

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.П. д-р техн. наук, проф.
Константинов П.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.

Редакция

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-кор. 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, 43-48-90
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, 2012

Содержание

Естественные науки

| | |
|--|----|
| <i>Шадрин И.Ф.</i> Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры..... | 3 |
| <i>Корнеев А.Ю.</i> Влияние фазового состояния смазочного материала на статические характеристики конических подшипников скольжения..... | 10 |
| <i>Витковский И.В., Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С., Якушина С.И.</i> Метод расчета формы тяжелой капли и ее поверхностного натяжения..... | 16 |
| <i>Потураева Т.В., Брума Е.В.</i> Закон распределения модуля двухмерного вектора..... | 24 |
| <i>Морев П.Г., Фёдоров Т.В.</i> Экстремальная задача с сингулярным решением..... | 31 |
| <i>Кузнецов Е.В.</i> Синергетические принципы самоорганизации пластической деформации твёрдых кристаллических тел..... | 38 |

Моделирование технологических процессов

| | |
|--|----|
| <i>Колесников Г.Н., Васильев С.Б.</i> Математическая модель технологического процесса фракционирования полидисперсного сыпучего материала методом рассева на установках с ярусной компоновкой сит..... | 42 |
|--|----|

Конструирование, расчеты, материалы

| | |
|--|----|
| <i>Батыщев Д.Ю., Старченко И.Е.</i> Система управления битопливным двигателем..... | 50 |
| <i>Земляков Н.В.</i> Энергосберегающий осевой вентилятор..... | 54 |

Машиностроительные технологии и инструменты

| | |
|---|----|
| <i>Доронин О.Н.</i> Особенности электронской обработки белого чугуна электродными материалами марки СТМ..... | 58 |
| <i>Козлов А.М., Кирющенко Е.В.</i> Технологическое обеспечение точности фрезерной обработки крупногабаритных деталей..... | 65 |
| <i>Копылов Ю.Р., Гордиенко Е.П.</i> Формирование требований к технологиям виброударного упрочнения авиационных деталей..... | 74 |
| <i>Носенко С.В., Полянчиков Ю.Н., Носенко В.А., Кременецкий Л.Л.</i> Нарботка и режущая способность на переходном этапе глубинного шлифования кругом прямого профиля..... | 80 |
| <i>Песин М.В.</i> Повышение долговечности и надежности нефтегазопромыслового и бурового оборудования..... | 86 |

Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

| | |
|---|----|
| <i>Некрасов Ю.Н.</i> Контроль пороков ткани телевизионно-стробоскопическим методом..... | 90 |
| <i>Галаган В.В., Дронов С.Н., Белкина Н.Е.</i> Исследование математической модели прогнозирования конечных результатов процесса хлебопечения..... | 94 |

Приборостроение и биотехнические системы

| | |
|--|-----|
| <i>Распопов В.Я.</i> Инерциальные датчики и системы ориентации, стабилизации и навигации..... | 98 |
| <i>Селыхов А.В., Майоров М.В., Чернышов В.Н., Мишин В.В.</i> Система контроля качества опоры качения..... | 108 |
| <i>Никитин А.В., Солдаткин В.В.</i> Стартовая система измерения параметров ветра и составляющих вектора воздушной скорости одновинтового вертолета..... | 113 |
| <i>Смерек В.А., Зольников В.К., Ачкасов А.В.</i> Методы повышения производительности работы микроконтроллеров. Первый отечественный 16-разрядный микроконвертер..... | 122 |
| <i>Бондарева Л.А., Шошина Л.А.</i> Использование биомониторинга при диализной терапии и оценке адекватности диализа..... | 128 |
| <i>Дрёмин В.В., Жеребцов Е.А., Дунаев А.В.</i> Оценка уровня сигнала методом Монте-Карло при лазерной флуоресцентной диагностике биоткани..... | 134 |

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

| | |
|--|-----|
| <i>Коновалов Н.Н., Мелешко Н.В.</i> Примеры визуализации несплошностей в односторонних стыковых сварных соединениях при ультразвуковом контроле дефектоскопом с антенной решеткой..... | 140 |
|--|-----|



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

№ 3 (293) 2012
May-June

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 Chosse, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
43-48-90
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency
of supervision in sphere of
communication, information technol-
ogy 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, 2012

Contents

Natural science

| | |
|---|----|
| <i>Shadrin I.F.</i> Hard rods on a two-dimensional surface. Clusters..... | 3 |
| <i>Korneyev A.Yu.</i> The phase state effect of lubricant on the static characteristics of the conical bearings..... | 10 |
| <i>Vitkovskij I.V., Frolenkova L.YU., Shorkin V.S., Yakushina S.I.</i> The calculation method of the form of heavy drops and its surface tension..... | 16 |
| <i>Poturayeva T.V., Bruna E.V.</i> The law of distribution of the module of a two-dimensional vector.... | 24 |
| <i>Morev P.G., Fedorov T.V.</i> An extremal problem with singular solution..... | 31 |
| <i>Kuznetsov E.V.</i> Synergetic principles of self-organization of plastic deformation of solid crystalline bodies..... | 38 |

Process modeling

| | |
|--|----|
| <i>Kolesnikov G.N., Vasilyev S.B.</i> Mathematical simulation of free-flowing bulk polydisperse materials fractioning process by means of tiered packaged screens..... | 42 |
|--|----|

Construction, calculation, material

| | |
|--|----|
| <i>Batishhev D.Y., Starchenko I.E.</i> Control system of engine on the two fuel..... | 50 |
| <i>Zemlyakov N.V.</i> Development of a series of energy-efficient equipment..... | 54 |

Machine building technology and toolware

| | |
|---|----|
| <i>Doronin O.N.</i> Features of electro-spark deposition treatment of white cast iron by electrode materials mark Stim..... | 58 |
| <i>Kozlov A.M., Kiryushchenko E.V.</i> Technological support of large-sized details milling accuracy..... | 65 |
| <i>Kopylov Y.R., Gordienko E.P.</i> Formation of demands on vibro-impact hardening aircraft parts.... | 74 |
| <i>Nosenko S.V., Polyanchikov Y.N., Nosenko V.A., Kremetskiy L.L.</i> Laws of changing some of reliability indexes of deep grinding and effect of workpiece's length during transitional stage..... | 80 |
| <i>Pesin M.V.</i> Maintenance of accuracy of the form of the contact surface of details with technological methods..... | 86 |

Machine, apparatus, technology light and food industry

| | |
|---|----|
| <i>Nekrasov Yu.N.</i> Control of defects of the fabric by the television and stroboscopic method..... | 90 |
| <i>Galagan V.V., Dronov S.N., Belkina N.E.</i> Research of mathematical model of forecasting of the end results of process of hlebopecheny..... | 94 |

Instrument making and biotechnological system

| | |
|--|-----|
| <i>Raspopov V.Ya.</i> Inertial sensors and systems of orientation, stabilization and navigation..... | 98 |
| <i>Selihov A.V., Mayorov M.V., Chernyshov V.N., Mishin V.V.</i> Quality control system of support rolling..... | 108 |
| <i>Nikitin A.V., Soldatkin V.V.</i> Starting system for measuring the parameters of wind and air velocity vector components single-rotor helicopter's..... | 113 |
| <i>Smerek V.A., Zolnikov V.K., Achkasov A.V.</i> Methods of increase of productivity of operation of microcontrollers. First domestic 16-digit microconverter..... | 122 |
| <i>Bondareva L.A., Shoshina L.A.</i> The use of biomonitoring in dialysis therapy and evaluation of the adequacy of dialysis..... | 128 |
| <i>Dremin V.V., Zhrebtsov E.A., Dunaev A.V.</i> Assessment of the signal level during laser fluorescent diagnostics by the Monte-Carlo method..... | 134 |

Tests, control, diagnostics and quality control

| | |
|--|-----|
| <i>Kononov N.N., Meleshko N.V.</i> Defects visualization examples in unilateral butt welded at flaw detection with antenna array ultrasonic testing..... | 140 |
|--|-----|

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 541.64:539.199

И.Ф. ШАДРИН

ЖЁСТКИЕ СТЕРЖНИ НА ДВУМЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ. КЛАСТЕРЫ

Компьютерное моделирование методом Монте-Карло использовано для изучения локальной структуры в системе твёрдых стержней, находящихся на плоской (2D) поверхности. Поведение системы изучалось при разных концентрациях стержней. В работе вводятся кинематический и структурообразующий элемент – кластер, состоящий из группы стержней, отбираемых по определённым критериям. Функция распределения кластеров по размерам описывается экспонентой от числа стержней в нём, параметры которой зависят от концентрации стержней в системе.

Ключевые слова: жёсткие стержни, 2D-поверхность, кластер, структурообразование.

ВВЕДЕНИЕ

Из классических работ [1, 2] известно, что дальний порядок в двумерных системах невозможен из-за неограниченного роста тепловых флуктуаций направлений директора ориентации и расходимость является логарифмической. Взаимодействие вытянутых тел с жестким ядром взаимодействия, может образовывать не только нематическую, но и более упорядоченную смектическую и столбчатую фазы. В отсутствие сил притяжения поведение систем твердых тел описывается энтропийным взаимодействием. Поэтому баланс между ориентационными, позиционными и энтропийной упаковкой определяет поведением фаз тел с жестким ядром взаимодействия жидкокристаллических систем. Из работы [3] и цитируемой ею аналитических трудов [4-7, 8-10, 11-13] следует существование мезофаз и фазовый переход второго рода в 2D-системах, но в этих работах не учитываются флуктуации. Например, средне-полевые теории не в состоянии объяснить наличие "квази-дальнего порядка", но они широко используются для многих систем, поскольку различием между истинным и "квази-дальним порядком" можно пренебречь из-за ограниченности размеров моделируемых систем и времени моделирования. В работах по численному моделированию, например: из твёрдых игл [14, 4-7], твёрдых эллипсов [15, 9, 10, 16], прямоугольников [17, 9, 11, 12], твёрдых дископрямоугольников [18, 11, 13], показано, что в 2D-системах имеется алгебраически затухающий квази-дальний ориентационный порядок нематической фазы [14, 15, 18].

Наша работа направлена на изучение локальной структуры в 2D-системах анизотропных частиц и уточнение морфологической структуры в 2D-системах посредством введения кинематического и структурообразующего элемента – кластера. Кластер – это образование из рядом расположенных стержней, отбираемых по определённым критериям, причём кластеры можно видеть и при низких, и при больших концентрациях стержней. Некоторые мезофазы в 2D-системах анизотропных частиц можно описать через иерархию кластеров различной степени «плотности и упорядоченности».

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Нами исследовалась континуальная двумерная система твёрдых стержней (дископрямоугольников) с осевыми отношениями $L/D = 6, 15, 30$, между которыми имеется только объёмно-топологическое взаимодействие, что является характерным для лиотропных жидких кристаллов. Для уменьшения граничных эффектов использовались периодические граничные условия. С целью получения системы с большой плотностью заполнения стержней выбирались регулярные начальные конфигурации стержней на плоскости, далее разыгрывался процесс случайного движения стержней, и система доводилась до равновесного состояния [19, 20]. Плотность системы варьировалась от $\rho = 0.1$ до $\rho = 0.8$ с шагом $\Delta\rho = 0.02$ (за $\rho = 1$ бралась наиболее плотная регулярная упаковка).

Анализ образующейся локальной структуры стержней удобно проводить в терминах кластерообразования [19]. В данном случае под кластером понималось такое расположение стержней (рис. 1), при котором для любой соседней пары стержней в кластере выполняются следующие условия:

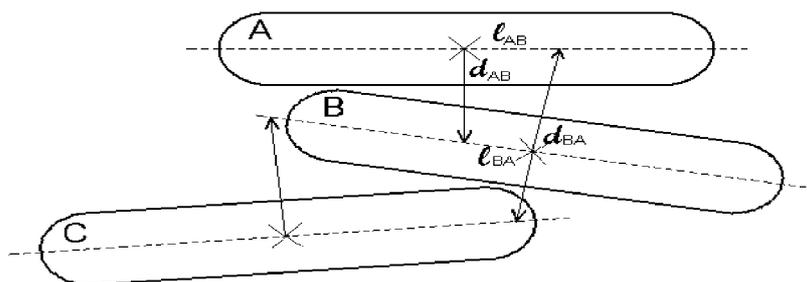
$$\begin{aligned} d_{ij}, d_{ji} &\leq \gamma * (2D) \\ l_{ij}, l_{ji} &\leq \beta * (L/2) \end{aligned} \quad (1)$$

где d_{ij} – длина перпендикуляра, опущенного из центра i -го стержня до пересечения с осью j -го стержня;

l_{ji} – длина отрезка по оси от центра j -го стержня до точки пересечения с перпендикуляром, опущенным из центра i -го стержня;

L и D – длина и диаметр стержня соответственно;

γ и β – параметры критерия кластерообразования (ПКК).



*Рисунок 1 – Определение вхождения стержня в кластер согласно системе неравенств (1). При ПКК $\gamma=1$ и $\beta=1$. Перпендикуляры, опущенные из центров стержней, отсекают следующие отрезки. Для стержней A и B: $d_{AB}, d_{BA} < (2 * D)$ и $l_{AB}, l_{BA} < (L/2)$ они входят в кластер. Перпендикуляр, опущенный из центра стержня C, пересекает ось стержня B за его пределами, поэтому стержень C не входит в кластер*

Из рисунка 1 видно, что, например, при $\gamma=1$ и $\beta=1$ стержни A и B принадлежат одному кластеру, а стержень C не принадлежит, так как перпендикуляр, опущенный из центра стержня C, пересекается с осью стержня B за его пределами. Под распределением кластеров $P(n)$ понималась доля стержней системы, входящих в кластеры из n -стержней, при заданных значениях ПКК γ и β . Данная методика определения кластеров из стержней была первоначально предназначена для малых осевых соотношений стержней, но оказалась работоспособной и для больших осевых соотношений стержней.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для проведения расчётов нами была выбрана система из $N = 1600$ стержней и проанализирована на наличие кластеров, согласно приведённой системе уравнений (1) при различной концентрации стержней. На рисунке 2а представлена мгновенная конфигурация части системы на равновесном участке при плотности стержней $\rho = 0.50$ и осевом отношении $L/D = 6$ с выявленными кластерами при значениях ПКК $\gamma = 1.0$ и $\beta = 1.0$, в центре стержня указан номер кластера. Как видно из рисунка, имеются кластеры, содержащие по 5 и 6 стержней в своём составе, и их общая форма довольно разнообразна. В этих кластерах можно выявить более плотную подсистему кластеров при меньших значениях ПКК $\gamma = 0.32$ и $\beta = 0.66$ (рис. 2б). Причём, чем более правильная «сметичность» кластеров на рисунке 2а, тем большее число стержней в кластере на рисунке 2б.

Нами был проведён статистический анализ кластерного распределения: полученные нормированные распределения кластеров в зависимости от числа стержней представлены на рисунке 3 при различной плотности стержней в системе и разных значениях ПКК γ и β . Как видно из рисунка 3, нормированные распределения $P(n)$ при различных концентрациях стержней в системе и при разных значениях ПКК γ и β хорошо линеаризуются в полулогарифмических координатах. Большая дисперсия в данных наблюдается только для высокой концентрации стержней в системе и для больших значений ПКК γ и β , так как такие класте-

ры становятся «рыхлыми» для данной плотности, а для меньших значений ПКК и при высоких концентрациях полулогарифмическая линейная зависимость хорошо соблюдается. Анализ распределения кластеров показал, что оно описывается функцией:

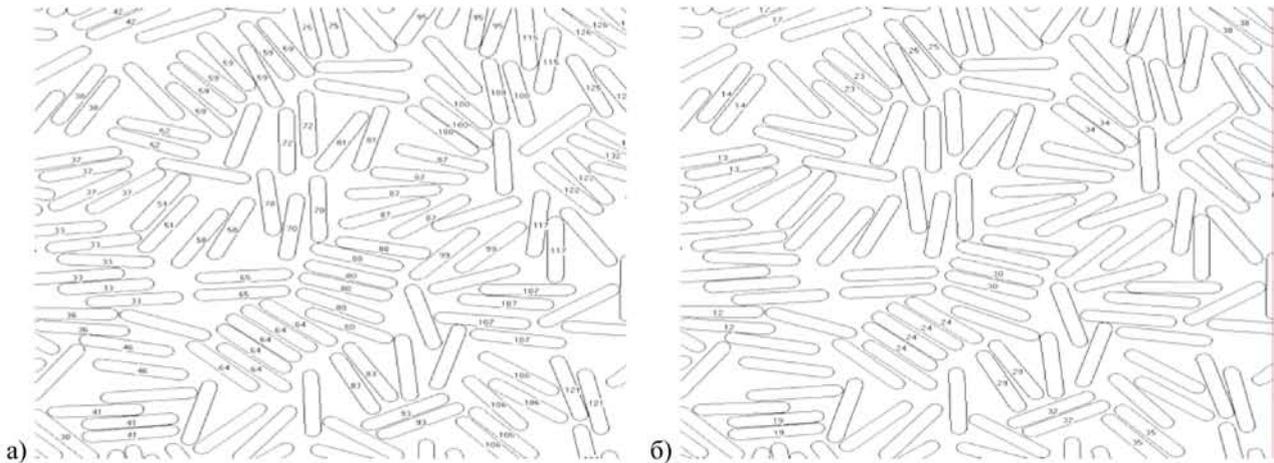


Рисунок 2 – Мгновенный снимок части моделируемой системы стержней с осевым отношением $L/D = 6$ при концентрации стержней 50%. Стержни входящие в кластер пронумерованы, в центре стержня указан номер кластера при ПКК: а) $\gamma = 1$ и $\beta = 1$, б) $\gamma = 0.32$ и $\beta = 0.66$.

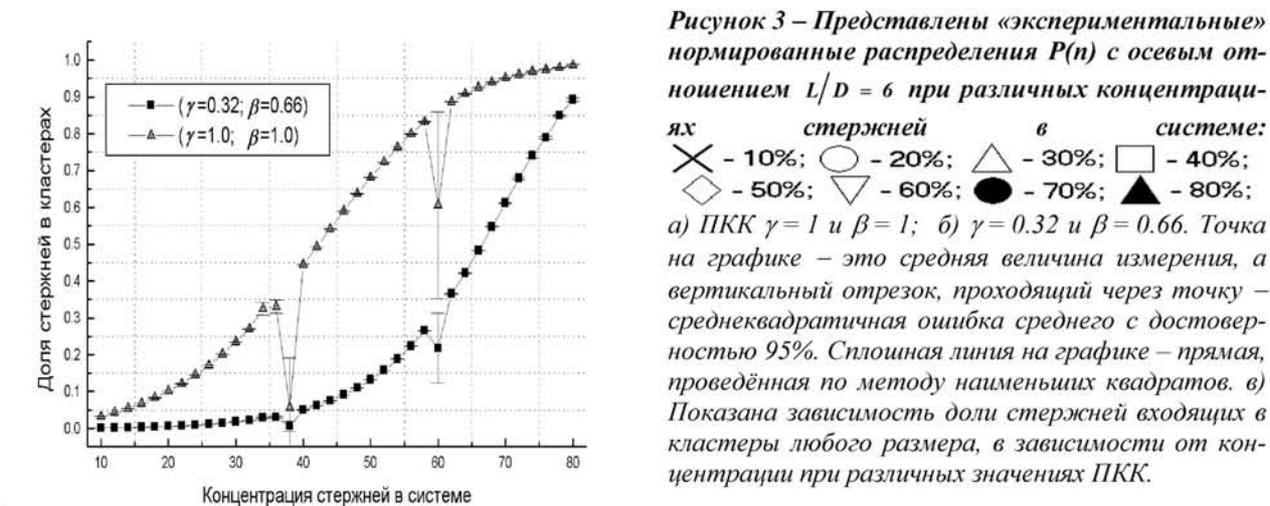
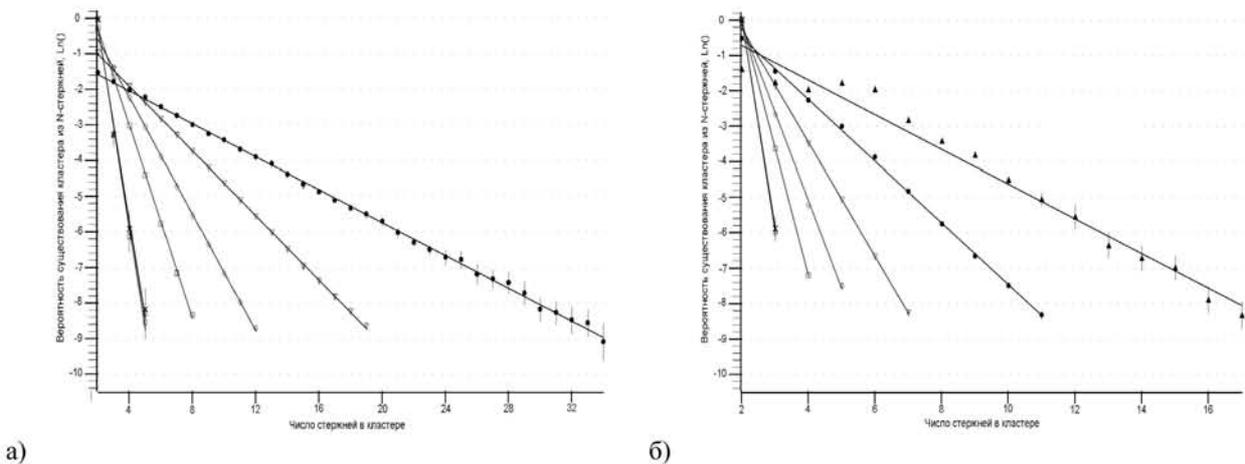


Рисунок 3 – Представлены «экспериментальные» нормированные распределения $P(n)$ с осевым отношением $L/D = 6$ при различных концентрациях стержней в системе: \times - 10%; \circ - 20%; \triangle - 30%; \square - 40%; \diamond - 50%; ∇ - 60%; \bullet - 70%; \blacktriangle - 80%; а) ПКК $\gamma = 1$ и $\beta = 1$; б) $\gamma = 0.32$ и $\beta = 0.66$. Точка на графике – это средняя величина измерения, а вертикальный отрезок, проходящий через точку – среднеквадратичная ошибка среднего с достоверностью 95%. Сплошная линия на графике – прямая, проведённая по методу наименьших квадратов. в) Показана зависимость доли стержней входящих в кластеры любого размера, в зависимости от концентрации при различных значениях ПКК.

$$P(n) = A_0 * \exp[-A_1 * n], \tag{2}$$

где A_0 и A_1 – константы зависящие от параметров γ, β и плотности ρ стержней в системе; n – число стержней в кластере.

На рисунке 3в показана доля вхождения стержней в кластеры любого размера в зависимости от концентрации стержней в системе, которые монотонно возрастает от низкой концентрации стержней к высокой. Исключение наблюдается только для двух областей концентрации и только для стержней с осевым отношением $L/D = 6$, при других осевых отношениях этого не наблюдается. Свойства стержней образовывать кластеры различной степени плотности нами были проверены и для других осевых отношений. На рисунке 4 представлена мгновенная конфигурация системы стержней на равновесном участке для $\rho=0.50$ при осевом отношении $L/D = 15$.

