сопротивления позволяет оценить обобщенную длительность режима проскальзывания и ударных взаимодействий в подшипнике.

3. Разделение по длительности импульсов контактирования, применяемое в схеме средства диагностирования, расширяет возможности известного метода диагностирования, основанного на измерении параметра НИВ [1].

Работа выполнена в рамках Государственного задания 7.2668.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичинадзе, А.В. Справочник по триботехнике [Текст]. В 3 т. Т1. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения [текст] / А. В. Чичинидзе.; Под общ. ред. М. Хебды. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.: ил.
2. Мишин, В.В. Математическая диагностическая модель электрического сопротивления подшипника качения с учетом фактора пластической деформации микронеровностей в процессе приработки [текст] / В.В. Мишин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* — Орёл: ОрёлГТУ. – 2009. – № 4. – С. 93-100.
3. Мишин, В.В. Исследование работы подшипника по параметрам его электрического сопротивления [текст] / В.В. Мишин, К.В. Подмастерьев, В.В. Семенов, М.В. Майоров, В.Н. Чернышов, А.В. Селихов, К.В. Шаталов // *Известия ОрёлГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 5-2. – С. 108-116.
4. Чернышов, В.Н. Исследование закона распределения активного сопротивления подшипника при различных режимах трения [Текст] / В.Н.Чернышов, В.В. Мишин, А.В. Селихов, Н.В. Рыбакова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 6. – С. 143-149.
5. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения. [Текст]./Подмастерьев К.В. – М.: Машиностроение-1. – 2001. – 367 с.
6. Перель, Л.Я. Подшипники качения [Текст]. – Справочник./ Перель, Л.Я., Филатов А.А. – М.: Машиностроение. – 1992. – 608 с.

Андросова Елена Борисовна

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел

Научный сотрудник кафедры «ПМиС»

E-mail: lessi007@mail.ru

Мишин Владислав Владимирович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, проф. кафедры «ПМиС»

E-mail: vlad89290@gmail.com

E.B. ANDROSOVA, V.V. MISHIN

METHOD AND MEANS FOR DIAGNOSTIC BEARINGS WITH VIBRO-IMPACT BY INTERACTION RINGS AND ROLLING ELEMENTS

This article discusses the method developed diagnostics of rolling bearings based on vibro-impact processes occurring in the working area of friction. And also described a means of diagnosing, implementing the method.

Keywords: *the method and means of diagnosis, impact interaction, electrical pulse, the electrical resistance, frequency.*

BIBLIOGRAPHY

1. Chichinadze, A.V. Spravochnik po tribotekhnike [Tekst]. V 3 t. T1. Smazochnye materialy, tekhnika smazki, opory skol'zhenija i kachenija [tekst] / A. V. Chichinidze.; Pod obshh. red. M. Hebdy. – M.: Mashinostroe-nie, 1990. – 416 s.: il.
2. Mishin, V.V. Matematicheskaja diagnosticheskaja model' jelektricheskogo soprotivlenija podshipnika kachenija s uchetom faktora plasticheskoi deformacii mikronerovnostej v processe prirabotki [tekst] / V.V. Mishin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii» — Orjol: OrjolGTU. – 2009. – № 4. – S. 93-100.
3. Mishin, V.V. Issledovanie raboty podshipnika po parametram ego jelektricheskogo soprotivlenija [tekst] / V.V. Mishin, K.V. Podmaster'ev, V.V. Semenov, M.V. Majorov, V.N. Chernyshov, A.V. Selihov, K.V. Shatalov //Izvestija OrjolGTU. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii. – 2010. – № 5-2. – S. 108-116.
4. Chernyshov, V.N. Issledovanie zakona raspredelenija aktivnogo soprotivlenija podshipnika pri raz-lichnyh rezhimah trenija [Tekst] / V.N.Chernyshov, V.V. Mishin, A.V. Selihov, N.V. Rybakova // Fundamental'-nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii. – 2012. – № 6. – S. 143-149.
5. Podmaster'ev, K.V. Jelektroparametricheskie metody kompleksnogo diagnostirovanija opor kachenija. [Tekst]./Podmaster'ev K.V. – M.: Mashinostroenie-1. – 2001. – 367 s.
6. Perel', L.Ja. Podshipniki kachenija [Tekst]. – Spravochnik./ Perel', L.Ja., Filatov A.A. – M.: Mashinostroenie. – 1992. – 608 s.

Androsova Elena Borisovna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Research associate of "Instrumentation, Metrology and Certification" chair

E-mail: lessi007@mail.ru

Mishin Vladislav Vladimirovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of Technical Sciences, professor of "Instrumentation, Metrology and Certification" chair

E-mail: vlad89290@gmail.com

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей.

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
 - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
 - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
 - не применять произвольные словообразования;
 - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.gu-unprk.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес учредителя

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 42-00-24
Факс (4862) 41-66-84
www.gu-unpk.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Григорьева О.Ю.
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 14.09.2013 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 11.
Тираж 600 экз.
Заказ № 133/13П2

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.