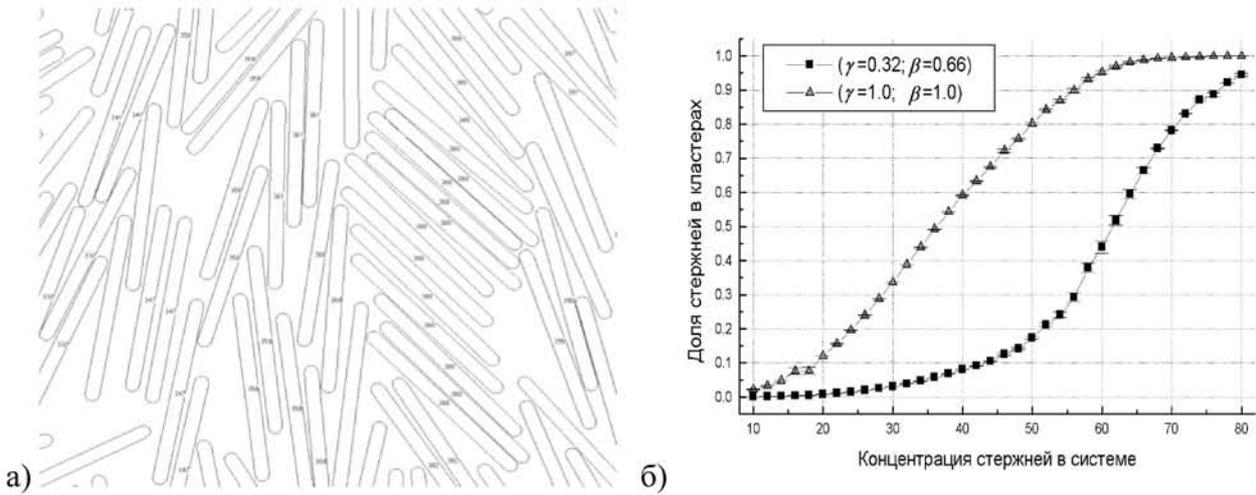


Рисунок 4 – а) Мгновенный снимок части моделируемой системы стержней с осевым отношением $L/D = 15$ при концентрации стержней 50%, в центре стержня указан номер кластера при ПКК $\gamma = 1$ и $\beta = 1$. б) Показана зависимость доли стержней, входящих в кластеры, любого размера в функции концентрации при различных значениях ПКК

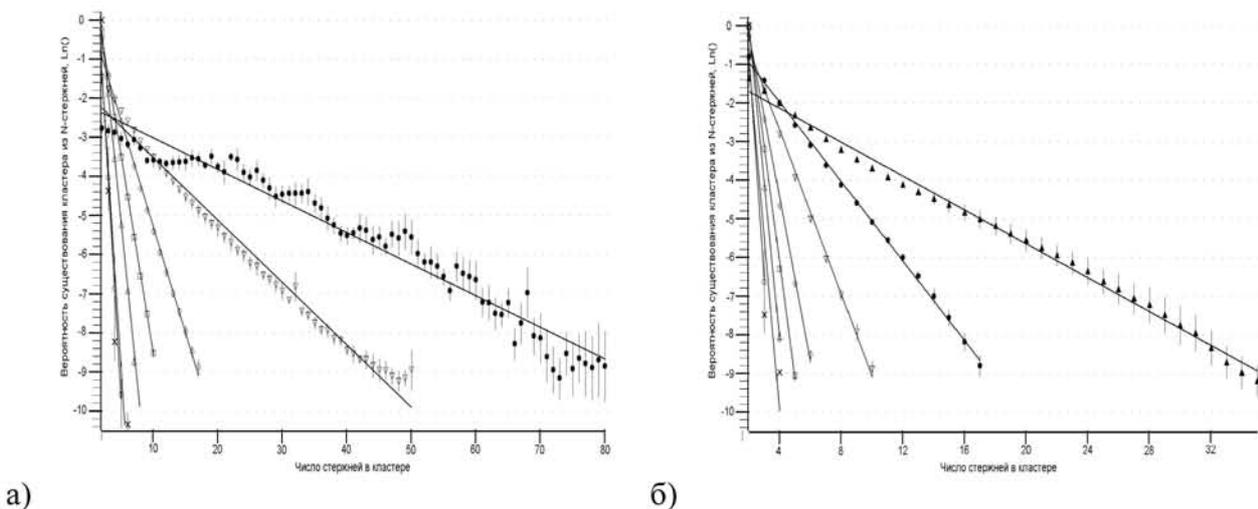


Рисунок 5 – Представлены «экспериментальные» нормированные распределения $P(n)$ с осевым отношением $L/D = 15$ при различных концентрациях стержней в системе а) ПКК $\gamma = 1$ и $\beta = 1$; б) $\gamma = 0.32$ и $\beta = 0.66$

На рисунке 6 представлена мгновенная конфигурация системы стержней на равновесном участке для $\rho=0.50$ при осевом отношении $L/D = 30$. Как видно из рисунков 3а, 5а и 7а, имеется тенденция с увеличением осевого отношения стержней уменьшается наклон прямых

при высоких концентрациях стержней. Данное поведение распределения кластеров можно интерпретировать, как увеличение доли вероятности появления кластеров большого размера и уменьшения доли вероятностей кластеров малого размера в системах стержней с большими осевыми отношениями при высоких концентрациях.

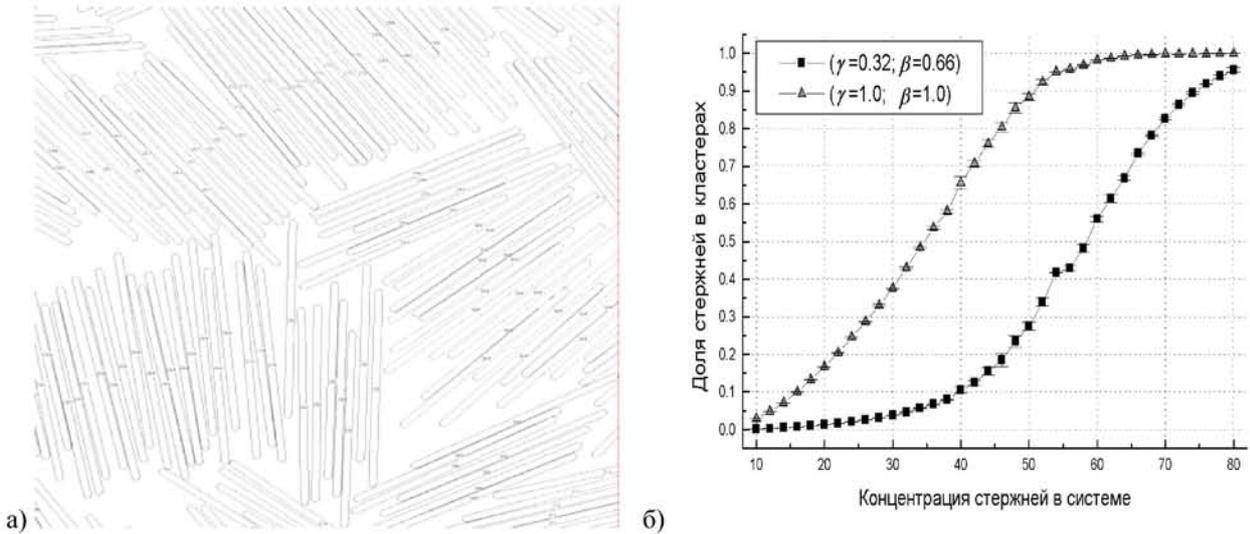


Рисунок 6 – а) Мгновенный снимок части моделируемой системы стержней с осевым отношением $L/D = 30$ при концентрации стержней 50%, в центре стержня указан номер кластера при ПКК $\gamma = 1$ и $\beta = 1$. б) Показана зависимость доли стержней, входящих в кластеры любого размера, в функции концентрации при различных значениях ПКК

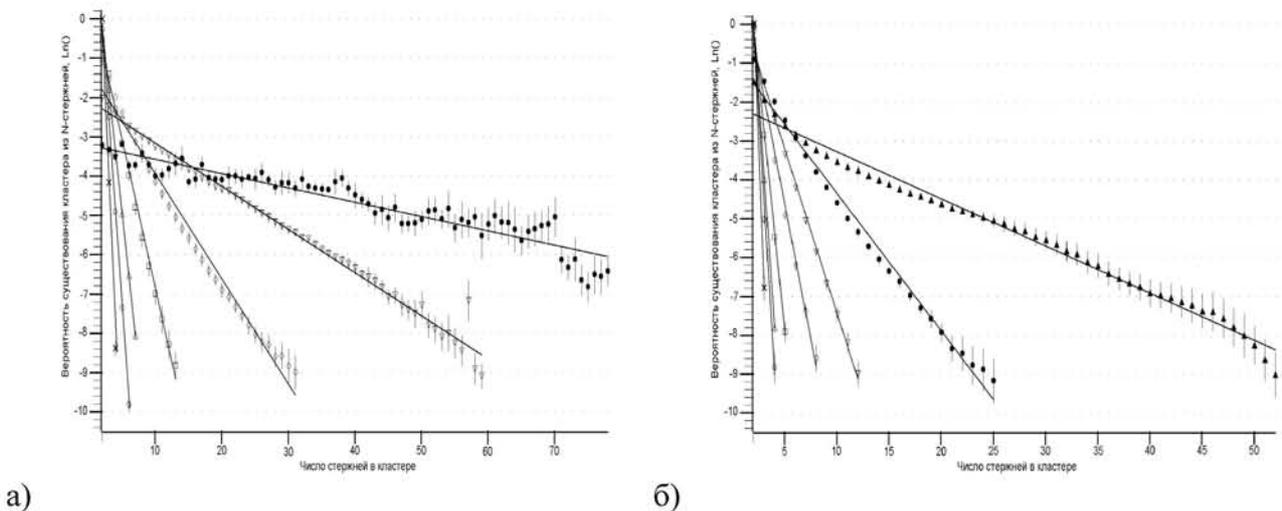


Рисунок 7 – Представлены «экспериментальные» нормированные распределения $P(n)$ с осевым отношением $L/D = 30$ при различных концентрациях стержней в системе а) ПКК $\gamma = 1$ и $\beta = 1$; б) $\gamma = 0.32$ и $\beta = 0.66$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые численные эксперименты показали, что в системе 2D-стержней образуются кластеры различной степени плотности, причём они организуются и при низкой концентрации стержней, и при высокой. Если при низкой концентрации стержней образуются в основном кластеры из двух стержней и значительно реже – из трёх и более стержней, то с повышением концентрации стержней доля кластеров, состоящих из большого числа стержней, повышается. При этом кластеры, образующиеся при больших значениях ПКК, более чувствительны к размерам системы, чем при низких значениях ПКК, так как более рыхлы и имеют большие линейные размеры при одном и том же количестве стержней в кластере.

С увеличением концентрации системы стержней вклад кооперативной подвижности стержней, находящихся в кластерах различного размера и плотности, повышается, тем самым существенно влияя на характер подвижности системы стержней и её локальную структуру. Таким образом, для системы двумерных стержней представляется целесообразным введение ещё одного кинематического и структурообразующего объекта – кластера, наряду со свободными стержнями. Системы кластеров различной степени плотности (различные значения ПКК) могут образовывать мозаичные или столбчатые структуры различной формы и их совместное сосуществование, которые можно принять за мезофазы различной морфологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау, Л.Д. О теории фазовых переходов. II [Текст] / Л.Д. Ландау // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1937, – Т. 7., – №3, – с.627
2. Stanley, H. E. Phase Transitions and Critical Phenomena [Текст] / H. E. Stanley // Oxford University Press: New York, – 1971
3. Varga, S. Nematic and smectic ordering in a system of two-dimensional hard zigzag particles [Текст] / S. Varga, P. Gurin, J.C. Armas-Perez, J. Quintana-H // J. Chem. Phys. 131, 184901 (2009)
4. Straley J. P. Liquid Crystals in Two Dimensions [Текст] / J. P. Straley // Phys. Rev. A 4, 675-681 (1971).
5. Kayser R. F. Bifurcation in Onsager's model of isotropic nematic transition. [Текст] / R. F. Kayser, H. J. Raveche // Phys. Rev. A17, 2067 (1978).
6. Chrzanowska A. On the Application of the Onsager DFT Theory to Two-Dimensional System of Hard Needles [Текст] / A. Chrzanowska // Acta Physica Polonica B 36, 3163 (2005).
7. Wang H. Multiple branches of ordered states of polymer ensembles with the Onsager excluded volume potential. [Текст] / H. Wang, H. Zhou // Phys. Lett. A 372, 3423 (2008).
8. Chen Z. Y. Continuous isotropic-nematic transition of partially flexible polymers in two dimensions [Текст] / Z. Y. Chen // Phys. Rev. Lett. 71, 93 (1993).
9. Schlacken H. Orientational Transitions of Two-Dimensional Hard-Rod Fluids. [Текст] / H. Schlacken, H.-J. Mogel, P. Schiller // Mol. Phys. 93, 777 (1998).
10. Varga S. Phase transitions of hard ellipses and hard ellipses with circular square-wells based upon density functional theory. [Текст] / S. Varga, I. Szalai // Mol. Phys. 95, 515 (1998).
11. Martinez-Raton Y. Effect of particle geometry on phase transitions in two-dimensional liquid crystals. [Текст] / Y. Martinez-Raton, E. Velasco, L. Mederos // J. Chem. Phys. 122, 064903 (2005).
12. Martinez-Raton Y. Enhanced stability of the tetratic phase by clustering. [Текст] / Y. Martinez-Raton, E. Velasco // Phys. Rev. E 79, 011711 (2009).
13. Varga S. Parsons-Lee theory and simulation based study of two-dimensional hard-body fluids. [Текст] / S. Varga, I. Szalai // J. Mol. Liq. 85, 11 (2000).
14. Frenkel D. Evidence for algebraic orientational order in a 2-dimensional hard-core nematic. [Текст] / D. Frenkel, R. Eppenga // Phys. Rev. A 31, 1776 (1985).
15. Cuesta J. A. Monte-carlo simulation of 2-dimensional hard ellipses. [Текст] / J. A. Cuesta, D. Frenkel // Phys. Rev. A 42, 2126 (1990).
16. Zheng X. Y. Distance of closest approach of two arbitrary hard ellipses in two dimensions. [Текст] / X. Y. Zheng, P. Palffy-Muhoray // Phys. Rev. E 75, 061709 (2007).
17. Donev A. Tetratic Order in the Phase Behavior of a Hard-Rectangle System. [Текст] / A. Donev, J. Burton, F. H. Stillinger, S. Torquato // Phys. Rev. B 73, 054109 (2006).
18. Bates M. A. Phase behavior of two-dimensional hard rod fluids. [Текст] / M. A. Bates, D. Frenkel // J. Chem. Phys. 112, 10034 (2000).
- 19) Shadrin, I.F. Computer simulation of a hard-rod system: Structural transitions and clusters [Текст] / I.F. Shadrin, M.R. Sharafudinov, A.M. Elyashevich // J. Chemical information and computer sciences, 1994, V34, N2, 335-338p.
- 20) Шадрин, И.Ф. Физические процессы при релаксации в системе сфероцилиндров и сфер на плоскости. [Текст] / И.Ф. Шадрин // VII Международный семинар «Физико-математическое моделирование систем» (Воронеж 26-27 ноября 2010 г) // 2011, с.208-211

Шадрин Иван Фёдорович

Государственный университет – УНПК, г. Орел

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика»

г. Орел, Наугорское шоссе, 29

E-mail: Ivshadr@mail.ru

I.F. SHADRIN

HARD RODS ON A TWO-DIMENSIONAL SURFACE. CLUSTERS

Computer model operations by a Monte-Carlo method it is used for learning of local frame in system of the firm rods which are on plane (2D) surfaces. The system behaviour was studied at different concentrations of rods. The kinematic and gel-forming device – α cluster consisting of bunch of rods, culled on certain measure is in-process inducted. The distribution function of clusters on sizes is featured by an exponential curve from number of rods in it which parametres depend on concentration of rods in system.

Keywords: rigid rods, 2D-surface, cluster, structure formation.

BIBLIOGRAPHY

1. Landau, L.D. O teorii fazovyh perehodov. II [Tekst] / L.D. Landau // Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoj fiziki. – 1937, – T. 7., – №3, – s.627
2. Stanley, H. E. Phase Transitions and Critical Phenomena [Tekst] / H. E. Stanley // Oxford University Press: New York, – 1971
3. Varga, S. Nematic and smectic ordering in a system of two-dimensional hard zigzag particles [Tekst] / S. Varga, P. Gurin, J.C. Armas-Perez, J. Quintana-H // J. Chem. Phys. 131, 184901 (2009)
4. Straley J. P. Liquid Crystals in Two Dimensions [Tekst] / J. P. Straley // Phys. Rev. A 4, 675-681 (1971).
5. Kayser R. F. Bifurcation in Onsager's model of isotropic nematic transition. [Tekst] / R. F. Kayser, H. J. Raveche // Phys. Rev. A17, 2067 (1978).
6. Chrzanowska A. On the Application of the Onsager DFT Theory to Two-Dimensional System of Hard Needles [Tekst] / A. Chrzanowska // Acta Physica Polonica B 36, 3163 (2005).
7. Wang H. Multiple branches of ordered states of polymer ensembles with the Onsager excluded volume potential. [Tekst] / H. Wang, H. Zhou // Phys. Lett. A 372, 3423 (2008).
8. Chen Z. Y. Continuous isotropic-nematic transition of partially flexible polymers in two dimensions [Tekst] / Z. Y. Chen // Phys. Rev. Lett. 71, 93 (1993).
9. Schlacken H. Orientational Transitions of Two-Dimensional Hard-Rod Fluids. [Tekst] / H. Schlacken, H.-J. Mogel, P. Schiller // Mol. Phys. 93, 777 (1998).
10. Varga S. Phase transitions of hard ellipses and hard ellipses with circular square-wells based upon density functional theory. [Tekst] / S. Varga, I. Szalai // Mol. Phys. 95, 515 (1998).
11. Martinez-Raton Y. Effect of particle geometry on phase transitions in two-dimensional liquid crystals. [Tekst] / Y. Martinez-Raton, E. Velasco, L. Mederos // J. Chem. Phys. 122, 064903 (2005).
12. Martinez-Raton Y. Enhanced stability of the tetratic phase by clustering. [Tekst] / Y. Martinez-Raton, E. Velasco // Phys. Rev. E 79, 011711 (2009).
13. Varga S. Parsons-Lee theory and simulation based study of two-dimensional hard-body fluids. [Tekst] / S. Varga, I. Szalai // J. Mol. Liq. 85, 11 (2000).
14. Frenkel D. Evidence for algebraic orientational order in a 2-dimensional hard-core nematic. [Tekst] / D. Frenkel, R. Eppenga // Phys. Rev. A 31, 1776 (1985).
15. Cuesta J. A. Monte-carlo simulation of 2-dimensional hard ellipses. [Tekst] / J. A. Cuesta, D. Frenkel // Phys. Rev. A 42, 2126 (1990).
16. Zheng X. Y. Distance of closest approach of two arbitrary hard ellipses in two dimensions. [Tekst] / X. Y. Zheng, P. Palffy-Muhoray // Phys. Rev. E 75, 061709 (2007).
17. Donev A. Tetratic Order in the Phase Behavior of a Hard-Rectangle System. [Tekst] / A. Donev, J. Burton, F. H. Stillinger, S. Torquato // Phys. Rev. B 73, 054109 (2006).
18. Bates M. A. Phase behavior of two-dimensional hard rod fluids. [Tekst] / M. A. Bates, D. Frenkel // J. Chem. Phys. 112, 10034 (2000).
- 19) 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.
- 20) Shadrin, I.F. Fizicheskie processy pri relaksacii v sisteme sferocilindrov i sfer na plosko-sti. [Tekst] / I.F. Shadrin // VII Mezhdunarodnyj seminar «Fiziko-matematicheskoe modelirovanie sistem» (Voronezh 26-27 nojabrja 2010 g) // 2011, s.208-211

Shadrin Ivan Feodorovich

State University ESPC

Candidate of physico-mathematical sciences, associated professor, chair "Physics"

Orel, Naugorskoe shosse, 29

E-mail: Ivshar@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Предложены расчетные соотношения для определения статических характеристик конических гидродинамических и гидростатических опор в условиях переменных теплофизических свойств и двухфазного состояния смазочного материала. Выражения позволяют получать статические характеристики (несущую способность, расход смазочного материала, потери мощности на трение и прокачку) с учетом и без учета влияния двухфазности смазочного материала. Результаты иллюстрируются характерными графиками, полученными для конических гидродинамических и гидростатических подшипников, смазываемых водой.

Ключевые слова: конический гидродинамический подшипник, конический гидростатический подшипник, статические характеристики, двухфазность, смазочный материал.

Тенденции развития современного турбомашиностроения приводят к значительному росту угловых скоростей вращения роторов высокоскоростных турбомашин [1]. Вследствие чего в зазоре подшипников скольжения, являющихся опорами роторов, возможно появление паровой фазы из-за вскипания и/или кавитации в смазочном слое [2, 3], что оказывает влияние на статические характеристики. Данная работа посвящена исследованиям влияния эффекта двухфазного состояния смазочного материала на статические характеристики конических гидродинамических (ГДП) и гидростатических (ГСП) подшипников скольжения, смазываемых водой. С этой целью был проведен вычислительный эксперимент для анализа влияния двухфазного состояния смазочного слоя на статические характеристики конических подшипников и предоставления дальнейших рекомендаций по целесообразности учета фазового состояния (двухфазности) при расчетах опор скольжения.

В статье рассматриваются три типа конических подшипников: гладкий ГДП, ГСП с точечными камерами и ГСП с прямоугольными камерами. Широкое применение в качестве опор роторов современных высокоскоростных турбомашин находят конические гладкие гидродинамические подшипники скольжения (см. рис. 1, а), что обусловлено, прежде всего, простотой конструкции за счет отсутствия дросселирующих элементов и, как следствие, ее удешевлением и упрощением эксплуатации [3]. Преимуществом ГСП является возможность создания достаточной несущей способности при отсутствии или низких частотах вращения ротора, что предотвращает соприкосновение трущихся деталей, и, соответственно, увеличивает надежность и долговечность роторно-опорного узла. Работоспособность опорного узла обеспечивается за счет давления подачи смазочного материала в питающие камеры, которые могут иметь различную форму: точечные, прямоугольные, круглые, шевронные и т.д. В данной статье исследуются гидростатические подшипники двух типов: ГСП с точечными камерами (см. рис. 1, б) и ГСП с прямоугольными камерами (см. рис. 1, в) [3 – 5].

Как было сказано выше, при проектировании и расчете опор высокоскоростных роторов возникает необходимость учета двухфазного состояния смазочного материала, поскольку происходит появление паровой фазы вследствие вскипания и/или кавитации. В этом случае существенно меняются теплофизические параметры смазочного материала в целом (плотность, вязкость и т.д.), что оказывает непосредственное влияние на статические (несущая способность, расход, потери мощности) и динамические (жесткость и демпфирование) характеристики опор. Рассмотрение двухфазного парожидкостного состояния смазочного материала проводится на основании гомогенной модели двухфазной среды [2, 3].

Осредненные значения параметров парожидкостного смазочного слоя определяются по массовому паросодержанию и физическим свойствам каждой фазы на линии насыщения. Так, такие параметры двухфазной среды, как энтальпия I и плотность ρ , выражаются следующими соотношениями [2, 3] (...' и ...'' – соответственно жидкая и газовая фаза):

$$I_m = I'(1 - \chi) + I''\chi; \quad \frac{1}{\rho_m} = \frac{1}{\rho'}(1 - \chi) + \frac{1}{\rho''}\chi,$$

откуда получаются значения паросодержания χ и осредненной плотности ρ_m :

$$\chi = \frac{I_m - I'}{I'' - I'}; \quad \rho_m = \frac{\rho' \rho''}{\rho''(1-\chi) + \rho' \chi}. \quad (1)$$

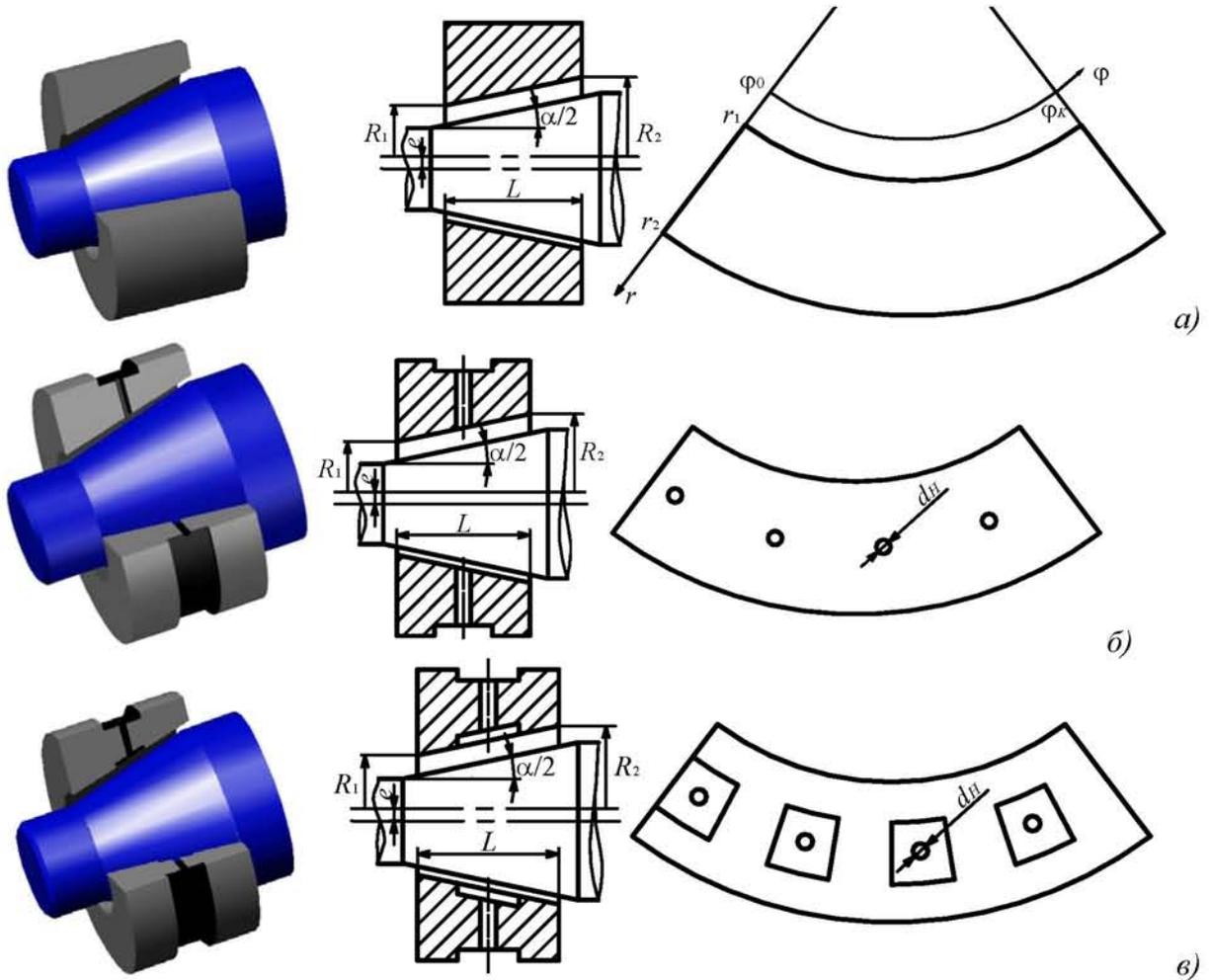


Рисунок 1 – Конические подшипники скольжения

а) гладкий ГДП; б) ГСП с точечными камерами; в) ГСП с прямоугольными камерами

Поскольку вязкость двухфазной среды определяется вязкостью составляющих ее фаз и зависит от структуры потока, режима течения и других факторов, то, в соответствии с результатами работ [2, 3], коэффициент осредненной динамической вязкости определяется как:

$$\mu_m = \begin{cases} \mu' \left(1 - \chi \frac{\rho_m \mu' + 2,5 \mu''}{\rho'' \mu' + \mu''} \right), & \text{при } \chi \leq 0,05; \\ \frac{\chi \mu'' \rho' + (1 - \chi) \mu' \rho''}{\chi \rho' + (1 - \chi) \rho''}, & \text{при } \chi > 0,05. \end{cases} \quad (2)$$

Для двухфазного турбулентного течения смазочного материала коэффициенты турбулентности K_r и K_ϕ смазочного слоя будут рассчитываться согласно методике, основанной на свойстве аддитивности параметров среды [2, 3]:

$$K_r = K'_r(1-\chi) + K''_r\chi; \quad K_\phi = K'_\phi(1-\chi) + K''_\phi\chi, \quad (3)$$

причем значения коэффициентов турбулентности каждой из фаз определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} K'_\phi &= 1 + 0,044 \cdot Re'^{0,725}; & K''_\phi &= 1 + 0,044 \cdot Re''^{0,725}; \\ K'_r &= 1 + 0,0247 \cdot Re'^{0,65}; & K''_r &= 1 + 0,0247 \cdot Re''^{0,65}, \end{aligned} \quad (4)$$

где значения чисел Рейнольдса для каждой из фаз определяются как:

$$\text{Re}' = (k^*)^2 \frac{\omega R^* \rho' h}{\mu'}; \quad \text{Re}'' = (k^*)^2 \frac{\omega R^* \rho'' h}{\mu''}, \quad (5)$$

где k^* – коэффициент Кармана, определяющий величину пути смещения и зависящий от радиального зазора. Коэффициент k^* может принимать следующие значения: $k^* \approx 0,2 \dots 0,4$; причем малые значения k^* соответствуют малым радиальным зазорам от 10 до 100 мкм. Часто рассчитывают коэффициент Кармана по эмпирической зависимости: $k^* = 0,125 \cdot \text{Re}^{0,07}$.

Основой расчета гидродинамических сил и статических характеристик опор жидкостного трения, в том числе и исследуемых, является знание распределения давлений в смазочном слое. Течение двухфазной турбулентной смазочной среды описывается системой уравнений, в которую входят уравнения Рейнольдса, баланса энергий, баланса расходов (для ГСП), функция зазора, аналитические зависимости теплофизических свойств воды и дополнительные соотношения, замыкающие систему, решение которой позволяет определить функцию поля давлений и, как следствие, рассчитать статические характеристики подшипников: несущую способность (грузоподъемность), потери мощности на трение и прокачку смазочного материала и его объемный и массовый расход [3 – 5]. Интегрирование найденного поля давлений, полученного методом конечных разностей, позволяет определить основные статические характеристики конических опор по следующим зависимостям [3, 5]:

1) несущая способность:

$$\text{полная: } W = \sqrt{R_X^2 + R_Y^2 + R_Z^2}; \quad \text{радиальная: } W_R = \sqrt{R_X^2 + R_Y^2}; \quad \text{осевая: } W_A = R_Z, \quad (6)$$

где проекции гидродинамических сил, действующих на цапфу, на оси координат равны:

$$R_X = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_K} p \sin \beta \cos(\alpha/2) r d\varphi dr; \quad R_Y = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_K} p \cos \beta \cos(\alpha/2) r d\varphi dr; \quad R_Z = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_K} p \sin(\alpha/2) r d\varphi dr; \quad (7)$$

2) объемный Q_v и массовый Q_m расход:

– для гладкого ГДП:

$$Q_v = \int_{\varphi_0}^{\varphi_K} \left(-\frac{h^3}{12\mu K_r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{V_r h}{2} \right) r d\varphi; \quad (8)$$

– для ГСП:

$$Q_m = \frac{\pi d_H^4}{128 l_H} \sum_{n=1}^{N_p N_K} \left(\frac{(p_0 - p_H)(\rho_H + \rho_0)}{K_H (\mu_H + \mu_0)} \right)_n; \quad Q_v = \frac{Q_m}{\rho_0}, \quad (9)$$

3) потери мощности на трение:

$$N_{mp} = M_{mp} \omega_0, \quad \text{где } M_{mp} = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_K} R^* \tau r d\varphi dr, \quad R^* = r \sin(\alpha/2); \quad \tau = \left[\frac{h}{2} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} + \frac{\mu K_\varphi V_\varphi}{h} \right]; \quad (10)$$

4) потери мощности на прокачку смазочного материала:

$$N_{np} = Q_v p_0. \quad (11)$$

В приведенных выше соотношениях приняты следующие обозначения: p – давление; R^* – текущий радиус подшипника; α – угол конусности; β – угловая координата в окружном направлении; r, φ, y – осевая, окружная и радиальная координаты по опорной поверхности подшипника; K_H – коэффициент турбулентности; V_r, V_φ – скорости точки на поверхности цапфы; h – функция полного зазора; ω – угловая скорость ротора; M_{mp} – момент сопротивления вращению цапфы; τ – касательные напряжения; индексы: 0 – вход в подшипник; H – жиклер. Полученные выражения (6) – (10) должны быть представлены в разностном виде, подробное изложение алгоритма расчета численным методом приведено в работе [3]. Пред-

ложенные расчетные соотношения реализованы в разработанном программном обеспечении «Подшипник–Криоген» [6], позволяющим рассчитать характеристики КПС с учетом и без учета двухфазности в смазочном слое и сравнить результаты в процентном соотношении.

Для оценки влияния двухфазного состояния смазочного материала на статические характеристики конических подшипников скольжения, смазываемых водой, был проведен вычислительный эксперимент, результаты которого представлены ниже на графиках (см. рис. 2 – 4). Подшипники имеют следующие рабочие и геометрические параметры: длина подшипника $L = 53$ мм; радиус $R_2 = 24$ мм; угол конусности $\alpha = 30^\circ$; средний радиальный зазор $h_0 = 50$ мкм; давление подачи $p_0 = 0,2$ МПа; температура смазочной жидкости $T_0 = 293$ К; для ГСП обоих типов – число камер $N_K = 4$, число рядов камер $N_P = 1$, длина и диаметр жиклера $l_H = 4$ мм и $d_H = 1$ мм, для ГСП с прямоугольными камерами – длина камеры по образующей $L_K = 41$ мм, ширина камеры $B_K = 8$ мм, число жиклеров, питающих одну камеру $N_H = 1$.

Так, например, можно отметить, что несущая способность гладкого ГДП с учетом двухфазного состояния смазочного материала при угловой скорости $\omega_0 = 3000$ рад/с и смазывании водой снижается в среднем на 1% при радиальном эксцентриситете $e = 0,2 \dots 0,4$ и на 19% при $e = 0,6$ (см. рис. 2, а). Объемный расход смазочного материала при учете двухфазности возрастает на 2 % при всех рассматриваемых эксцентриситетах (см. рис. 2, б). Потери мощности на трение с учетом двухфазности смазочного материала снижаются на 4 %, 11 % и 27 % при $e = 0,2; 0,4$ и $0,6$ соответственно (см. рис. 2, в). Поскольку потери мощности на прокатку прямо пропорциональны объемному расходу, то двухфазность оказывает точно такое же влияние на них – возрастают на 2 % (см. рис. 2, г).

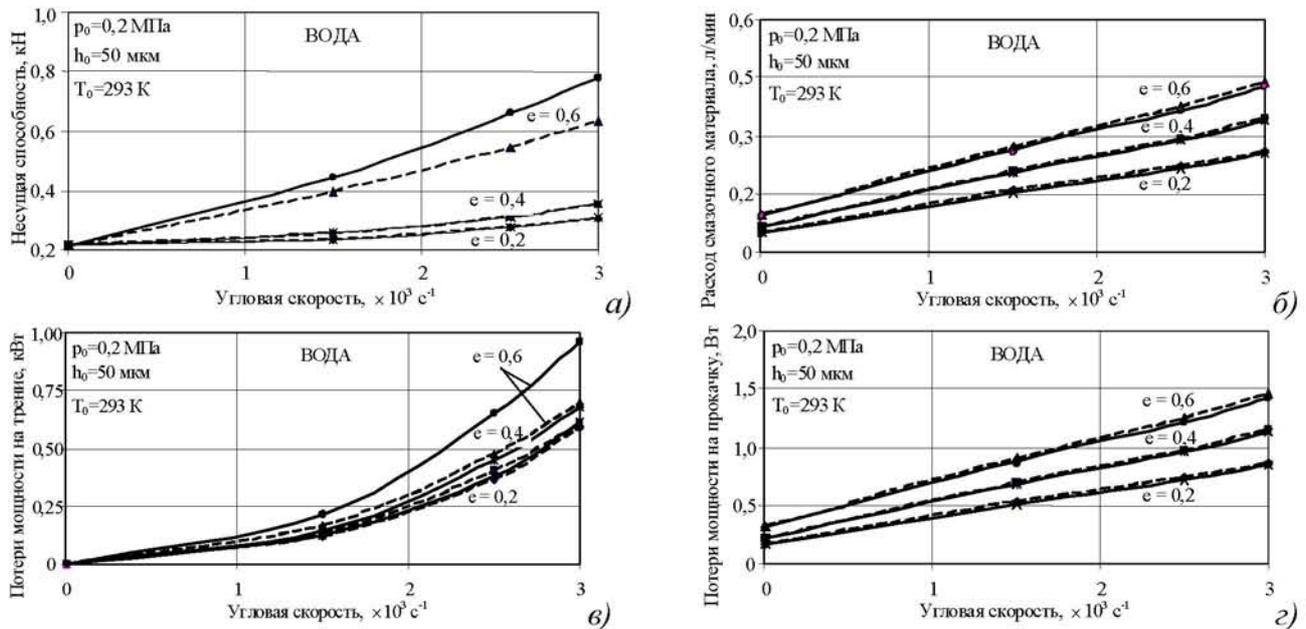


Рисунок 2 – Влияние двухфазности на статические характеристики конических ГДП
 а – несущую способность; б – объемный расход смазочного материала;
 в – потери мощности на трение; г – потери мощности на прокатку;
 без учета двухфазности (—), с учетом двухфазности (---)

Для гидростатических подшипников с точечными камерами наблюдаются следующие закономерности – несущая способность при учете влияния двухфазности снижается в среднем на 1 % при $e = 0,2 \dots 0,4$ и на 12 % при $e = 0,6$ при смазывании водой и угловой скорости $\omega_0 = 3000$ рад/с (см. рис. 3, а). Массовый расход смазочного материала (потери мощности на прокатку) через ГСП с точечными камерами при учете двухфазности немного возрастает (в пределах 2...4 %) при всех эксцентриситетах (см. рис. 3, б, г). Потери мощности на трение также, как и для гладких ГДП, снижаются на 1,5 %, 7 % и 26 % при эксцентриситетах $e = 0,2; 0,4$ и $0,6$ соответственно (см. рис. 3, в).

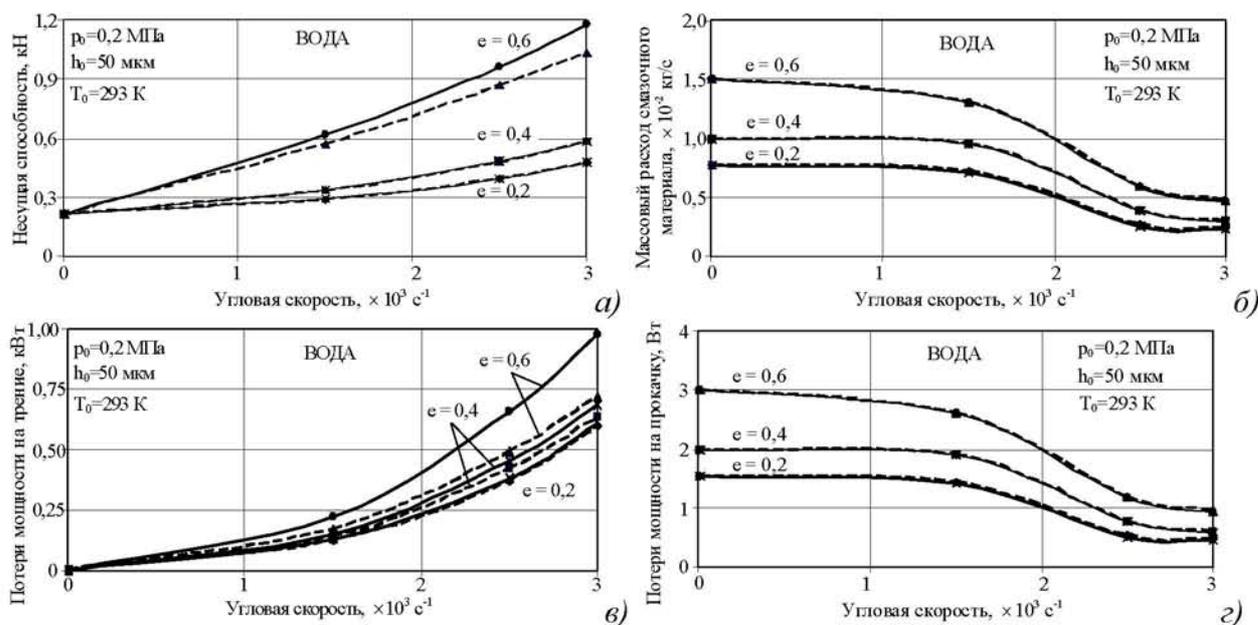


Рисунок 3 – Влияние двухфазности на статические характеристики ГСП с точечными камерами
 а – несущую способность; б – массовый расход смазочного материала;
 в – потери мощности на трение; г – потери мощности на прокатку

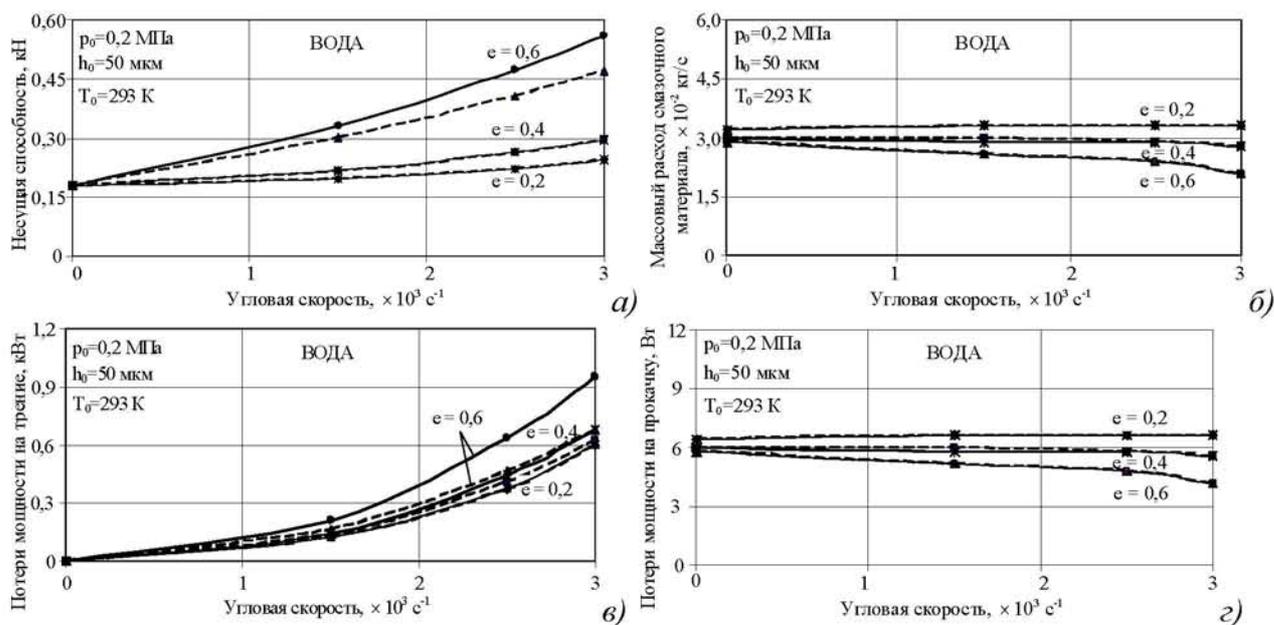


Рисунок 4 – Влияние двухфазности на статические характеристики ГСП с прямоугольными камерами
 а – несущую способность; б – массовый расход смазочного материала;
 в – потери мощности на трение; г – потери мощности на прокатку

Несущая способность ГСП с прямоугольными камерами с учетом двухфазного состояния смазочного материала при угловой скорости $\omega_0 = 3000 \text{ рад/с}$ и смазывании водой снижается в среднем на 1 % при радиальном эксцентриситете $e = 0,2 \dots 0,4$ и на 16 % при $e = 0,6$ (см. рис. 4, а). Массовый расход (потери мощности на прокатку) через ГСП с прямоугольными камерами в отличие от ГСП с точечными камерами практически не зависит от агрегатного состояния смазочного материала (см. рис. 4, б, г). Двухфазность смазочного материала оказывает следующее влияние на потери мощности на трение – снижаются на 1 %, 8% и 28% при эксцентриситетах $e = 0,2; 0,4$ и $0,6$ соответственно (см. рис. 4, в).

Таким образом, анализируя приведенные результаты, можно отметить, что двухфазное состояние смазочного материала (появление паровой фазы) приводит к снижению таких характеристик подшипника, как несущая способность и потери мощности на трение, и к росту расхода и потерь мощности на прокатку, что вполне согласуется с физическим смыслом

процесса. Необходимость учета влияния двухфазности на характеристики подшипников подтверждается проведенными выше теоретическими исследованиями, которые показали, что расхождение может составлять до 20...30 % в отдельных случаях, что, несомненно, оказывает влияние на конечный результат и, поэтому, должно быть учтено в дальнейших расчетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токарь, И.Я. Проектирование и расчет опор трения / И.Я. Токарь. – М.: Машиностроение, 1971. – 168 с.
2. Савин, Л.А. Расчет подшипников скольжения, работающих в условиях двухфазного состояния смазочного материала / Л.А. Савин, О.В. Соломин // Известия ВУЗов. Машиностроение, 2004. – № 2. – С.36 – 42.
3. Корнеев, А.Ю. Конические подшипники жидкостного трения: моногр. / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М: Машиностроение-1, 2008. – 172 с.
4. Корнеев, А.Ю. Математическая модель неизотермического турбулентного течения смазочного материала в конических опорах жидкостного трения / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, О.В. Соломин // Вестник машиностроения, 2005. – № 7. – С. 37 – 42.
5. Корнеев, А.Ю. Расчет статических характеристик конических опор жидкостного трения / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, О.В. Соломин // Вестник машиностроения, 2006. – № 12. – С. 37 – 41.
6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610593. «Подшипник-Криоген» / Л.А. Савин, О.В. Соломин, А.Ю. Корнеев и др.

Корнеев Андрей Юрьевич

Государственный университет – УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»

г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (4862) 41-98-49

E-mail: korneev_andrey@mail.ru

A.Yu. KORNEYEV

THE PHASE STATE EFFECT OF LUBRICANT ON THE STATIC CHARACTERISTICS OF THE CONICAL BEARINGS

The calculating correlations for determination of the static characteristics of the conical fluid-film and externally pressurized bearings under conditions of variable thermo-physical properties and a two-phase condition of lubricant are offered. The expressions allow to get the static characteristics (load-carrying capacity, flow rate, frictional and pumping losses) with and without two-phase effect of lubricant. The results are illustrated by the plots for the conical fluid-film and externally pressurized bearings with water lubricant.

Keywords: conical fluid-film bearing, conical externally pressurized bearing, static characteristics, two-phase condition, lubricant.

BIBLIOGRAPHY

1. Tokar', I.Ja. Proektirovanie i raschet opor trenija / I.Ja. Tokar'. – М.: Mashinostroenie, 1971. – 168 s.
2. Savin, L.A. Raschet podshipnikov skol'zhenija, rabotajuwih v uslovijah dvuhfaznogo sostojanija smazochnogo materiala / L.A. Savin, O.V. Solomin // Izvestija VUZov. Mashinostroenie, 2004. – № 2. – S.36 – 42.
3. Korneev, A.Ju. Konicheskie podshipniki zhidkostnogo trenija: monogr. / A.Ju. Korneev, L.A. Savin, O.V. Solomin. – М: Mashinostroenie-1, 2008. – 172 s.
4. Korneev, A.Ju. Matematicheskaja model' neizotermicheskogo turbulentnogo techenija smazochnogo materiala v konicheskikh oporah zhidkostnogo trenija / A.Ju. Korneev, L.A. Savin, O.V. Solomin // Vestnik mashinostroenija, 2005. – № 7. – S. 37 – 42.
5. Korneev, A.Ju. Raschet staticheskikh harakteristik konicheskikh opor zhidkostnogo trenija / A.Ju. Korneev, L.A. Savin, O.V. Solomin // Vestnik mashinostroenija, 2006. – № 12. – S. 37 – 41.
6. Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlja JeVM № 2000610593. «Podshipnik-Kriogен» / L.A. Savin, O.V. Solomin, A.Ju. Korneev i dr.

Korneev Andrey Yurievich

State University ESPC

Candidate of technical sciences, associated professor, chair “Dynamics and machine strength”

Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862-41-98-49

E-mail: korneev_andrey@mail.ru

УДК 539.3

И.В. ВИТКОВСКИЙ, Л.Ю. ФРОЛЕНКОВА, В.С. ШОРКИН, С.И. ЯКУШИНА

МЕТОД РАСЧЕТА ФОРМЫ ТЯЖЕЛОЙ КАПЛИ И ЕЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Предложен метод расчета формы тяжелой капли, лежащей на горизонтальной поверхности, и методика его использования в экспериментальных условиях для определения поверхностного натяжения. В основу положена модель среды, опирающаяся на представление о том, что она является объединением трехмерной внутренности, двухмерной материальной пленки и замыкающей ее материальной линии. Все три вида сред, образующих трехмерное тело, взаимодействуют между собой. Для расчета формы капли использованы идеи метода блочных элементов.

Ключевые слова: *поверхностное натяжение, краевой угол смачивания, угол смачивания, метод блочного элемента.*

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное натяжение определяется часто с помощью измерения краевого угла смачивания [1, 2]. Поэтому теоретический анализ этого метода актуален для повышения достоверности получаемых на его основе результатов. Ввиду этого поиску методов расчета формы капли и их физическому обоснованию в научной литературе уделяется постоянное внимание [3]. Предлагаемый в данной работе метод основан на анализе равновесного состояния и формы капли жидкости на плоской поверхности в предположении о том, что справедливо уравнение Юнга, связывающее краевой угол смачивания со значениями поверхностных натяжений на границах жидкость – пар, жидкость – твердое тело, пар – твердое тело, определенных вдали от линии контакта жидкости, пара, твердого тела [3]. Форма капли имеет цилиндрическую симметрию. Высота капли равна h , угол наклона касательной плоскости к верхней граничной поверхности в точках линии ее соединения с нижней граничной поверхностью – окружностью радиуса R , (краевой угол смачивания) равен θ . Условием равновесия капли является равенство силы, стремящейся превратить каплю в тонкую пленку – силы тяжести, и сил поверхностного натяжения. Задача, которая решается в данной работе, состоит в построении такой модели равновесного состояния капли, которая в сочетании с соответствующими данными экспериментов, позволила бы достаточно точно по измеренным параметрам формы капли установить величину ее поверхностного натяжения.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственный контракт № 14.740.11.0271).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Обозначим: B – капля жидкости (ее внутренность); C – полубесконечное тело, на поверхности которого расположена капля; D – среда, в которую помещены тело B и капля C , это может быть и вакуум; A – пленка на поверхности капли; L – линия контакта пленки A , пленки $A_{(B,C)}$, являющейся переходной зоной между каплями B и твердым телом C , и поверхностной пленки тела C . Тела B , A , $A_{(B,C)}$, L представляют собой систему тел, размерности 3, 2, 2, 1 соответственно. Их объединение является моделью реальной капли:

$$\tilde{B} = B \cup A \cup A_{(B,C)} \cup L. \quad (1)$$

Линия L является кольцом заданного радиуса R_L , вид поверхности A нуждается в определении. Выражение (1) представляет собой структуру блочных элементов [4] капли, имеющих разную размерность.

Рассматривается статическое состояние. Допускается, что поверхностное натяжение σ является одним и тем же во всех направлениях, так что тензор внутренних напряжений в пленке определяется равенством:

$$P_A = \vec{a}_\alpha \vec{a}_\beta \delta_{\alpha\beta} \sigma,$$

где \vec{a}_α , \vec{a}_β , $\alpha, \beta = 1, 2$, – векторы ортонормированного базиса прямоугольной криволинейной

ной поверхностной системы координат ($\xi \equiv \xi_1, \eta \equiv \xi_2$).

Напряженное состояние жидкости описываем шаровым тензором

$$P = -p \delta_{ij} \vec{e}_i \vec{e}_j,$$

где $\vec{e}_i, \vec{e}_j, i, j = 1, 2, 3$, – векторы ортонормированного базиса прямоугольной, в общем случае криволинейной (декартовой прямолинейной, сферической или цилиндрической) пространственной системы координат ($x_k, k = 1, 2, 3$); p – величина гидростатического давления.

Уравнения равновесия и краевые условия для трехмерного тела, при условии постоянства плотности и температуры материала частей тела, имеют вид [5]:

$$\begin{aligned} \nabla_V \cdot P_V + \vec{f}_V &= 0, \dots \vec{r} \in \overset{0}{V}, \\ \nabla_S \cdot P_S + \vec{f}_S &= 0, \dots \vec{r} \in \overset{0}{S}, \\ \nabla_L \cdot P_L + \vec{f}_L &= 0, \dots \vec{r} \in \overset{0}{L}, \\ \vec{f}_M &= 0, \dots \vec{r} \in M, \end{aligned}$$

где \vec{r} – радиус-векторы точек тела в отсчетной конфигурации;

t – время;

P_V, P_S, P_L – тензоры напряжений;

$\nabla_V, \nabla_S, \nabla_L$ – дифференциальные операторы Гамильтона; индекс $(^0)$ означает внутренность множества точек;

$\vec{f}_V, \vec{f}_S, \vec{f}_L, \vec{f}_M$ – плотности сил, определяются формулами

$$\begin{aligned} \vec{f}_V &= \vec{\tau}_V, \\ \vec{f}_S &= \vec{\tau}_S - (\vec{n}_V \cdot P_V)_S, \\ \vec{f}_L &= \vec{\tau}_L - [(\vec{n}_S \cdot P_S)_1 + (\vec{n}_S \cdot P_S)_2]_L, \\ \vec{f}_M &= \vec{\tau}_M - [(\vec{n}_L \cdot P_L)_1 + (\vec{n}_L \cdot P_L)_2 + \dots + (\vec{n}_L \cdot P_L)_n]_M, \end{aligned} \tag{2}$$

где $\vec{\tau}_V, \vec{\tau}_S, \vec{\tau}_L, \vec{\tau}_M$ – плотности истинно внешних сил; $-(\vec{n}_V \cdot P_V)_S, -[(\vec{n}_S \cdot P_S)_1 + (\vec{n}_S \cdot P_S)_2]_L, -[(\vec{n}_L \cdot P_L)_1 + (\vec{n}_L \cdot P_L)_2 + \dots + (\vec{n}_L \cdot P_L)_n]_M$ – плотности сил, действующих на соответствующую часть тела со стороны других частей, имеющих размерность, на единицу большую;

\vec{n}_S – вектор внешней единичной нормали соответственно к $\overset{0}{S}$;

\vec{n}_L – вектор внешней единичной нормали к $\overset{0}{L}$, расположен в касательной к $\overset{0}{S}$ плоскости, построенной в точке определения вектора \vec{n}_L .

Далее рассматривается не все тело \tilde{B} , а лишь его часть $\tilde{B}^* = B \cup A$. Вместо полной системы (2), рассматриваются только два первых уравнения, причем второе относится только к части боковой поверхности.

Статическое состояние жидкой внутренности капли описывается уравнением

$$\nabla p = \vec{f}_V, \tag{3}$$

Рассматриваются два случая: $\vec{f} = \vec{0}$ и $\vec{f} = -\vec{e}_3 g$, где g – ускорение свободного падения при условии, что плоскость $x_3 = 0$ совпадает с плоскостью расположения капли. Уравнения равновесия жидкой пленки совпадают с уравнениями равновесия криволинейной двухмерной оболочки.

В данной работе рассматриваются два простейших из всех возможных вариантов моделирования поведения пленки. Они состоят в следующем наборе допущений о характере ее механических свойств и взаимодействия с окружающей средой.

1 Действие окружающей среды на пленку отсутствует, ее тяжестью пренебрегаем;

2 Действие ограниченной пленкой жидкой среды на саму пленку сводится к действию

изнутри нормального к ее поверхности давления:

$$-\vec{n} \cdot P = p\vec{n}.$$

3 Пленка оказывает сопротивление только действию растягивающих сил, значит:

$$S_\alpha = 0, Q_\alpha = 0, N_\alpha = 0, M_\beta = 0, M_n = 0.$$

4 Натяжение пленки в любом направлении одно и то же:

$$T_1 = T_2 = \sigma = const.$$

5 Возможное превышение или уменьшение величины допустимого натяжения σ компенсируется соответственно таким увеличением или уменьшением площади Σ пленки за счет увеличения или уменьшения ее массы путем обмена с ограниченной ей жидкостью, при котором натяжение сохраняет свое значение.

Допущения 1 – 5 приводят систему уравнений равновесия к виду:

$$\frac{\partial A_2 T_1}{\partial \xi} + A_1 A_2 \left(-\frac{T_2}{\rho_2} \right) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial A_1 T_2}{\partial \eta} + A_1 A_2 \left(+\frac{T_1}{\rho_1} \right) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} + p_\Sigma = 0, \quad (6)$$

$$T_1 = T_2 = \sigma = const. \quad (7)$$

Третьим объектом, равновесие которого необходимо рассмотреть, является материальная линия L , являющаяся границей контакта трех фаз. Она считается абсолютно жесткой с заранее известной формой. При этом учитываются лишь те силы, которые действуют в плоскости, нормальной к L , стремящиеся сдвинуть ее.

Пусть $d\vec{r}_L$ – элементарный направленный (например, соответствующий обходу контура линии L против часовой стрелки) отрезок линии L . Пусть также A_L – плоскость, нормальная к $d\vec{r}_L$ в точке $M \in L$, в которой определен вектор $d\vec{r}_L = \vec{r}_L dL$, $|\vec{r}_L| = 1$, \vec{r}_L – радиус-вектор точки материальной линии L . Со стороны пленок, разграничивающих C и D , B и D , C и B , на элемент dL действуют уравновешивающие друг друга силы: $\vec{\sigma}_{(C,D)} dL$, $\vec{\sigma}_{(B,D)} dL$, $\vec{\sigma}_{(C,B)} dL$ (в этих выражениях $|\vec{\sigma}_{(C,D)}| = \sigma_{(C,D)}$, $|\vec{\sigma}_{(B,D)}| = \sigma_{(B,D)}$, $|\vec{\sigma}_{(C,B)}| = \sigma_{(C,B)} \equiv \sigma$ – поверхностные натяжения соответствующих пленок). Перечисленные силы действуют в плоскости A_L . Поскольку материальный элемент $dL = |d\vec{r}_L|$ находится в равновесии, сумма перечисленных сил равна нулю. Отсюда:

$$\vec{\sigma}_{(C,D)} + \vec{\sigma}_{(C,B)} + \vec{\sigma}_{(B,D)} = \vec{0}. \quad (8)$$

Учитывая направления этих сил, на основании равенства (8) получаем известное выражение, связывающее соответствующие поверхностные натяжения и угол смачивания $\theta = \theta_{(B,C)}$ жидкостью B поверхности тела C :

$$\sigma_{(C,D)} = T_1 \cos\theta + \sigma_{(C,B)}. \quad (9)$$

Поскольку величины $\sigma_{(C,D)}$, $\sigma_{(C,B)}$ определяются только физической природой контактирующих веществ C и D , C и B , и поэтому являются постоянными, произведение $\sigma \cos\theta$ также является постоянным. Это означает, что при изменении по каким-то причинам угла $\theta = \theta_{(B,C)}$ величина поверхностного натяжения $\sigma_{(C,B)} \equiv \sigma$ также будет меняться.

Если форма капли известна (известен вид зависимости $\Xi(\vec{r}) = 0$), то окажутся известными величины A_1 , A_2 , R_1 , R_2 , ρ_1 , ρ_2 . Тогда на основании уравнений (4), (5) вычисляются значения T_1 , T_2 . С помощью уравнения (6) определяется распределение давления p_Σ вдоль поверхности пленки. После этого с помощью уравнения (3) определяется распределение давления p внутри капли. В этом случае условие (7) равенства T_1 и T_2 является лишним. Оно мо-

жет быть проверено по результатам вычислений с целью проверки принятых гипотез, положенных в основу построения уравнений равновесия капли. Необходимо отметить, что форма капли может быть установлена экспериментально. Если же форма капли неизвестна (неизвестна зависимость $\Xi(\vec{r})=0$), то считаются известными распределения T_1 и T_2 вдоль ее поверхности. В частности, принимается условие (7), в котором величина σ считается известной. Тогда уравнения (4) и (5) используются для установления формы капли (зависимости $\Xi(\vec{r})=0$) [6, 7]. После того как зависимость $\Xi(\vec{r})=0$ найдена (установлена форма поверхности капли, то есть пленки) определяются величины R_1 и R_2 . Это дает возможность с помощью уравнения (7) при известных распределениях T_1 и T_2 вдоль поверхности пленки найти распределение p_Σ , после чего решить уравнение (3) для распределения давления внутри капли.

Возможен и третий вариант, когда распределение давления $p(\vec{r})$ внутри капли известно. Следовательно, известно распределение p_Σ . Значит, системой (4) – (6) при условии (7) можно воспользоваться для определения формы поверхностной пленки и распределения поверхностного натяжения вдоль нее. Условие $\sigma = const$ используется для проверки принятых ранее допущений: его несоблюдение для найденного решения свидетельствует о неправомерности принятых гипотез.

Используется еще одно дополнительное условие – считается заранее известным объем капли V .

Сначала рассмотрен случай, когда $\vec{f} = 0$. Тогда (3) приобретает вид:

$$\nabla p = 0,$$

что свидетельствует о постоянстве величины давления внутри капли:

$$p = const.$$

С учетом этого обстоятельства, а также общезначимых представлений о форме капли в отсутствие силы тяжести и других объемно распределенных сил, например, инерционных, уравнение $\Xi(\vec{r})=0$ определяется не в процессе решения, а в результате проверки допущения о сферичности формы и справедливости равенства:

$$\Xi(\vec{r}) = |\vec{r}| - R_0 = 0,$$

где $R_0 = const$ – известная величина, определяемая, например, из условия об известном объеме V жидкости в капле.

Капля представляет сегмент сферы высотой h . Объем такой фигуры вычисляется по формуле

$$V = \pi h^2 \left(\frac{3R_0 - h}{3} \right).$$

Для капли должны быть известны еще высота h или угол смачивания θ , связанный с высотой h в рассматриваемом случае формулой

$$\cos \theta = \frac{R_0 - h}{R_0}.$$

Если гипотеза (7) и предположение о сферичности формы справедливы, уравнения (4) и (5) должны обратиться в тождество, а уравнение (6) использовано для установления связи между внутренним давлением и поверхностным натяжением.

Для проведения вычислений в качестве поверхностной системы координат выбрана такая система, когда положение точки на поверхности определяется ее "географическими" координатами, отсчитываемыми вдоль параллели и меридиана [8]:

$$\xi = \frac{s_1}{R} = \varphi, \quad A_1 = R, \quad \eta = \frac{s_2}{R_0}, \quad A_2 = R_0,$$

где s_2 – длина дуги меридианального сечения сферической капли; η – угловая координата точки пленки на линии, являющейся меридиональным сечением капли, отсчитываемая от горизонтального направления; $R = R(\eta) = R_0 \sin \eta$ – радиус сечения капли плоскостью, па-

параллельной ее основанию; s_1 – длина дуги сечения этой плоскостью поверхностной пленки; ξ – угловая координата точки на линии, являющимся этим сечением.

В выбранной системе координат справедливы равенства [8]:

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{\sin \alpha}{R}, \quad \frac{1}{\rho_2} = 0, \quad \frac{1}{R_1} = \frac{\cos \alpha}{R} = \frac{1}{R_0}, \quad \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_0} \frac{d\alpha}{d\eta} = \frac{1}{R_0}, \quad (10)$$

где α – угол между касательной к линии $\xi = const$ и осью симметрии капли.

Подстановка выражений (10) в систему (4) – (7) обращает первые два равенства в тождества, а равенство (6) с учетом (3) принимает вид:

$$\frac{2\sigma}{R_0} = p. \quad (11)$$

Если угол смачивания θ и объем V определены экспериментально, то при известном поверхностном натяжении σ равенство (11) определяет давление p внутри капли и наоборот.

Далее рассматривается случай, когда

$$\vec{f} = \vec{n} \rho g,$$

где $g = const$ – ускорение свободного падения; $\rho = const$ – плотность жидкости капли; \vec{n} – единичный вектор внешней к полупространству, на поверхности которого размещена капля, нормали, являющегося направляющим для оси координат z , в качестве которой выбрана ось симметрии капли, цилиндрической системы координат (R, φ, z) , отсчитываемых от плоского основания капли.

Решение уравнения (3) приобретает вид:

$$p = \rho g(h - z) + p_h, \quad 0 \leq z \leq z_\Sigma(R), \quad 0 \leq R \leq R_0,$$

где $z_\Sigma = z_\Sigma(R_\Sigma)$ – явная координатная форма выражения $\Xi(\vec{r}) = 0$; R_0 – радиусом проекции капли на плоскость, где она расположена.

На поверхности $z_\Sigma = z_\Sigma(R_\Sigma)$ давление жидкости на пленку определяется выражением

$$p_\Sigma = \rho g(h - z_\Sigma(R)) + p_h, \quad 0 \leq R \leq R_0.$$

Оно используется при рассмотрении равновесия поверхностной пленки.

Уравнение равновесия элемента dL линии, вдоль которой контактируют среды B , C и D , и в котором учтено, что $T_1 = \sigma$, с учетом (9) имеет вид:

$$\sigma_{(C,D)} = \sigma \cos \theta + \sigma_{(C,B)}.$$

Величины $\sigma_{(C,B)}$ и $\sigma_{(C,D)}$ в нем предполагаются известными. Следовательно, известна и их разность

$$\Delta\sigma = \sigma \cos \theta. \quad (12)$$

Она используется, как одно из условий, которому удовлетворяют величины σ и θ , когда $R = R_0$, а $z = z_\Sigma = 0$ (допускается, что угол θ удовлетворяет неравенству: $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$).

В процессе решения, наряду с условием (12), используется условие того, что объем капли V фиксирован и известен. Это условие является интегральным ограничением, накладываемым на эту неизвестную функцию в виде:

$$V = 2\pi \int_0^{R_0} dR \int_0^{z_\Sigma} z_\Sigma(R) dz.$$

Решение проводится методом, аналогичным методу блочных элементов [9] следующим образом.

Высота h капли предполагается известной (определена, например, экспериментально). С учетом этого область изменения координаты z – отрезок $[0, h]$ разбивается на большое число n элементарных участков $\Delta z_k = l$, $l = h/n$ точками $z_0 = h$, $z_1 = h - l$, ..., $z_k = h - kl$, ..., $z_n = h - nl = 0$. Каждый слой – отдельный блок, внутри которого решение уравнений равновесия является точным.

Слой жидкости между плоскостями $z_k = const$ и $z_{k+1} = const$, $k = 0, 1, n-1$, (обозначается слой с номером $(k, k+1)$) имеет внутри себя постоянные давление и радиус меридионального сечения, определенные в точках линии пересечения плоскости $z_k = const$ с поверхностью капли. В каждом из слоев (по аналогии с [8]):

$$\xi = \varphi = \frac{s_1}{R}, A_1 = R_1(\eta), \eta = \frac{s_2}{A_2}, A_2 = R_2 = const. \quad (13)$$

Выражения для текущих (внутри слоя) значений R_2 , $\sin \alpha$, $\cos \alpha$ имеют, с учетом того, что $\alpha = \eta$, вид:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{k2}} \frac{d\alpha}{d\eta} = \frac{1}{R_{k2}}, \sin \alpha = -\frac{1}{R_{k2}} \frac{dR_1}{d\eta}, \cos \alpha = \frac{1}{R_{k2}} \frac{dz}{d\eta}, \frac{1}{\rho_1} = \frac{\sin \alpha}{R_1}, \frac{1}{\rho_2} = 0, \frac{1}{R_1} = \frac{\cos \alpha}{R}. \quad (14)$$

При этом по-прежнему считается, что для любого номера k : $T_1 = T_2 = \sigma$. Разрывность поля давлений можно обосновать искусственным введением в модель блоков двухмерных жестких невесомых диафрагм между слоями, сдерживающих перепад давления.

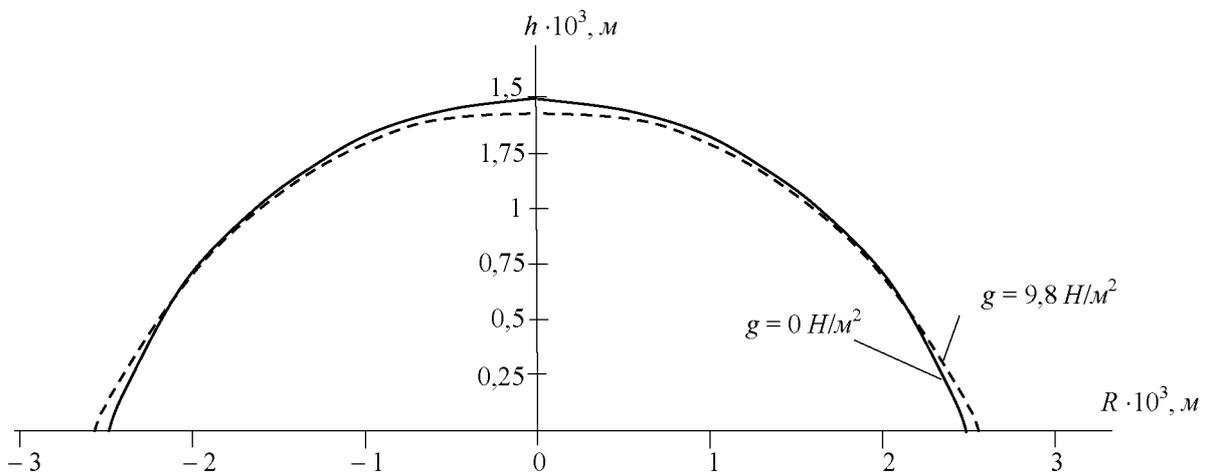
С учетом (13) и (14) внутри каждого слоя уравнение (4) выполняется тождественно, так как

$$\frac{\partial A_2}{\partial \xi} = 0, \frac{\partial T_1}{\partial \xi} = \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} = 0, \frac{1}{\rho_2} = 0.$$

Уравнение (5) также удовлетворяется тождественно путем следующих преобразований.

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1 T_2}{\partial \eta} + A_1 A_2 \left(\frac{T_1}{\rho_1} \right) &= \frac{\partial A_1}{\partial \eta} + A_1 A_2 \left(\frac{1}{\rho_1} \right) = \\ &= \frac{\partial R_1}{\partial \eta} + R_1 R_{k2} \left(\frac{\sin \alpha}{R_1} \right) = -R_{k2} \sin \alpha + R_{k2} \sin \alpha \equiv 0. \end{aligned}$$

На основании изложенного материала построен алгоритм, позволяющий по заданным радиусу кривизны купола (или известному поверхностному натяжению) капли и ее объему рассчитать форму капли, краевой угол смачивания, поверхностное натяжение (или радиус кривизны ее купола), см. рисунок 1.



$$V = V^* = 1,676 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3, \sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}$$

Рисунок 1 – Расчетная форма капли с учетом и без учета силы тяжести

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в работе математическая модель капли на горизонтальном основании

при наличии минимального количества экспериментальных данных – объем, радиус кривизны купола (или известное поверхностное натяжение), а также поверхностных натяжениях на границах жидкость-основа, основа-атмосфера, позволяет найти поверхностное натяжение в капле (или радиус кривизны ее купола).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матюхин, С. И. Измерение краевого угла смачивания как метод исследования адгезионных свойств поверхности и энергетического состояния молекул на границе раздела двух фаз [Текст] / С. И. Матюхин, К. Ю. Фроленков // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2003. – Т. 5. – № 2. – С. 216-220.
2. Фроленкова, Л. Ю. Инженерные методы определения адгезионной прочности соединения твердых тел [Текст] / Л. Ю. Фроленкова // Известия ОрелГТУ, серия "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии". – 2009. – № 1/273 (559). – С. 53 – 60.
3. Де Жен, П. Ж. Смачивание: статика и динамика [Текст] / П. Ж. де Жен // Успехи физических наук, 1987, т.151, в. 4, С. 619 – 981.
4. Бабешко, В. А. К теории блочных элементов и наноструктур [Текст] / В. А. Бабешко, О. В. Евдокимова, О. М. Бабешко // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4 (54). – С. 42 – 48.
5. Шоркин, В. С. Взаимодействие тела и его поверхности [Текст] / В. С. Шоркин, Т. В. Труфанова // Известия ТулГУ, серия "Актуальные вопросы механики". – 2005. – Т. 1. – В. 1. – С. 202 – 209.
6. Смирнов, В. И. Курс высшей математики [Текст] / В. И. Смирнов. – М.: Наука, 1967. – Т. 3. – 656 с.
7. Новиков, С. П. Современные геометрические структуры и поля [Текст] / С. П. Новиков, И. А. Тайманов. – М.: Изд-во МЦНМО, 2005. – 580 с.
8. Аксельрад, Э. Л. Гибкие оболочки [Текст] / Э. Л. Аксельрад. – М.: Наука, 1976. – 376 с.
9. Бабешко, В. А. О методе блочного элемента [Текст] / В. А. Бабешко, О. М. Бабешко, О. М. Евдокимова // Изв. РАН. МТТ. – 2010. – № 3. – С. 155 – 163.

Витковский Иван Викторович

Федеральное Государственное Унитарное Предприятие "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова" ФГУП "НИИЭФА им. Д.В.Ефремова", г. Санкт-Петербург
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
Тел. (8-812) 464-8963
E-mail: vitkoviv@sintez.niiefa.spb.su

Фроленкова Лариса Юрьевна

Государственный университет-УНПК, г. Орел
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры "Физика"
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-44
E-mail: LaraFrolenkova@yandex.ru

Шоркин Владимир Сергеевич

Государственный университет-УНПК, г. Орел
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой "Физика"
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-44
E-mail: VSorkin@yandex.ru

Якушина Светлана Ивановна

Государственный университет-УНПК, г. Орел
старший преподаватель кафедры "Высшая математика"
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-48
E-mail: VSorkin@yandex.ru

I.V. VITKOVSKIJ, L.YU. FROLENKOVA, V.S. SHORKIN, S.I. YAKUSHINA

THE CALCULATION METHOD OF THE FORM OF HEAVY DROPS AND ITS SURFACE TENSION

The method of calculation of the form of a heavy drop, which lies on a horizontal surface,

and technique of its use in experimental conditions for definition of a surface tension is offered. The model of environment, which leans against representation that it is association of a three-dimensional entrails, a two-dimensional material pellicle and closing drop a material, is put in a basis. All three kinds of the environments, which forms a three-dimensional body, is interacted among themselves. For calculation of the drop's form, Ideas of a method of block elements are used.

Keywords: surface tension, limiting wetting angle, angle of wetting, method of block element.

BIBLIOGRAPHY

1. Matjuhin, S. I. Izmerenie kraevogo ugla smachivaniya kak metod issledovaniya adgezionnyh svojstv poverhnosti i jenergeticheskogo sostojaniya molekul na granice razdela dvuh faz [Tekst] / S. I. Matjuhin, K. Ju. Frolenkov // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granicy. – 2003. – T. 5. – № 2. – S. 216-220.
2. Frolenkova, L. Ju. Inzhenernye metody opredeleniya adgezionnoj prochnosti soedineniya tverdyh tel [Tekst] / L. Ju. Frolenkova // Izvestija OrelGTU, serija "Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii". – 2009. – № 1/273 (559). – S. 53 – 60.
3. De Zhen, P. Zh. Smachivanie: statika i dinamika [Tekst] / P. Zh. de Zhen // Uspeli fizicheskikh nauk, 1987, t.151, v. 4, S. 619 – 981.
4. Babeshko, V. A. K teorii blochnyh jelementov i nanostruktur [Tekst] / V. A. Babeshko, O. V. Evdokimova, O. M. Babeshko // Vestnik SamGU – Estestvenonauchnaja serija. – 2007. – № 4 (54). – S. 42 – 48.
5. Shorkin, V. S. Vzaimodejstvie tela i ego poverhnosti [Tekst] / V. S. Shorkin, T. V. Trufanova // Izvestija TulGU, serija "Aktual'nye voprosy mehaniki". – 2005. – T. 1. – V. 1. – S. 202 – 209.
6. Smirnov, V. I. Kurs vysshej matematiki [Tekst] / V. I. Smirnov. – M.: Nauka, 1967. – T. 3. – 656 s.
7. Novikov, S. P. Sovremennye geometricheskie struktury i polja [Tekst] / S. P. Novikov, I. A. Tajma-nov. – M.: Izd.-vo MCNMO, 2005. – 580 s.
8. Aksel'rad, Je. L. Gibkie obolochki [Tekst] / Je. L. Aksel'rad. – M.: Nauka, 1976. – 376 s.
9. Babeshko, V. A. O metode blochnogo jelementa [Tekst] / V. A. Babeshko, O. M. Babeshko, O. M. Evdokimo-va // Izv. RAN. MTT. – 2010. – № 3. – S. 155 – 163.

Vitkovsky Ivan Viktorovich

Federal State Unitary Enterprise “Scientific-research institute of electro physical equipment named by D.V.Efremov”,
St. Petersburg

Doctor of technical sciences, leading scientific worker

Tel.: 8-812-464-8963

E-mail: vitkoviv@sintez.niiefa.spb.su

Frolenkova Larisa Yurievna

State University ESPC

Candidate of physico-mathematical sciences, associated professor, chair “Physics”

Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862-41-98-44

E-mail: LaraFrolenkova@yandex.ru

Shorkin Vladimir Sergeevich

State University ESPC

Doctor of physico-mathematical sciences, professor, chairholder of “Physics”

Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 4862-41-98-44

E-mail: VSorkin@yandex.ru

Yakushina Svetlana Ivanovna

State University ESPC

Senior teacher, chair “Higher mathematics”

Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 4862-41-98-48

E-mail: VSorkin@yandex.ru

ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ ДВУХМЕРНОГО ВЕКТОРА

Рассматривается задача нахождения функции распределения модуля двухмерного вектора, компоненты которого есть независимые, нормально распределенные случайные величины с нулевыми математическими ожиданиями и неравными дисперсиями. Приведены формулы и таблицы для расчета математического ожидания и дисперсии.

Ключевые слова: функция распределения, нормальное распределение случайной величины, математическое ожидание, дисперсия.

В ряде задач существует необходимость нахождения закона распределения модуля $Y = \sqrt{X_1^2 + X_2^2}$ двухмерного вектора (X_1, X_2) , компоненты которого есть нормально распределенные случайные величины с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$. Коэффициент корреляции X_1 и X_2 без ограничения общности можно считать равным нулю. В противном случае ортогональным преобразованием координат любой нормально распределенный случайный вектор (X_1, X_2) может быть преобразован в вектор с некоррелированными случайными компонентами. Для определенности будем считать далее, что $\sigma_2 < \sigma_1$.

Плотность распределения величины $Y = \sqrt{X_1^2 + X_2^2}$ имеет вид [1]

$$f_Y(r) = \int_0^{2\pi} r f_{x_1}(r \cos \varphi) f_{x_2}(r \sin \varphi) d\varphi, \quad r > 0, \quad (1)$$

где

$$f_{x_1}(x_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{x_1^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad f_{x_2}(x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{x_2^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (2)$$

– плотность распределения величины X_1 и X_2 .

Подставляя (2) в (1) получим

$$f_Y(r) = \int_0^{2\pi} r \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(r \cos \varphi)^2}{2\sigma_1^2}\right] \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{(r \sin \varphi)^2}{2\sigma_2^2}\right] d\varphi,$$

и после элементарных алгебраических преобразований это выражение примет вид

$$f_Y(r) = \frac{r}{\sigma_1 \sigma_2} \exp\left[-\frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}\right)\right] \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2}\right) \cos 2\varphi\right] d\varphi.$$

Этот интеграл путем замены $u = 2\varphi$ приводится к функции Бесселя нулевого порядка от минимального аргумента

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2}\right) \cos u\right] du &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{-i \left[i \frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_2^2} - \frac{1}{\sigma_1^2}\right)\right] \cos u\right\} du = \\ &= J_0 \left[i \frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_2^2} - \frac{1}{\sigma_1^2}\right)\right] = I_0 \left[i \frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2}\right)\right]. \end{aligned}$$

Таким образом, плотность распределения величины Y равна

$$f_Y(r) = \frac{r}{\sigma_1 \sigma_2} \exp\left[-\frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}\right)\right] I_0 \left[i \frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2}\right)\right], \quad r > 0. \quad (3)$$

Эта функция обобщает релеевский закон распределения, который является частным случаем (3) при $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$.

Введем обозначения

$$k_1 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)/4\sigma_1^2\sigma_2^2,$$

$$k_2 = (\sigma_1^2 - \sigma_2^2)/4\sigma_1^2\sigma_2^2.$$

Тогда выражение (3) примет вид

$$f_Y(r) = \frac{r}{\sigma_1 \sigma_2} \exp(-k_1 r^2) I_0(k_2 r^2), \quad r > 0. \quad (4)$$

Найдем функцию распределения величины Y , т.е. вероятность того, что модуль вектора не превосходит заданной величины r :

$$F_Y(r) = \int_0^r \frac{\rho}{\sigma_1 \sigma_2} \exp(-k_1 \rho^2) I_0(k_2 \rho^2) d\rho =$$

$$= \frac{1}{2k_1 \sigma_1 \sigma_2} \int_0^r \exp(-k_1 \rho^2) I_0(k_2 \rho^2) d(k_2 \rho^2) = \frac{1}{2k_1 \sigma_1 \sigma_2} \int_0^{k_2 r^2} \exp\left(-\frac{k_1}{k_2} \tau\right) I_0(\tau) d\tau.$$

Обозначив $\eta = k_1/k_2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}$, получим

$$F_Y(r) = \frac{1}{2k_1 \sigma_1 \sigma_2} \int_0^{k_2 r^2} \exp(-\eta \tau) I_0(\tau) d\tau = \frac{1}{2k_1 \sigma_1 \sigma_2} \int_0^R \exp(-\eta \tau) I_0(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $R = k_2 r^2$.

Для нахождения интеграла в выражении (5) нам понадобится

Лемма. Интеграл $I_n = \int_0^R \exp(-\eta \tau) I_n(\tau) d\tau = 0, 1, 2, \dots$ удовлетворяет

рекуррентному соотношению

$$I_n - 2\eta I_{n+1} + I_{n+2} = 2B_{n+1}, \quad (6)$$

где

$$B_n = \exp(-\eta R) I_{n+1}(R).$$

Доказательство.

Интегрируя по частям

$$I_{n+1} = \int_0^R \exp(-\eta \tau) I_{n+1}(\tau) d\tau$$

и пользуясь известным из теории функций Бесселя [2] соотношением

$$I_n(z) + I_{n+2}(z) = 2 \frac{dI_{n+1}(z)}{dz} = 2I_{n+1}'(z),$$

получим

$$I_{n+1} = -\frac{1}{\eta} \exp(-\eta \tau) I_{n+1}(\tau) \Big|_0^R + \frac{1}{\eta} \int_0^R \exp(-\eta \tau) I_{n+1}(\tau) d\tau =$$

$$= -\frac{1}{\eta} \exp(-\eta \tau) I_{n+1}(\tau) \Big|_0^R + \frac{1}{\eta} J_n + \frac{1}{2\eta} J_{n+2}.$$

Учитывая, что $I_{n+1}(0) = 0$ для $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, получим соотношение

$$I_{n+1} = -\frac{1}{\eta} B_{n+1} + \frac{1}{2\eta} J_n + \frac{1}{2\eta} J_{n+2},$$

доказывающее лемму.

Пользуясь соотношением (6), найдем величину интеграла I_0 . Для этого запишем соотношение (6) при $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ и рассмотрим $J_0, J_1, J_2, J_3, \dots$ как неизвестные в полученной бесконечной системе линейных неоднородных уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & -2\eta & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & -2\eta & 1 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2\eta & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_0 \\ J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2B_1 \\ 2B_2 \\ 2B_3 \\ 2B_4 \\ \dots \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Неизвестное J_0 найдем по правилу Крамера:

$$J_0 = \frac{\Delta_0}{\Delta}.$$

Определитель системы (8) равен $\Delta = 1$,

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} 2B_1 & -2\eta & 1 & 0 & \dots \\ 2B_2 & 1 & -2\eta & 1 & \dots \\ 2B_3 & 0 & 1 & -2\eta & \dots \\ 2B_4 & 0 & 0 & 1 & -2\eta & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix}.$$

Раскрывая определитель Δ_0 по элементам первого столбца, получим

$$\Delta_0 = 2B_1 \cdot 1 - 2B_2(-2\eta) + \dots + (-1)^n 2B_{n+1}D_n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n 2B_{n+1}D_n, \quad (9)$$

где определитель D_n имеет вид

$$D_n = \begin{vmatrix} Q_n & A \\ O & E \end{vmatrix}$$

Здесь Q_n, A, E, O – матрицы:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & -2\eta & 1 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 1 & -2\eta & 1 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2\eta & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix} \Bigg\}_n, \quad Q_n = \underbrace{\begin{bmatrix} -2\eta & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 1 & -2\eta & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -2\eta & 1 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2\eta \end{bmatrix}}_n \Bigg\}_n.$$

Очевидно, что $D_n = |Q_n| |E|$. Определитель матрицы E равен 1 , следовательно, $D_n = |Q_n|$. Найдем определитель матрицы Q_n .

Положим

$$D_0 = 1, D_1 = -2\eta. \quad (10)$$

Тогда D_n удовлетворяет разностному уравнению

$$D_n = -2\eta D_{n-1} - D_{n-2}. \quad (11)$$

Решая разностное уравнение (11) при начальных условиях получим

$$D_n = \frac{\lambda_2 + 2\eta}{\lambda_2 - \lambda_1} \lambda_1^n - \frac{\lambda_1 + 2\eta}{\lambda_2 - \lambda_1} \lambda_2^n, \quad (12)$$

где $\lambda_1 = -\eta + \sqrt{\eta^2 - 1}$, $\lambda_2 = -\eta - \sqrt{\eta^2 - 1}$.

Для примера найдем величину определителя D_n при $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$:

$$D_0 = 1,$$

$$D_1 = -2\eta,$$

$$D_2 = 4\eta^2 - 1,$$

$$D_3 = -8\eta^3 + 4\eta,$$

$$D_4 = 16\eta^4 - 12\eta^2 + 1,$$

$$D_5 = -32\eta^5 + 32\eta^3 - 6\eta.$$

Заметим также, что $\lambda_1 \lambda_2 = 1$.

Так как $\lambda_1 + 2\eta = -\lambda_2$ и $\lambda_2 + 2\eta = -\lambda_1$, то выражение (12) можно упростить

$$D_n = \frac{\lambda_2^{n+1} - \lambda_1^{n+1}}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (13)$$

В соответствии с (7), (9), и (13) получаем

$$\begin{aligned} J_0 = \Delta_0 &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n 2 \cdot B_{n+1} \frac{\lambda_2^{n+1} - \lambda_1^{n+1}}{\lambda_2 - \lambda_1} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} 2 \cdot \exp(-\eta R) I_n(R) \frac{\lambda_2^n - \lambda_1^n}{\lambda_2 - \lambda_1} = \\ &= 2 \exp(-\eta R) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\lambda_2^n - \lambda_1^n}{\lambda_2 - \lambda_1} I_n(R). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} F_Y(r) &= \frac{1}{2k_2 \sigma_1 \sigma_2} 2 \cdot \exp(\eta k_2 r^2) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\lambda_2^n - \lambda_1^n}{\lambda_2 - \lambda_1} I_n(k_2 r^2) = \\ &= \frac{4\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \exp\left(-\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{4\sigma_1^2 \sigma_2^2} r^2\right) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\lambda_2^n - \lambda_1^n}{\lambda_2 - \lambda_1} I_n\left(\frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{4\sigma_1^2 \sigma_2^2} r^2\right). \end{aligned} \quad (14)$$

Представим аргумент функции распределения в безразмерной форме $\bar{r} = \frac{r}{\sigma_2}$ и обозначим $k = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$. Тогда выражение (14) примет вид

$$F_{\bar{r}}(\bar{r}) = \frac{4}{(1/k - k)} \exp\left[-\frac{\bar{r}^2}{4}(1 + k^2)\right] \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\lambda_2^n - \lambda_1^n}{\lambda_2 - \lambda_1} I_n\left[\frac{\bar{r}^2}{4}(1 - k^2)\right], \quad (15)$$

где

$$\lambda_1 = -\frac{1 - k}{1 + k}, \quad \lambda_2 = -\frac{1 + k}{1 - k}.$$

Сделаем несколько замечаний, касающихся полученной функции распределения.

1. Ряд в выражении (15) имеет положительные члены и сходится равномерно на любом интервале $(0, b)$, $b > 0$.

2. Обозначим через $U(\bar{r} = r_0)$ множество точек (x, y) , принадлежащих кругу с относительным радиусом r_0 , т. е.

$$U(\bar{r} = r_0) = \left\{ (x, y) : \frac{1}{\sigma_2} \sqrt{x^2 + y^2} \leq r_0 \right\},$$

и через $F(t)$ - функцию распределения нормально распределенной случайности величины с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией, равной единице.

Легко показать, что при $\mu > 0$ имеет место двойное неравенство

$$1 - \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) < P\left\{(x, y) \in U\left(\bar{r} = \frac{\mu}{k}\right)\right\} = F_{\bar{r}}\left(\frac{\mu}{k}\right) < F(\mu). \quad (16)$$

3. Из теории функций Бесселя [2] известно рекуррентное соотношение.

Понизив значение индекса n на единицу и разрешив полученное соотношение относительно I_n , получим

$$I_n = I_{n-2} - \frac{2(n-1)}{x} I_{n-1}.$$

Из выражения (11) имеем

$$D_{n-1} = -2\eta D_{n-2} - D_{n-3}.$$

Тогда общий член ряда в выражении (15) удовлетворяет рекуррентному соотношению

$$C_n = (-1)^{n-1} D_{n-1} I_n = \left[2\eta \frac{I_{n-2}}{I_{n-1}} - \frac{4\eta(n-1)}{x} \right] C_{n-1} + \left[\frac{2(n-1)}{x} \frac{I_{n-1}}{I_{n-2}} \right] C_{n-2}, \quad (17)$$

где $C_{n-1} = (-1)^{n-2} D_{n-2} I_{n-1}$, $C_{n-2} = (-1)^{n-3} D_{n-3} I_{n-2}$.

Это рекуррентное соотношение иногда более удобно для вычислений, чем выражение для общего члена ряда в формуле (15).

В таблице 1 и на рисунке 1 приведены результаты расчетов по формуле (15) для некоторых значений r и k .

Таблица 1 – Значения функции распределения величины $Y = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ в зависимости от $r = \frac{r}{\sigma_2}$ и $k = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

| \bar{r} | k | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| 0,5 | 0,1175 | 0,0951 | 0,0836 | 0,0719 | 0,0601 | 0,0482 | 0,0363 | 0,0248 | 0,0121 |
| 1 | 3935 | 3283 | 2926 | 2548 | 2153 | 1743 | 1318 | 0885 | 0444 |
| 2 | 8647 | 7917 | 7383 | 6714 | 5901 | 4942 | 3846 | 2635 | 1340 |
| 3 | 9889 | 9683 | 9438 | 9019 | 8351 | 7359 | 5993 | 4256 | 2214 |
| 4 | 9997 | 9974 | 9923 | 9785 | 9455 | 8769 | 7532 | 5605 | 3010 |
| 5 | 9999 | 9997 | 9993 | 9965 | 9853 | 9494 | 8577 | 6724 | 3756 |

Математическое ожидание и дисперсия функции $Y = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ получены в [3, 4].

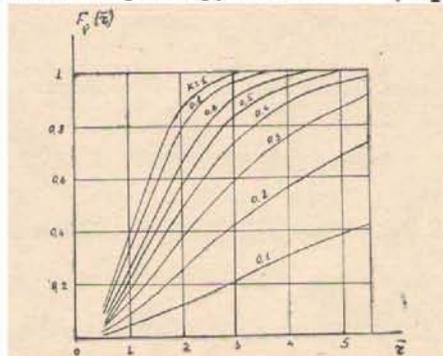


Рисунок 1 – Результаты расчетов по формуле (15) для некоторых значений r и k

В работе [3] для вычисления математического ожидания в интеграле

$$MY = \int_0^\infty r f y(r) dr = 2 \int_0^\infty \frac{r^2}{2\sigma_1\sigma_2} \exp\left(-\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{4\sigma_1^2\sigma_2^2} r^2\right) I_0\left(\frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{4\sigma_1^2\sigma_2^2} r^2\right) dr$$

делаются замены

$$x = \frac{r^2}{2\sigma_1\sigma_2}, \quad v = \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2},$$

с помощью которых этот интеграл приводился к виду

$$MY = \sqrt{2\sigma_1\sigma_2} \int_0^\infty \sqrt{x} \exp(-x \ln v) I_0(xshv) dx.$$

Используя значение 6,628 (4) [6], автор работы [4] показал, что

$$MY = \sqrt{2\sigma_1\sigma_2} \frac{\sqrt{\pi}}{2} P_{1/2} chv \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}} F\left[-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, 1, \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}\right)^2\right] \quad (18)$$

где $P_{1/2}$ - функция Лежандра первого рода с аргументом $z > 1$, $F(\alpha, \beta, \nu, u)$ - гипергеометрическая функция.

Количество опубликованных таблиц функций Лежандра и в особенности таблиц гипергеометрических функций весьма ограничено, поэтому имеет смысл выражение (18) преобразовать. Для этого используем интегральное представление для функций Лежандра с полупеллым индексом [6]:

$$P_{\frac{1}{2}}(chv) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{chv + shv \cos \psi} d\psi.$$

Воспользовавшись заменой переменной $\varphi = \frac{\psi}{2}$, получим

$$\begin{aligned} P_{\frac{1}{2}}(chv) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sqrt{chv + shv \cos 2\varphi} d\varphi = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sqrt{chv + shv - 2chv \sin^2 \varphi} d\varphi = \frac{2}{\pi} \sqrt{chv + shv} E(u), \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} E(u) &= \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - u^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \text{ полный эллиптический интеграл второго рода,} \\ u^2 &= \frac{2chv}{chv + shv}. \end{aligned}$$

Таблица эллиптических интегралов имеются, например, в [8]. С учетом (19) выражение для математического ожидания может быть приведено к виду

$$MY = \sqrt{2\sigma_1\sigma_2} \frac{\sqrt{chv + shv}}{\sqrt{\pi}} E(u). \quad (20)$$

Подставив в (20)

$$ch v = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2\sigma_1\sigma_2}, \quad sh v = \frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{2\sigma_1\sigma_2},$$

получим окончательное выражение для математического ожидания:

$$MY = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_1 \frac{2}{\pi} (u), u = \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2}. \quad (21)$$

Этот результат совпадает с результатом, полученным в работе [4] другим способом, если положить в [4] коэффициент корреляции величин X_1 и X_2 равным нулю (необходимо учесть также, что в подкоренном выражении знаменателя формулы для математического ожидания, полученной в [4], допущена опечатка – показатель степени должен быть равен трём, а не двум).

Заметим, что при $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$ рассматриваемое распределение переходит в распределение Релея, математическое ожидание которого равно $MY = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_1$. При $\sigma_2 = 0$ рассматриваемое распределение переходит в распределение $\sqrt{x^2}$ с одной степенью свободы, математическое ожидание которого равно $MY = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_1$. Соотношение (21) даёт именно эти результаты, так как при $\sigma_1/\sigma_2 = 1$ коэффициент $\xi = \frac{2}{\pi} (u) = 1$, а при $\sigma_1/\sigma_2 \rightarrow \infty$ коэффициент $\xi = \frac{2}{\pi}$.

В таблице 2 приведены значения коэффициента ξ в зависимости от величины отношения σ_1/σ_2 .

Таблица 2 – Значения коэффициента $\xi = \frac{2}{\pi} E \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2} \right]$ в зависимости от отношения $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

| σ_1/σ_2 | ξ | σ_1/σ_2 | ξ | σ_1/σ_2 | ξ | σ_1/σ_2 | ξ |
|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| 1 | 12 | 1,8 | 0,7937 | 3,5 | 0,6935 | 5,5 | 0,6620 |
| 1,2 | 0,9186 | 2 | 0,7710 | 4 | 0,6802 | 6 | 0,6589 |
| 1,4 | 0,8631 | 2,5 | 0,7325 | 4,5 | 0,6748 | 6,5 | 0,6576 |
| 1,6 | 0,8234 | 3 | 0,7062 | 5 | 0,6688 | | 0,6366 |

Дисперсия функции $Y = \sqrt{X_1^2 + X_2^2}$ вычисляется из равенства $DY = M(Y^2) - (MY)^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - (MY)^2$.

Приведём пример, иллюстрирующий полученные результаты.

Пусть $\sigma_1 = 10$, $\sigma_2 = 4$. Найдём вероятность попадания случайного вектора в круг радиуса $r = 12$.

В этом примере $\bar{r} = 3$, $k = 0,4$, $\eta = \frac{116}{84}$. Для вычисления $F_{\bar{r}}(\bar{r})$ будем пользоваться рекуррентным соотношением (17). Чтобы получить результаты с четырьмя верными знаками, достаточно ограничиться вычислением девяти членов ряда. В результате получим $F_{\bar{r}}(3) = 0,7359$.

Двойное неравенство (16) можно использовать для оценочных расчётов. Так как в рассматриваемом примере $\bar{r} = \frac{\mu}{k} = 3$, то $\mu = 3 \cdot 0,4 = 1,2$ и (16) будет иметь вид $0,513 = 1 - \exp(-0,72) < F_{\bar{r}}(3) < F(1,2) = 0,8849$.

Математическое ожидание равно $MY = 9,181$, дисперсия $DY = 31,718$.

При решении задач динамики космического полета представляет интерес нахождения вероятностных характеристик элементов почти круговых орбит. Если расчетные значения вектора состояния соответствуют круговой орбите, а отклонения компонент вектора состояния от их расчетных значений есть нормально распределенные случайные величины, то такие характеристики орбиты, как, например, долгота восходящего узла, накопление, также имеют нормальное распределение, так как линейно выражаются через начальные отклонения вектора состояния. Эксцентриситет почти круговых орбит нелинейно зависит от отклонений компонент вектора состояния, так как выражается формулой $e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2}$, где e_1 и e_2 – нормально распределенные случайные величины с нулевыми математическими ожиданиями и неравными дисперсиями [8].

В расчетах, связанных с посадкой КА, приходится находить вероятность попадания КА в круг определенного радиуса r , т.е. $P\{\sqrt{x^2 + y^2} \leq r\}$, где отклонения координат от точки посадки x и y от номинальной точки посадки имеют нормальное распределение с нулевыми математическими ожиданиями и неравными дисперсиями. Аналогичный вопрос исследуется при решении задач, связанных с районами падения ступеней ракетносителя.

При решении задач коррекции траектории КА приходится находить распределение модуля вектора корректирующего импульса, который в случае двухпараметрической коррекции имеет вид $\sqrt{V_x^2 + V_y^2}$, где V_x и V_y – компоненты вектора корректирующего импульса, имеющие нормальное распределение с нулевыми математическими ожиданиями и неравными дисперсиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] / Б.Р. Левин. – М: Советское радио, 1969. – 752 с.
2. Никифоров, А.Ф. Основы теории специальных функций [Текст] / А.Ф. Никифоров, В.Б. Уваров. – М: Наука, 1974. – 304 с.
3. Сиротенко, Ю.В. Космические исследования [Текст] / Ю.В. Сиротенко. – М. 13, №2, 275, 1975.
4. Дяттерев, В.Г. Космические исследования [Текст] / В.Г. Дяттерев. – М. 9, №5, 781, 1971.
5. Градштейн, И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений [Текст] / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с.

6. Лебедев, Н.Н. Специальные функции и их приложения [Текст] / Н.Н. Лебедев. – М.: Физматгиз, 1963. – 1108 с.
7. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Физматгиз, 1962. – 723 с.
8. Эльсберг, П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли [Текст] / П.Е. Эльсберг. – М.: Наука, 1965. – 537 с.

Потураева Татьяна Вячеславовна

Государственный университет – УНПК, г. Орел
Доцент кафедры «Высшая математика»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Телефон: 89536144277
E-mail: tanpo77@mail.ru

Брума Екатерина Владимировна

Государственный университет – УНПК, г. Орел
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Телефон: 8 (4862) 73-43-49
E-mail: skimkafedra@yandex.ru

T.V. POTURAYEVA, E.V. BRUMA

**THE LAW OF DISTRIBUTION OF THE MODULE
OF A TWO-DIMENSIONAL VECTOR**

Is examined the task of finding the function of the distribution of the module of the two-dimensional vector, whose component essence the independent, normally distributed random variables with the zero mathematical expectations and the unequal dispersions. Formulas and tables for calculating of mathematical expectation and dispersion are given.

Keywords: *the distribution function, normal random number distribution, mathematical expectation, dispersion.*

BIBLIOGRAPHY

1. Levin, B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki [Tekst] / B.R. Levin. – М: Sovetskoe radio, 1969. – 752 s.
2. Nikiforov, A.F. Osnovy teorii special'nyh funktsij [Tekst] / A.F. Nikiforov, V.B. Uvarov. – М: Nauka, 1974. – 304 s.
3. Sirotenko, Ju.V. Kosmicheskie issledovaniya [Tekst] / Ju.V. Sirotenko. – М. 13, №2, 275, 1975.
4. Djagterev, V.G. Kosmicheskie issledovaniya [Tekst] / V.G. Djagterev. – М. 9, №5, 781, 1971.
5. Gradshtejn, I.S. Tablicy integralov, summ, rjadov i proizvedenij [Tekst] / I.S. Gradshtejn, I.M. Ryzhik. – М.: Fizmatgiz, 1963. – 1100 s.
6. Lebedev, N.N. Special'nye funktsii i ih prilozheniya [Tekst] / N.N. Lebedev. – М.: Fizmatgiz, 1963. – 1108 s.
7. Bronshtejn, I.N. Spravochnik po matematike [Tekst] / I.N. Bronshtejn, K.A. Semendjaev. – М.: Fizmatgiz, 1962. – 723 s.
8. Jel'sberg, P.E. Vvedenie v teoriju poleta isskustvennyh sputnikov Zemli [Tekst] / P.E. Jel'sberg. – М.: Nauka, 1965. – 537 s.

Poturaeva Tatiana Vyacheslavovna

State University ESPC
Associated professor, chair “Higher mathematics”
Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 89536144277
e-mail: tanpo77@mail.ru

Bruma Ekaterina Vladimirovna

State University ESPC
Post-graduate student of department «Building designs and materials»
Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8 (4862) 73-43-49
E-mail: skimkafedra@yandex.ru

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ЗАДАЧА С СИНГУЛЯРНЫМ РЕШЕНИЕМ

Рассматривается задача на максимум для относительно простого линейного функционала при относительно простых ограничениях. Описан алгоритм построения одного из её решений, которое оказывается сингулярным. Полученное решение позволяет найти точную верхнюю грань множества значений функционала. Приводится пример технологического процесса, связанного с рассматриваемой задачей.

Ключевые слова: экстремум функционала, сингулярное решение, точная верхняя грань, обобщённая функция.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Когда-то на студенческой математической олимпиаде в Московском физико-техническом институте была предложена задача (к сожалению, авторам не известно кем именно):

пусть функция $f(x, y) \geq 0$ непрерывна на квадрате $0 \leq x \leq 1$; $0 \leq y \leq 1$ и удовлетворяет условиям

$$\int_0^1 f(x, y) dx \leq 1 \text{ при } 0 \leq y \leq 1 \text{ и } \int_0^1 f(x, y) dy \leq 1 \text{ при } 0 \leq x \leq 1; \quad (1)$$

$$\text{доказать: } I[f] = \int_0^1 \int_0^1 |x - y| f(x, y) dx dy \leq \frac{1}{2}.$$

Представляет интерес её “естественное усиление”:

найти $\bar{I} = \sup_{f \in C^*} I[f]$, а также функцию $\bar{f}(x, y)$ такую, что $I[\bar{f}] = \bar{I}$, где C^* – класс функций,

удовлетворяющих условиям исходной задачи, а требование $\bar{f}(x, y) \in C^*$ необязательно.

Именно такая “усиленная” версия и рассматривается в дальнейшем. Несмотря на “хороший” функционал и “простые” ограничения, идею решения авторам найти не удалось. Пришлось действовать “в лоб” путём конструирования алгоритма, позволяющего построить “понятное” точное решение. На этом пути авторы столкнулись с интересными фактами, заставившими взглянуть на задачу со стороны и написать данную статью.

Вариационные задачи в физике и технике возникают, как правило, вследствие переформулировки дифференциальных уравнений, описывающих тот или иной объект, в интегральные [1]. Решения подобных задач обладают замечательным свойством: если коэффициенты исходных дифференциальных уравнений и граничные условия “хорошие” (т.е. достаточно гладкие), то и решение будет “хорошим” [1-3]. Для поиска таких решений разработаны эффективные методы, например, метод конечных элементов [4]. Однако вариационные постановки возникают не только в физике и технике, но и в других областях: теории оптимизации, экономике и др., и тогда они уже не связаны с краевыми задачами. Понятие “вариационная задача” оказывается шире понятия “краевая задача”. В этой связи возникает вопрос: можно ли для решения таких “нефизических” задач заимствовать методы из физики и техники, такие как метод конечных элементов? Другими словами, можно ли, по аналогии с краевыми задачами, гарантировать хорошее решение при “хорошем” функционале и “хороших” ограничениях? Наша статья даёт отрицательный ответ. Мы привели пример “хорошей” вариационной задачи, у которой, как будет показано, существуют сингулярные решения, причём сингулярные всюду, где они отличны от нуля. Не менее интересно и то, что наш пример – отнюдь не экзотика. Нетрудно представить себе технологический процесс, в котором рассматриваемая задача играет важную роль. Дальнейшее изложение организовано следующим образом. Сначала мы конструируем алгоритм решения задачи на максимум $I[f]$ на некото-

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Разобьём единичный квадрат, обозначаемый далее Q , на N^2 маленьких квадратиков Q_i , которые занумеруем в произвольном порядке, и пусть $f_i^- = \inf_{(x,y) \in Q_i} f(x,y)$. Пусть также $f_N^-(x,y)$ есть кусочно постоянная функция, принимающая значение f_i^- на внутренности каждого квадратика Q_i и значение 0 на его границе ∂Q_i . Очевидно, что $I[f_N^-] \leq I[f]$, а также $\lim_{N \rightarrow \infty} I[f_N^-] = I[f]$, поскольку $I[f_N^-]$ есть сумма Римана интеграла $I[f]$.

Пусть $\Omega(N,C)$ есть специальный класс функций $f_N(x,y) \geq 0$, постоянных внутри каждого квадратика Q_i , обращающихся в 0 на ∂Q_i , удовлетворяющих условию (1) и таких, что

$$\iint_Q f_N(x,y) dx dy = C, \text{ где } C = \iint_Q f_N^-(x,y) dx dy.$$

Ближайшей целью будет получение точной верхней оценки $I[f_N]$ на $\Omega(N,C)$. Для этого при фиксированных N и C поэтапно преобразуем $f_N^-(x,y) \rightarrow f_N^1(x,y) \rightarrow f_N^2(x,y) \rightarrow \dots$ так, чтобы $f_N^n(x,y) \in \Omega(N,C)$ и $I[f_N^-] \leq I[f_N^1] \leq I[f_N^2] \leq \dots$.

Опишем это преобразование. Представим себе ящик, дном которого является квадрат Q . Разделим его тонкими вертикальными перегородками параллельно осям OX и OY на N^2 одинаковых ячеек (получится что-то вроде ящика для бутылок). Пусть нумерация ячеек совпадает с уже введённой нумерацией квадратиков Q_i . Продольный (т.е. параллельный оси OX) ряд ячеек, содержащий ячейку Q_i , обозначим R_i , а поперечный (т.е. параллельный оси OY) ряд ячеек, содержащий ту же ячейку, обозначим C_i . Насыпем в каждую ячейку песок до уровня f_i^- . Т.о., поверхность песка будет представлять собой график функции $f_N^-(x,y)$, причем, в силу условия (1), объем песка в каждом продольном (или поперечном) ряду ячеек будет меньше либо равен $\varepsilon = 1/N$. Далее, возьмем внедиагональную ячейку с максимальным по всем внедиагональным ячейкам количеством песка. Если таких несколько, то берем любую из них. Пусть выбранная ячейка имеет номер i и для определенности она находится в левой четверти квадрата Q , разделенного диагоналями $y = x$ и $y = 1 - x$ на 4 равные части.

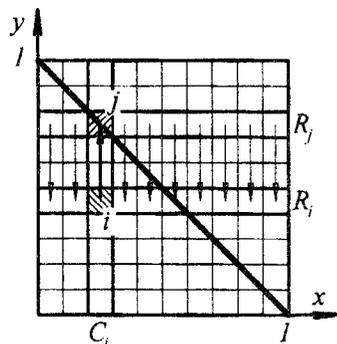


Рисунок 1 – Преобразование

$$f_N^n(x,y) \rightarrow f_N^{n+1}(x,y)$$

Пусть Q_j – ячейка, лежащая на диагонали $y = 1 - x$ в том же поперечном ряду C_i , что и Q_i , а (x_i, y_i) и (x_j, y_j) – центры Q_i и Q_j соответственно. Тогда $x_j = x_i$ и $y_j = 1 - x_i$. Пересыпем весь песок из Q_i в диагональную ячейку Q_j (рис. 1). Получим функцию $f_N^1(x,y)$, причем

$$\int_0^1 f_N^1(x,y) dy = \int_0^1 f_N^-(x,y) dy \leq 1 \text{ при } 0 \leq x \leq 1 \text{ и}$$

$$\int_0^1 f_N^1(x,y) dx \leq 1 \text{ при } \left(0 \leq y \leq y_j - \frac{\varepsilon}{2} \right) \vee \left(y_j + \frac{\varepsilon}{2} \leq y \leq 1 \right).$$

Если окажется

$$\int_0^1 f_N^1(x,y) dx \leq 1 \text{ при } y_j - \frac{\varepsilon}{2} < y < y_j + \frac{\varepsilon}{2},$$

то считаем $f_N^1(x,y) = f_N^1(x,y)$. В противном случае продолжаем перестроение и с этой целью введём новое обозначение

$$V(G)[f] = \iint_G f(x, y) dx dy,$$

где $G \subset Q$ – произвольная область единичного квадрата.

Итак, объем песка в продольном ряду R_j , первоначально равный

$$V(R_j)[f_N^-] = V(Q_j)[f_N^-] + V(R_j \setminus Q_j)[f_N^-],$$

превысил ε :

$$V(R_j)[f_N'] = V(Q_i)[f_N^-] + V(Q_j)[f_N^-] + V(R_j \setminus Q_j)[f_N^-] = \varepsilon + \delta, \text{ где } \delta > 0, \varepsilon = 1/N. \quad (2)$$

С другой стороны

$$V(Q_i)[f_N^-] + V(Q_j)[f_N^-] \leq V(C_i)[f_N^-] \leq \varepsilon. \quad (3)$$

Из (2) и (3) заключаем $V(R_j \setminus Q_j)[f_N^-] \geq \delta$. Другими словами, в ячейках вне диагонали $y = 1 - x$ продольного ряда R_j содержится песка не меньше δ . Поэтому из этих ячеек можно пересыпать песок общего объема δ , неважно каким именно способом, в соответствующие ячейки продольного ряда R_i (рис. 1). Прделав это, получаем новую функцию $f_N''(x, y)$. Проверим ее свойства. Во-первых, поскольку песок переносился лишь в поперечных рядах (вдоль оси OY), то объем песка в каждом из них не изменился, значит

$$\int_0^1 f_N''(x, y) dy = \int_0^1 f_N'(x, y) dy = \int_0^1 f_N^-(x, y) dy \leq 1 \text{ при } 0 \leq x \leq 1. \quad (4)$$

Во-вторых, все продольные ряды, кроме R_i и R_j , вообще не были затронуты. В ряду R_j мы оставили ровно ε песка, поэтому

$$\int_0^1 f_N''(x, y) dx = 1 \text{ при } y_j - \frac{\varepsilon}{2} < y < y_j + \frac{\varepsilon}{2}.$$

Наконец, произведём оценку ряда R_i :

$$V(R_i)[f_N''] = V(R_i \setminus Q_i)[f_N^-] + \delta. \quad (5)$$

Но $V(Q_j)[f_N^-] + V(R_j \setminus Q_j)[f_N^-] = V(R_j)[f_N^-] \leq \varepsilon$. В сочетании с (2) это даёт

$$V(Q_i)[f_N^-] \geq \delta, \quad (6)$$

что в комбинации с (5) влечет

$$V(R_i)[f_N''] \leq V(R_i \setminus Q_i)[f_N^-] + V(Q_i)[f_N^-] = V(R_i)[f_N^-] \leq \varepsilon.$$

Т.е., песка в ряду R_i также стало не больше ε . Объединяя полученные оценки, заключаем

$$\int_0^1 f_N''(x, y) dx \leq 1 \text{ при } 0 \leq y \leq 1.$$

В сочетании с (4) это доказывает, что $f_N''(x, y)$ удовлетворяет условию (1), следовательно $f_N''(x, y) \in \Omega(N, C)$, поэтому считаем $f_N^1(x, y) = f_N''(x, y)$ и повторяем описанное преобразование с функцией $f_N^1(x, y)$, получая $f_N^2(x, y)$ и т.д. Процесс продолжаем до тех пор, пока все внедиагональные ячейки не окажутся пустыми (возможность такой ситуации обсуждается ниже). Напомним, что переход $f_N^n(x, y) \rightarrow f_N^{n+1}(x, y)$ описан пока лишь для ячейки Q_i из левой четверти Q . Если же ячейка Q_i находится в верхней четверти, то перемещаем ее снова на диагональ $y = 1 - x$, но не поперек, а вдоль оси OX и повторяем почти дословно уже описанную конструкцию. Для правой и нижней четвертей квадрата Q всё аналогично.

Докажем монотонность последовательности $I[f_N^-], I[f_N^1], I[f_N^2], \dots$. Прежде всего, получим оценку для $I[f_N^-]$. Заметим, что на рассматриваемой левой четверти квадрата Q функция $z = |x - y| = y - x$ линейна и имеет постоянный градиент $\nabla z = (-1, 1)$. Тогда при перенесении песка из ячейки Q_i в ячейку Q_j , что соответствует преобразованию $f_N^-(x, y) \rightarrow f_N^1(x, y)$, вклад в интеграл I , соответствующий этому столбику песка, увеличится с $f_i^- \iint_{Q_i} |x - y| dx dy$ до

$$f_i^- \iint_{Q_j} |x - y| dx dy = f_i^- \left(\iint_{Q_i} |x - y| dx dy + \nabla z \cdot \rho_{ij} \varepsilon^2 \right) = f_i^- \left(\iint_{Q_i} |x - y| dx dy + \rho_{ij} \varepsilon^2 \right), \quad (7)$$

где $\rho_{ij} = (0, \rho_{ij})$ – вектор перемещения, $\rho_{ij} = y_j - y_i$ – расстояние между центрами Q_i и Q_j , $\varepsilon^2 = 1/N^2$ – площадь Q_i . Вклады в интеграл I , соответствующие пересыпаемым из ряда R_j в ряд R_i столбикам песка при преобразовании $f_N^-(x, y) \rightarrow f_N^1(x, y)$, могут как увеличиваться, так и уменьшаться. Но, даже если все они уменьшаются, то величина уменьшения за счет переноса каждого столбика высоты h_k из ячейки Q_k ряда R_j в соответствующую ячейку ряда R_i не превышает $h_k \rho_{ij} \varepsilon^2$. Так как для общего количества δ переносимого песка имеем оценку (6), то

$$\delta = \sum_{k \in K} h_k \varepsilon^2 \leq V(Q_i) |f_N^-| = f_i^- \varepsilon^2,$$

где K – множество номеров ячеек ряда R_j без ячейки Q_j . Поэтому суммарное уменьшение $I[f_N^1]$ по сравнению с $I[f_N^-]$ не превысит $f_i^- \rho_{ij} \varepsilon^2$. Вычитая это из увеличения, даваемого формулой (7), получаем $I[f_N^1] \leq I[f_N^-] = I[f_N^1]$. В случае если переход $f_N^-(x, y) \rightarrow f_N^1(x, y)$ не требуется, и $f_N^1(x, y) = f_N^-(x, y)$, неравенство $I[f_N^1] \leq I[f_N^1]$ следует из (7). Оценки $I[f_N^1] \leq I[f_N^2]$ и т.д. получаются аналогично.

При преобразовании $f_N^n(x, y) \rightarrow f_N^{n+1}(x, y)$ опустошается какая-то одна ячейка, и если бы она не заполнялась в дальнейшем, то за конечное число шагов все внедиагональные ячейки оказались бы пусты. Гарантии этого, однако, нет, поэтому придётся рассмотреть возможность бесконечного перестроения $f_N^n(x, y) \rightarrow f_N^{n+1}(x, y)$. Если же оно завершается за конечное число шагов m , то для единообразия рассуждений продолжим этот процесс до бесконечности тождественным преобразованием, т.е. считаем $f_N^n(x, y) = f_N^m(x, y)$ при $n > m$.

Получим оценку общего объема песка во внедиагональных ячейках. Пусть M есть число внедиагональных ячеек ($M = N(N - 2)$ при чётном N и $M = (N - 1)^2$ при нечётном N), а v_n – суммарный объем песка в них в конце n -го шага процесса преобразования $f_N^-(x, y) \rightarrow f_N^1(x, y) \rightarrow f_N^2(x, y) \rightarrow \dots$. Тогда объем песка в максимальной внедиагональной ячейке должен быть не менее v_n / M . Поэтому после пересыпания $f_N^n(x, y) \rightarrow f_N^{n+1}(x, y)$ имеем

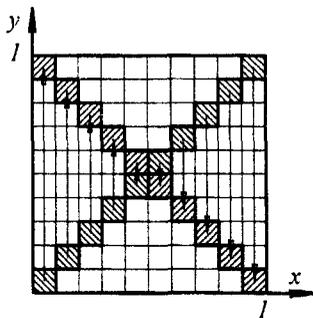


Рисунок 2 – Преобразование $f_N^{dd}(x, y) \rightarrow f_N^d(x, y)$

$$v_{n+1} \leq v_n - \frac{v_n}{M} + w_{n+1} = v_n q + w_{n+1},$$

где $q = (M - 1)/M$, а w_{n+1} – объём песка, поступившего во внедиагональную ячейку из ячейки на диагонали $y = x$. Ясно, что $\lim_{n \rightarrow \infty} w_n = 0$, т.к. в противном случае имели бы неограниченный рост объёма песка в ячейках диагонали $y = 1 - x$ при $n \rightarrow \infty$. Из последнего неравенства вытекает

$$v_n \leq v_0 q^n + w_1 q^{n-1} + \dots + w_{n-1} q + w_n.$$

Опираясь на свойства $0 < q < 1$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} w_n = 0$, несложно показать, что правая часть

этого неравенства стремится к 0 при $n \rightarrow \infty$. Т.о., весь песок в пределе $n \rightarrow \infty$ окажется в диагональных ячейках, а внедиагональные будут пусты. Очевидно, что последовательность $\{f_N^n(x, y)\}$ при $n \rightarrow \infty$ сходится (в смысле поточечной сходимости) к некоей функции $f_N^{dd}(x, y) \in \Omega(N, C)$, которая может отличаться от нуля лишь в ячейках, расположенных на обеих диагоналях квадрата Q . Произведём очередное перестроение, заключающееся в том, что весь песок из ячеек на диагонали $y = x$ пересыпается в соответствующие ячейки диагонали $y = 1 - x$ (рис.2). Получим функцию $f_N^d(x, y)$, которая может отличаться от нуля только в ячейках диагонали $y = 1 - x$. Легко показать, что $f_N^d(x, y) \in \Omega(N, C)$ и $I[f_N^{dd}] \leq I[f_N^d]$. Т.о., задача поиска максимума функционала $I[f_N]$ на классе $\Omega(N, C)$ свелась к поиску максимума на подклассе функций, которые могут отличаться от нуля только в ячейках диагонали $y = 1 - x$. Решение тривиально и представляет собой функцию $\tilde{f}_N^d(x, y)$, соответствующую максимально возможному заполнению ближайших к вершинам (0,1) и (1,0) ячеек этой диагонали. Максимальная высота столбика песка диктуется условием (1) и составляет величину $1/\varepsilon$.

Итак, задача максимизации функционала $I[f_N]$ на $\Omega(N, C)$, поставленная в начале раздела, полностью решена. Переходим к поиску максимума по всем классам $\Omega(N, *)$ при фиксированном N (допустимые значения параметра, стоящего на месте звёздочки, нам пока ещё не известны). Решение также тривиально и представляет собой функцию $\tilde{f}_N^d(x, y)$, соответствующую максимальному заполнению всех ячеек диагонали $y = 1 - x$ до уровня $1/\varepsilon$ (рис. 3). Попутно получаем максимальное значение параметра C , равное $C_{\max} = (1/\varepsilon)\varepsilon^2 N = 1$. Т.о., область допустимых значений C представляет собой отрезок $[0, 1]$.

Очевидно, что последовательность $\{\tilde{f}_N^d(x, y)\}$ при $N \rightarrow \infty$ сходится в смысле слабой сходимости [3] к обобщённой функции $\sqrt{1/2}\delta_l$ типа “простой слой” [3] (здесь l – множество точек диагонали $y = 1 - x$ квадрата Q), действующей на пространстве $D(Q)$ основных функций $\varphi(x, y)$ по правилу

$$(\sqrt{1/2}\delta_l, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_l \varphi(x, y) dl,$$

а правильность нормировочного множителя $\sqrt{1/2}$ проверяется равенством $(\sqrt{1/2}\delta_l, 1) = C_{\max} = 1$. Поэтому

$$\lim_{N \rightarrow \infty} I[\tilde{f}_N^d(x, y)] = (\sqrt{1/2}\delta_l, |x - y|) = \frac{2}{\sqrt{2}} \int_0^{\sqrt{1/2}} \sqrt{2}udu = \frac{1}{2}.$$

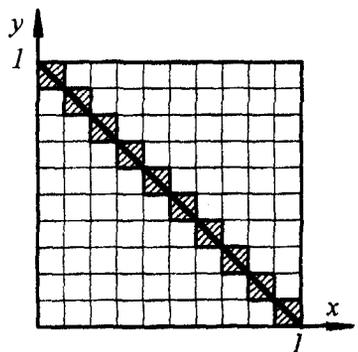


Рисунок 3 – Носители функций \tilde{f}_N^d и $\sqrt{1/2}\delta_l$.

Данный результат позволяет получить искомую величину точной верхней грани \bar{I} . Для этого сначала подведём итог всем ранее полученным оценкам:

$$I[f_N^-] \leq I[f_N^1] \leq \dots \leq I[f_N^{dd}] \leq I[f_N^d] \leq I[\tilde{f}_N^d] \leq I[\bar{f}_N^d].$$

Из них вытекает

$$\lim_{N \rightarrow \infty} I[f_N^-] \leq \lim_{N \rightarrow \infty} I[\bar{f}_N^d] = \frac{1}{2}.$$

Вспоминая, что $\lim_{N \rightarrow \infty} I[f_N^-] = I[f]$, из последнего равенства получаем $I[f] \leq \frac{1}{2}$. Легко построить последовательность функций $f_n(x, y) \in C^*$, слабо сходящуюся к $\sqrt{1/2}\delta_l$ (не будем её здесь приводить), что позволяет утверждать

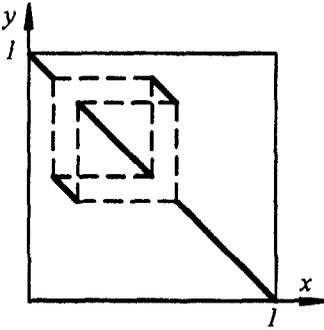


Рисунок 4 – Носитель функции $\sqrt{1/2}\delta_p$

$$\bar{I} = \sup_{f \in C^*} I[f] = (\sqrt{1/2}\delta_l, |x - y|) = I[\sqrt{1/2}\delta_l] = \frac{1}{2},$$

где третье равенство следует рассматривать как расширение области определения функционала $I[f]$ на класс обобщённых функций. Итак, поставленная в начале статьи задача решена. Однако, её решение не единственно. Рисунок 4 даёт пример ещё одной обобщённой функции $\sqrt{1/2}\delta_p$ типа “простой слой” с тем же самым значением интеграла $I[\sqrt{1/2}\delta_p] = I[\sqrt{1/2}\delta_l] = 1/2$. Здесь p – множество точек, получающееся в результате вырезания двух отрезков одинаковой длины из диагонали l в левой половине квадрата Q и перемещения их в противоположных направлениях, как показано на рисунке 4. Ясно, что уменьшение интеграла $I[\sqrt{1/2}\delta_p]$ по

сравнению с $I[\sqrt{1/2}\delta_l]$ в результате перемещения одного отрезка вниз полностью компенсируется увеличением в результате перемещения другого отрезка вверх. С помощью описанного приёма можно построить сколько угодно других решений уравнения $I[\bar{f}] = 1/2$ в классе обобщённых функций. Вопрос о существовании решений в классе C^* остаётся открытым.

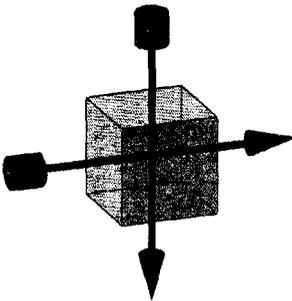


Рисунок 5 – Практический пример

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная задача на экстремум имеет бесконечно много сингулярных решений – факт, который было бы проблематично установить, опираясь лишь на известные численные методы. Опишем гипотетический, но вместе с тем весьма правдоподобный, технологический процесс, имеющий отношение к нашей задаче. Представим себе прозрачный кристалл в форме куба с ребром l , который разрезается на тонкие квадратные пластины, предназначенные для использования в оптических системах (например, для вращения плоскости поляризации). Допустим, что кристалл содержит поглощающую свет примесь в неизвестной

концентрации $n(x, y, z)$, причём плоскости разрезания параллельны плоскости xu . Оптическая плотность примеси в направлениях Ox и Oy пропорциональна интегралам

$$\int_0^l n(x, y, z) dx \text{ и } \int_0^l n(x, y, z) dy$$

и контролируется путём лазерного просвечивания (рис.5). Допустим, что она не превысила величины δ в обоих направлениях. При помещении пластины в световое поле интенсивности $J \sim |x - y|$ на примеси выделяется суммарная тепловая мощность

$$W \sim \int_0^l \int_0^l |x - y| n(x, y, z) dx dy.$$

Требуется определить максимальное значение W , зная δ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ректорис, К. Вариационные методы в математической физике и технике [Текст] / К. Ректорис. – М.: Мир, 1985. – 589 с.: ил.
2. Федорюк, М.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения [Текст] / М.В. Федорюк. – М.: Наука, 1980. – 352 с.: ил.
3. Владимиров, В.С. Уравнения математической физики [Текст] / В.С. Владимиров. – М.: Наука, 1981. – 512 с.: ил.
4. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация [Текст] / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1985. – 589 с.: ил.

Морев Павел Геннадьевич

Государственный университет – УНПК г. Орёл

Кандидат физико-математических наук, науч. сотр. лаб. новых материалов

г. Орёл, Наугорское шоссе, 29

E-mail: paulorel@mail.ru

Фёдоров Тимофей Васильевич

Государственный университет – УНПК, г. Орёл

Кандидат технических наук, доц. каф. АВТОПЛАСТ

г. Орёл, Наугорское шоссе, 29

E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

P.G. MOREV, T.V. FEDOROV

AN EXTREMAL PROBLEM WITH SINGULAR SOLUTION

A problem on searching the maximum of a relatively simple linear functional with relatively simple constraints is addressed. An algorithm for constructing one of the solutions is adduced. That solution turns out to be singular and allows us to determine the supremum for the value set of the functional. A technological process example, associated with the problem under consideration, is adduced.

Keywords: functional extremum, singular solution, exact upper bound, distribution-function.

BIBLIOGRAPHY

1. Rektoris, K. Variacionnye metody v matematicheskoj fizike i tehnikе [Tekst] / K. Rektoris. – М.: Mir, 1985. – 589 s.: il.
2. Fedorjuk, M.V. Obyknovennye differencial'nye uravnenija [Tekst] / M.V. Fedorjuk. – М.: Nauka, 1980. – 352 s.: il.
3. Vladimirov, V.S. Uravnenija matematicheskoj fiziki [Tekst] / V.S. Vladimirov. – М.: Nauka, 1981. – 512 s.: il.
4. Zenkevich, O. Konechnye jelementy i approksimacija [Tekst] / O. Zenkevich, K. Morgan. – М.: Mir, 1985. – 589 s.: il.

Morev Pavel Gennadievich

State University ESPC

Candidate of physico-mathematical sciences, research worker of new substance laboratory

Orel, Naugorskoe shosse, 29

E-mail: paulorel@mail.ru

Feodorov Timofey Vasilievich

State University ESPC

Candidate of technical sciences, associated professor, chair "AUTOPLAST"

Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862-41-98-49

E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

Е.В. КУЗНЕЦОВ

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТВЁРДЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

В статье рассматриваются синергетические принципы, которые лежат в основе явления самоорганизации пластической деформации твёрдых кристаллических тел. Выполненный анализ позволяет расширить традиционные представления о возможности интенсификации технологических процессов механической обработки конструкционных материалов.

Ключевые слова: кристаллическое твёрдое тело, синергетические принципы, самоорганизация пластической деформации, деформационная волна, информационное содержание, адекватность деформационного воздействия.

Современное понимание пластической деформации твёрдых кристаллических тел основано на синергетических представлениях о физике этого явления. С позиций синергетики деформируемое тело представляет собой сильно неравновесную многоуровневую систему, способную к естественной внутренней самоорганизации. Она заключается в адаптивном развитии взаимодействия и, как следствие, эволюции потери сдвиговой устойчивости на микро-, мезо- и макроскопическом структурных уровнях строения вещества [1, 2].

Естественная самоорганизация пластической деформации начинается с серии последовательных актов термодинамического возмущения и релаксации микроконцентраторов напряжений. В их ходе в прилегающих областях деформируемого объёма возникают первичные сдвиги. Это приводит к местному снижению напряжений и скачкообразному приращению деформации. Вначале сдвиги являются хаотичными, однако уже к концу стадии микропластичности они взаимно коррелируют так, что каждый из них вызывает появление следующего. За счёт этого происходит лавинообразное развитие множественного скольжения, охватывающего мезоскопический объём кристалла. Внешне оно выражается в образовании полосы Людерса – Чернова, которая в дальнейшем распространяется в направлении наибольших касательных напряжений независимо от кристаллографической ориентации решётки. На этой стадии в мезоскопическом объёме, кроме сдвигового движения (трансляции), возникают ориентационные повороты (ротация) одних частей кристалла относительно других. Синергетическое взаимодействие, согласование и корреляционное развитие обоих процессов приводят к формированию макроскопического функционального отклика вещества в виде двухкомпонентной трансляционно-ротационной волны пластической деформации, которая иначе называется волной Людерса – Мак Рейнольдса. Она представляет собой сложную пространственно-временную структуру, включающую в себя механическое движение (пластическое течение) вещества, процессы диссипации энергии, деформационного упрочнения и т. д.

Распространение волны Людерса – Мак Рейнольдса сопровождается осцилляциями пластического течения. На диаграмме нагружения они выражаются во множестве циклов резкого, почти вертикального, приращения напряжения при очень малой деформации и последующего скачкообразного приращения степени деформации при почти постоянном напряжении, вследствие чего диаграмма нагружения приобретает ступенчатый вид [3]. Это явление известно под названием прерывистой текучести. По мере развития деформационного упрочнения интенсивность осцилляций постепенно ослабевает. Тем не менее, с помощью, например, метода спекл-интерферометрии их можно наблюдать вплоть до разрушения тела [4]. Динамика осцилляций отражает процесс адаптивной самоорганизации пластического течения кристаллического вещества. В её основе лежит ряд принципов, обобщающих фундаментальные представления философии, теоретической физики и математики о взаимодействии материальных тел [5].

Анализ механизма формирования волны пластической деформации позволяет сделать вывод о том, что этот процесс подчиняется *принципу суперпозиции*. В соответствии с его синергетическим толкованием возмущение системы, способной к адаптивной внутренней самоорганизации, является результатом развития и взаимодействия возмущений на её отдельных структурных уровнях.

Собственная частота осцилляций [6]

$$\nu_0 = G/Q, \text{ с}^{-1}, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига, Па;

Q – коэффициент внутреннего трения, Па · с.

Величина ν_0 индивидуальна для каждого материала и строго постоянна при неизменных условиях. Она зависит от физических свойств вещества, его температуры и степени деформации. Это соответствует теоретическим представлениям об информационном содержании материальных объектов (тел и их систем). Под этим термином подразумевается совокупность характеристик, свойств и признаков, определяющих состояние объекта в рассматриваемых условиях [5]. Согласно *принципу детерминизма (определённости)* информационное содержание объекта остаётся постоянным, если он находится в состоянии равновесия. Изменение информационного содержания обусловлено изменением состояния объекта в результате оказания на него некомпенсированного возмущающего воздействия. Внешним выражением этого при деформировании твёрдых кристаллических тел и является постепенное уменьшение интенсивности осцилляций пластического течения.

Детерминизм информационного содержания твёрдых кристаллических тел наглядно иллюстрируется на примере их поведения при вибрационном деформировании. Экспериментально установлено, что в тех случаях, когда нагружение происходит с частотой ν , близкой или кратной собственной частоте осцилляций ν_0 , имеет место резкое снижение силы F растяжения образцов из различных материалов (рис. 1), рост интенсивности пластического течения и, как следствие, уменьшение уровня остаточных напряжений [7]. Это явление получило название резонансного вибропластического эффекта [8]. Его происхождение связано с зависимостью сопротивления σ , вещества деформированию от частоты возмущающего воздействия [6]:

$$\sigma_r = \nu Q, \text{ Па}, \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что $\sigma_r \rightarrow \sigma_r^{\min}$ при $\nu \rightarrow \nu_0$. Это объясняется тем, что частота ν_0 является наименьшей возможной частотой осцилляций пластического течения.

Подробнее условия возникновения резонансного вибропластического эффекта были рассмотрены в работе [9]. В ней показано, что основные и кратные ему усиления интенсивности осцилляций возникают, если циклическая частота нагружений $\omega = 2\pi\nu$ находится в интервале:

$$n\omega_0 + \min\Omega < \omega < n\omega_0 + \max\Omega, \quad (3)$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ – кратность резонанса;

$\omega_0 = 2\pi\nu_0$ – собственная циклическая частота осцилляций, с^{-1} .

Величина Ω представляет собой функцию деформационного отклика вещества:

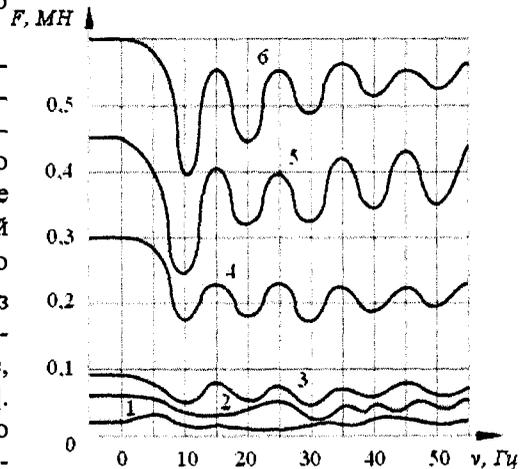


Рисунок 1 – Резонансный вибропластический эффект при деформировании металлов

- 1 – алюминий АД-1; 2 – медь М2;
- 3 – латунь Л62; 4 – сталь 45 сырая;
- 5 – сталь 08 кп; 6 – сталь 12Х18Н9Т

$$\Omega = \left(\frac{n\omega_0^2}{2\pi} \right)^{2\pi/\omega_0} \int_0^{\omega_0} \psi f(n\omega_0 t + \varphi_0; \sigma_a; \varepsilon) dt, c^{-1},$$

где ψ – периодическая функция релаксации напряжений, $Па^{-1}$;

$f(n\omega_0 t + \varphi_0; \sigma_a; \varepsilon)$ – функция внешнего воздействия, $Па$;

φ_0 – начальная фаза нагружения, $рад$;

σ_a – амплитуда нагрузки, $Па$;

ε – степень деформации;

t – время, $с$.

Неравенство (3) математически выражает ширину частотной полосы синхронизации, в пределах которой внешнее воздействие способно обеспечить устойчивую стимуляцию самопроизвольного согласования и адаптивного развития естественных деформационных процессов в твёрдом теле. В синергетике это называется эффективным управлением. Возможность его осуществления свидетельствует о том, что резонансный вибропластический эффект отражает **принцип адекватности (соответствия)**, согласно которому наибольшая интенсивность функционального отклика достигается, когда внешнее воздействие соответствует информационному содержанию объекта.

Зависимость собственной частоты осцилляций ν_0 от температуры, а также снижение сопротивления деформированию при нагружении с частотой, кратной ν_0 , показывает, что распространение волн Людерса – Мак Рейнольдса, кроме прочего, подчиняется **принципу Больцмана о температурно-временной суперпозиции**. В соответствии с этим принципом проявления пластичности твёрдых тел при разных температурах могут быть отождествлены между собой, если соответствующим образом изменить продолжительность или частоту внешнего вынуждающего воздействия.

Сформулированные синергетические принципы отражают общие закономерности естественной самоорганизации пластически деформируемых твёрдых кристаллических тел. Они расширяют традиционные представления о процессах механической обработки конструкционных материалов и позволяют на качественно ином уровне подойти к вопросам технологического проектирования соответствующих операций с целью более полного использования естественных пластических свойств заготовок. Особую важность этот подход приобретает в связи с модернизацией производства и развитием нанотехнологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин, В.Е. Физическая мезомеханика материалов / В.Е. Панин // Механика твёрдого тела. – 1999. – № 5. – С. 88 – 107.
2. Голенков, В.А. Структурно-аналитическая мезомеханика и её приложения / В.А. Голенков, В.Г. Малинин, Н.А. Малинина. – М.: Машиностроение, 2009. – 635 с.
3. Данилов, В.И. Волновые эффекты при пластическом течении поликристаллического алюминия / В.И. Данилов, Л.Б. Зуев, И.М. Мних и др. // ФММ. – 1991. – № 3. – С. 188 – 194.
4. Кузнецов, Е.В. Спектрографический анализ прерывистой текучести в меди / Е.В. Кузнецов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – № 6. – С. 11 – 15.
5. Haken H. Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems. – 3-rd ed. – Berlin: Springer, 2006. – 257 s.
6. Морозенко, В.Н. Резонансный вибропластический эффект / В.Н. Морозенко, Е.В. Кузнецов // Известия РАН. Металлы. – 2000. – № 3. – С. 104 – 107.
7. Морозенко, В.Н. Эффективность резонансного виброволочения при изготовлении прецизионных изделий машиностроения / В.Н. Морозенко, Е.В. Кузнецов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2000. – № 11. – С. 28 – 31.
8. Морозенко, В.Н. Закономерность пластического поведения вязко-упругих и вязко-пластичных сред в условиях их развитой вибропластической деформации / В.Н. Морозенко, Р.П. Дидык, Е.В. Кузнецов, В.Ф. Балакин / Научное открытие № 185 // Научные открытия: Сборник кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез – 2001. – М. – С.-Пб.: Сударыня, 2002. – С. 56 – 58.

9. Кузнецов, Е.В. Условия возникновения в металлах вибропластического резонанса / Е.В. Кузнецов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – № 2. – С. 6 – 9.

Кузнецов Евгений Викторович

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

Кандидат технических наук, действительный член Международной академии авторов научных открытий и изобретений, доцент кафедры физики.

Украина, 49635?г. Днепропетровск, пр. Гагарина, 4;

Телефон: (+3056) 374-83-07; дом.: (+30562) 42-97-32; моб.: (+38) 097-851-70-51.

E-mail: eugene.kuznetsow@mail.ru

E.V. KUZNETSOV

SYNERGETIC PRINCIPLES of SELF-ORGANIZATION OF PLASTIC DEFORMATION OF SOLID CRYSTALLINE BODIES

The article deals with synergistic principles that underlie the phenomenon of self-organization of plastic deformation of solid crystalline bodies. The analysis extends the traditional views of the possibility of intensification of technological processes of machining of structural materials.

Keywords: *solid crystalline body, synergetic principles, self-organization of plastic deformation, wave of deformation, information content, adequacy of deformation influence.*

BIBLIOGRAPHY

1. Panin, V.E. Fizicheskaja mezomehanika materialov / V.E. Panin // Mehanika tvjordogo tela. – 1999. – № 5. – S. 88 – 107.
2. Golenkov, V.A. Strukturno-analiticheskaja mezomehanika i ejo prilozhenija / V.A. Golenkov, V.G. Malinin, N.A. Malinina. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 635 s.
3. Danilov, V.I. Volnovye jeffekty pri plasticheskom techenii polikristallicheskogo aljuminija / V.I. Danilov, L.B. Zuev, I.M. Mnih i dr. // FMM. – 1991. – № 3. – S. 188 – 194.
4. Kuznecov, E.V. Speklograficheskij analiz preryvnoj tekuchesti v medi / E.V. Kuznecov // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2009. – № 6. – S. 11 – 15.
5. Haken H. Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems. – 3-rd ed. – Berlin: Springer, 2006. – 257 s.
6. Morozenko, V.N. Rezonansnyj vibroplasticheskij jeffekt / V.N. Morozenko, E.V. Kuznecov // Izvestija RAN. Metally. – 2000. – № 3. – S. 104 – 107.
7. Morozenko, V.N. Jeffektivnost' rezonansnogo vibrovolochenija pri izgotovlenii precizionnyh iz-delij mashinostroenija / V.N. Morozenko, E.V. Kuznecov // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2000. – № 11. – S. 28 – 31.
8. Morozenko, V.N. Zakonomernost' plasticheskogo povedenija vjazko-uprugih i vjazko-plastichnyh sred v uslovijah ih razvitij vibroplasticheskij deformacii / V.N. Morozenko, R.P. Didyk, E.V. Kuznecov, V.F. Bala-kin / Nauchnoe otkrytie № 185 // Nauchnye otkrytija: Sbornik kratkih opisaniy nauchnyh otkrytij, nauchnyh idej, nauchnyh gipotez – 2001. – M. – S.-Pb.: Sudarynja, 2002. – S. 56 – 58.
9. Kuznecov, E.V. Uslovija vozniknovenija v metallah vibroplasticheskogo rezonansa / E.V. Kuznecov // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2002. – № 2. – S. 6 – 9.

Kuznetsov Eugene Viktorovich

The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk

The Candidate of Technical Sciences, a full member of the International Academy of Authors of Scientific Discoveries and Inventions, the Associate Professor of the Department of Physics.

Dnepropetrovsk, Gagarina ave., 4, Ukraine, 49635

(+3056) 374-83-07; (+30562) 42-97-32; (+38) 097-851-70-51

E-mail: eugene.kuznetsow@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 51-72:531.38

Г.Н. КОЛЕСНИКОВ, С.Б. ВАСИЛЬЕВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОГО СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ РАССЕВА НА УСТАНОВКАХ С ЯРУСНОЙ КОМПОНОВКОЙ СИТ

Предложена математическая модель фракционирования сыпучего полидисперсного материала методом отсева, сформированная на основе уравнения Ферхюльста, которая позволяет с большой точностью определять основные характеристики процесса. Обоснована методика оценки эффективности технологического процесса, учитывающая относительное изменение концентрации проходных частиц в надрешетном продукте и изменение толщины его слоя вдоль сита. Адекватность результатов моделирования подтверждена их согласованностью с результатами ранее проведённых экспериментов.

Ключевые слова: сыпучий материал; разделение на фракции; метод отсева; математическая модель; уравнение Ферхюльста; ярусная компоновка сит.

1. Постановка проблемы. Предметом труда многих технологических процессов современного производства являются полидисперсные сыпучие материалы (щебень, песок, руда, зерно и продукты его переработки, древесная щепа и т.д.). Множество частиц, близких по своим геометрическим размерам и форме, образуют *фракцию*. *Полидисперсный* сыпучий материал представляет собой механическую смесь частиц различных фракций. Для обеспечения эффективной работы технологического оборудования и выпуска конкурентоспособной продукции необходим достаточно однородный гранулометрический состав сыпучего материала. По этой причине необходимо *фракционирование* полидисперсного сыпучего материала, т.е. его разделение на фракции по критерию крупности частиц. Соответственно, различают фракции *кондиционные* (пригодные для основного производства) и *некондиционные* (например, избыточно крупные или очень мелкие частицы, которые находят применение вне рамок основного производства). Точность разделения на фракции существенно влияет на технико-экономические показатели всего производственного цикла и на качество выпускаемой продукции.

В современных условиях с учетом возросших требований к качеству выпускаемой продукции, к рациональному использованию энергии и других ресурсов, сохраняет свою актуальность многоплановая проблема повышения эффективности технологического процесса фракционирования сыпучих полидисперсных материалов. Сложность проблемы обусловлена разнообразием используемых сыпучих материалов и существенным различием их физико-механических свойств, следствием чего является широкий спектр оборудования, методов и технологий фракционирования [0], [0]. Наиболее распространенными методами в практике разделения сыпучих материалов на фракции являются механический, пневматический и гидравлический. Различие свойств сыпучих материалов и, соответственно, технологий их переработки, находит своё отражение в названиях технологических процессов: *фракционирование, сортировка, сепарирование, классификация, обогащение*.

В качестве примера в данной статье ограничимся только одним видом полидисперсного сыпучего материала – древесной щепой. Выбор именно этого материала объясняется меньшей его изученностью по сравнению с другими сыпучими материалами (такими, как зерно и продукты его переработки, щебень, песок, руда и т.д.), а также большими объемами выпуска и потребления щепы. В России крупнейшим потребителем

щепы является целлюлозно-бумажная промышленность. Например, только три целлюлозно-бумажных комбината (ЦБК) в республике Карелия в городах Кондопога, Питкяранта и Сегежа рассчитаны на ежегодную переработку примерно трёх миллионов кубических метров круглых лесоматериалов, которые после очистки от коры поступают в виде балансов на рубительные машины для получения щепы [0], [0]. Фракционный состав щепы зависит от технологии подготовки древесины к переработке на рубительной машине [0], от износа ножей рубительной машины [0] и от других факторов [0]. Таким образом, получаемая щепа состоит из древесных частиц, крупность которых варьируется в широких пределах. То есть, продукт, вырабатываемый рубительной машиной, является полидисперсным сыпучим материалом. Для получения целлюлозы используется щепа, гранулометрический состав которой должен быть максимально однороден. Предельно допустимое содержание некондиционных фракций жестко определяется требованиями технологического регламента и подробно описано в стандарте [0]. Фракционирование щепы в настоящее время практически на всех предприятиях осуществляется методом рассева на установках с ярусной компоновкой сит [0]. Некондиционные (крупные и мелкие) фракции могут быть использованы, в качестве топлива или для производства других видов продукции.

Ограничения, накладываемые техническими, технологическими возможностями и экономической целесообразностью не позволяют проводить экспериментальные исследования процесса сортирования с использованием промышленного оборудования в широком диапазоне параметров. В этой связи очевидна необходимость разработки и применения математических моделей технологического процесса фракционирования сыпучих материалов. Однако по причинам сложности объекта исследования и недостаточной его изученности неизбежны определенные упрощения, используемые при построении математических моделей и, как следствие, приближенный характер расчетных данных. В подобных условиях целесообразно применение ряда приемлемых методик. Тогда согласованность результатов, полученных по различным методикам, позволит составить достаточно адекватное представление об изменениях гранулометрического состава сыпучего материала в процессе его фракционирования.

Процессы фракционирования сыпучих материалов исследуются на протяжении многих лет. К числу первых работ по теории рассева относится исследование Н. Е. Жуковского, опубликованное в 1896 г. [0]. Развитие и современное состояние исследований технологии разделения сыпучих полидисперсных материалов на фракции по критерию крупности частиц рассмотрено в обзорных частях работ [0], [0], [0], [0]. Анализ публикаций по теме статьи, включая представленные в виде Интернет-ресурсов, показал, что до 2010 года не исследовались возможности применения логистического подхода к построению модели фракционирования полидисперсных сыпучих материалов методом рассева, в частности – древесной щепы. Такой подход, приводящий к уравнению Ферхюльста [0] и, как следствие, к логистической модели технологического процесса фракционирования сыпучего материала методом рассева, предложен в работе [0]. Однако остались недостаточно изученными следующие вопросы: 1) прогнозирование эффективности фракционирования с учётом изменения толщины слоя надрешётного продукта в процессе рассева; 2) влияние длины рабочей части сита и угла его наклона на изменение концентрации частиц фракционируемого сыпучего материала; 3) учет различий в поступлении сыпучего материала на верхний и нижеследующий ярус сит. Рассмотрение этих вопросов опирается на апробированные результаты [0], которые дополнены и кратко изложены ниже в виде, адаптированном к обоснованию предлагаемых далее расчетных формул.

2. Физическая модель процесса рассева. Описание исследуемого технологического процесса с физической точки зрения сводится к следующей системе понятий и допущений, которые необходимы для обоснования рассматриваемых далее расчетных формул.

1. Исходный продукт, поступающий на сито, представляет собой механическую смесь частиц, различной крупности.

2. Соотношение размеров отверстий в сите и размеров частиц смеси, движущейся по нему, таково, что только часть частиц остается на сите, а другая – проходит через отверстия. Соответственно, различают *надрешетный* продукт и *подрешетный* продукт, а каждая частица в зависимости от крупности может быть отнесена к *проходной* или *непроходной*.

3. Количество проходных частиц и их концентрация в надрешетном продукте уменьшаются по мере движения массива частиц по сити (в пределе до 0 %).

4. Количество непроходных частиц в надрешетном продукте остается постоянным в процессе движения массива частиц по сити. С учётом допущения 3 это приводит к увеличению их концентрации в надрешетном продукте (в пределе до 100 %).

5. Непроходных частиц в подрешетном продукте нет. Количество проходных частиц в подрешетном продукте возрастает в процессе рассева.

6. Физико-механические свойства и геометрические параметры частиц в процессе рассева не изменяются.

7. Проходная частица, находящаяся в массиве надрешетного продукта, покидает надрешетный продукт, если достигает поверхности сита и попадает в отверстие. Требуемое для этого время зависит от толщины слоя надрешетного продукта, концентрации проходных частиц, формы отверстий и от других параметров.

3. **Математическое описание физической модели процесса рассева.** Продолжительность рассева разобьем на равные отрезки времени Δt . Пусть в некоторый момент времени $t_i = t$ количество непроходных частиц в надрешетном продукте равно Q_a . Количество проходных частиц в надрешетном продукте в тот же момент времени равно Q_b . Тогда общее количество частиц в надрешетном продукте $Q = Q_a + Q_b$. Соответственно, концентрация непроходных и проходных частиц в надрешетном продукте равна:

$$C_a = Q_a / Q, \quad C_b = Q_b / Q. \quad (1)$$

В момент времени $t_{i+1} = t + \Delta t$ количество непроходных частиц в надрешетном продукте останется прежним, равным Q_a . Количество проходных частиц в надрешетном продукте уменьшится на величину ΔQ_b и будет равно $Q_b^* = Q_b - \Delta Q_b$. Соответственно, общее количество частиц в надрешетном продукте $Q^* = Q_a + Q_b - \Delta Q_b = Q - \Delta Q_b$. Определим концентрацию $C_a^* = C_a + \Delta C_a$ непроходных частиц в надрешетном продукте при $t_{i+1} = t + \Delta t$:

$$C_a + \Delta C_a = Q_a / Q^* = Q_a / (Q - \Delta Q_b). \quad (2)$$

Анализ физического содержания задачи позволяет сформулировать гипотезу: величина ΔQ_b пропорциональна продолжительности отрезка времени Δt и количеству проходных частиц в надрешетном продукте Q_b в данный момент времени t . Необходимо учитывать также производительность оборудования для данного фракционируемого материала. Тогда гипотеза позволяет записать следующее соотношение:

$$\Delta Q_b = (\Delta t / \tau) Q_b, \quad (3)$$

где τ – не изменяющийся с течением времени параметр модели, зависящий от конструктивно-технологических характеристик оборудования и физико-механических свойств фракционируемого материала. Параметр τ имеет размерность времени и подлежит определению по результатам технологического эксперимента. Обозначим

$$\Delta \theta = \Delta t / \tau. \quad (4)$$

Подставив (3) в (2), получим с учетом (1) и (4):

$$C_a + \Delta C_a = C_a / (1 - \Delta \theta C_b). \quad (5)$$

Преобразуем равенство (5), предполагая, что ΔC_a и $\Delta \theta C_b$ достаточно малы и пренебрегая произведением $\Delta C_a \Delta \theta C_b$. Тогда получим: $\Delta C_a = C_a \Delta \theta C_b$. Учитывая, что

$$C_a + C_b = 1 \quad (6)$$

и переходя к пределу при $\Delta\theta \rightarrow 0$, получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dC_a}{C_a(1-C_a)} = d\theta.$$

Здесь $d\theta = dt/\tau$. Интегрирование уравнения (с учетом условия $C_a = C_{a0}$ при $\theta = 0$) приводит после преобразований к расчетной формуле для определения C_a в зависимости от безразмерного параметра времени $\theta = t/\tau$ [0]:

$$C_a = C_{a0} \exp\theta / (1 + C_{a0}(\exp\theta - 1)). \quad (7)$$

Уравнение (7) является частным случаем логистического уравнения, которое в 1838 г. опубликовал бельгийский математик Ферхюльст (P.F. Verhulst) в связи с исследованием модели роста численности населения. В настоящее время это уравнение, его модификации и обобщения используются при построении математических моделей динамики популяций, в исследованиях биологических, экологических и экономических проблем [0]. Однако применений данного уравнения в математических моделях фракционирования сыпучего материала в известных нам публикациях, включая Интернет-ресурсы, найти не удалось.

Для практического применения представленной модели необходимо знать параметр τ , который может рассматриваться как некоторая технологическая константа. Чтобы найти τ , достаточно по результатам пробного рассева поступившего на переработку сыпучего материала определить концентрацию C_{a0} на старте рассева и концентрацию C_a при фиксированном времени t . Затем, учитывая, что $\theta = t/\tau$, определить τ с помощью (7).

4. Влияние длины и угла наклона сита. Выполним преобразование безразмерного параметра времени $\theta = t/\tau$ учитывая, что частицы щепы в слое надрешетного продукта перемещаются по направлению от верхней к нижней кромке сита и что среднюю скорость v перемещения частиц в данном направлении можно считать постоянной. Например, в установках для фракционирования щепы угол наклона сит составляет от 2° до 11° и, соответственно, скорость v от 0,06 до 0,20 м/с [0], [0]. Обозначим x – путь, пройденный частицей надрешетного продукта по направлению к нижней кромке сита; L – длина сита. Тогда для оценки влияния длины и угла наклона сита используем формулу (7) и $\theta = x/(tv)$, $0 \leq x \leq L$.

5. Оценка эффективности фракционирования. Одной из характеристик эффективности фракционирования полидисперсного сыпучего материала является отношение количества извлеченных из надрешетного продукта частиц к начальному количеству проходных частиц в надрешетном продукте:

$$\varepsilon = (Q_{b0} - Q_b) / Q_{b0} = 1 - Q_b / Q_{b0}.$$

Как указано выше, общее количество непроходных частиц в надрешетном продукте не изменяется с течением времени. Поэтому $C_{a0}Q_0 = C_aQ$. Отсюда $Q = C_{a0}Q_0 / C_a$. Тогда

$$\varepsilon = 1 - C_bQ / (C_{b0}Q_0) = 1 - Q_0C_{a0}C_b / (Q_0C_{b0}C_a) = 1 - C_{a0}C_b / (C_{b0}C_a). \quad (8)$$

Подстановка соотношения (7) в (8) с учетом равенства (6) позволяет записать:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-\theta). \quad (9)$$

Соотношение (9) идентично уравнению, которое с использованием теории случайных процессов получил в 1962 г. Е. А. Непомнящий применительно к моделированию сепарирования зерна [0]. Этим же уравнением моделируются закономерности рассева тонким слоем, а также просеивание частиц, достигших поверхности сита при рассеве толстым слоем. Достоверность результатов моделирования с использованием данного уравнения подтверждена многими известными по литературе экспериментальными данными по рассеву муки, кварца и других сыпучих материалов на ситах с различными отверстиями [0]. По этой причине данное уравнение может рассматриваться как один из фундаментальных результатов прикладных исследований в области фракционирования сыпучих материалов методом рассева.

6. Относительное изменение концентрации проходных частиц в надрешетном продукте. Характеристика (9) зависит только от времени θ , что может рассматриваться как недостаток. В случае применения только характеристики (9) могут остаться вне поля зрения

инженера некоторые детали исследуемого технологического процесса фракционирования сыпучего материала. Поэтому необходимы и другие показатели.

В качестве другой характеристики эффективности извлечения проходных частиц из надрешетного продукта может быть использован модуль относительного изменения концентрации проходных частиц в надрешетном продукте:

$$\varepsilon_2 = |C_b - C_{b0}| / C_{b0} = |C_b / C_{b0} - 1|. \quad (10)$$

В процессе рассева величина C_b уменьшается, оставаясь неотрицательной: $0 \leq C_b \leq C_{b0}$. Поэтому формула (10) может быть переписана в виде

$$\varepsilon_2 = (C_{b0} - C_b) / C_{b0} = 1 - C_b / C_{b0}. \quad (11)$$

Принимая во внимание (6) и (7), преобразуем (11) к виду:

$$\varepsilon_2 = 1 - 1 / (1 + C_{a0}(\exp \theta - 1)). \quad (12)$$

С физической точки зрения, очевидно, что если $C_{b0} \ll 1$, то извлечение проходных частиц не окажет существенного влияния на толщину слоя надрешетного продукта. Тогда в установившемся процессе фракционирования почти постоянны толщина слоя, а значит и количество надрешетного продукта $Q \approx Q_0$. В этом случае взамен (8) получим:

$$\varepsilon = 1 - Q_b / Q_{b0} \approx 1 - C_b Q_0 / (C_{b0} Q_0) = 1 - C_b / C_{b0} = (C_{b0} - C_b) / C_{b0}. \quad (13)$$

Формула (13) допускает две интерпретации, первая из которых приведена в [0]. С одной стороны, формула вида (13) приближенно определяет степень извлечения проходных частиц из надрешетного продукта, игнорируя изменение толщины слоя надрешетного продукта в процессе рассева. С другой стороны, принимая во внимание соотношение (11) находим, что та же формула (13) точно определяет относительное изменение концентрации проходных частиц в надрешетном продукте с учетом изменения толщины слоя, а значит и количества надрешетного продукта в процессе рассева. Поясняя изложение, приведем примеры.

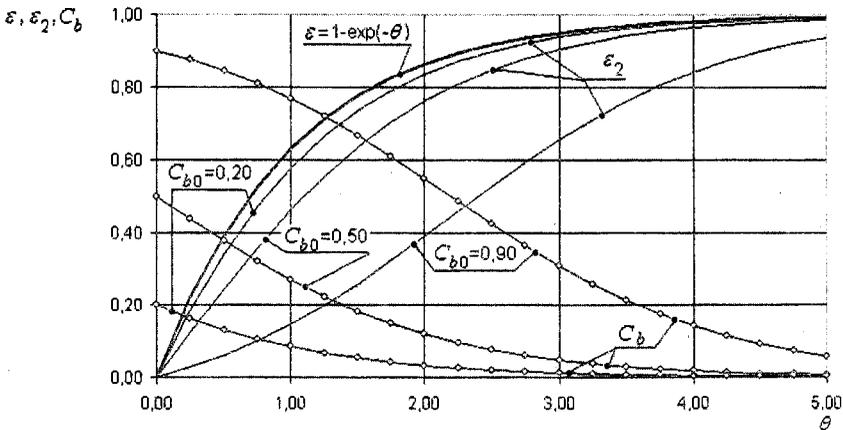


Рисунок 1 – Изменение характеристик рассева в зависимости от начальной концентрации проходных частиц C_{b0} и параметра времени θ

7. Результаты решения модельных задач. На рисунке 1 приведены в графической форме результаты решения модельных задач с применением соотношений (7), (9), (12) при $\tau = 2,5$ с. Эти данные подтверждают, что с уменьшением начальной концентрации C_{b0} проходных частиц в слое надрешетного продукта значения ε и ε_2 сближаются, при этом $\varepsilon_2 \leq \varepsilon$. Формула (9) обеспечивает приемлемую для практики точность, если $C_{b0} \leq 0,2$.

8. Учет различий в подаче сыпучего материала на верхнее и нижеследующие сита. Сыпучий материал подается на верхнее сито по его верхней кромке (рис. 2). Поэтому любая часть материала, перемещаясь вниз по наклонному ситу, пройдет всю его длину.

На ярус 2 сыпучий материал поступает через отверстия верхнего сита. По этой причине не все части массива сыпучего материала, перемещаясь вниз по наклонной плоскости сита, проходят всю его длину. Соответственно, продолжительность рессева, а значит, и изменение концентрации частиц будут неодинаковыми для различных частей данного массива.

Если весь массив сыпучего материала условно разбить вертикальными воображаемыми плоскостями на n блоков, то продолжительность обработки блока 1 будет наибольшей, а блока n – близка к нулю (рис. 2). Зная размеры сита и среднюю скорость движения блоков, можно найти продолжительность нахождения каждого блока на сите. Затем по рассмотренной выше методике можно определить концентрацию частиц и количество сыпучего материала в каждом из блоков. Дальнейшие вычисления сводятся к решению стандартной задачи о концентрации частиц в сыпучем материале, полученном при смешивании материалов с различной концентрацией частиц. Такая методика использована при обосновании технического решения установки для разделения на фракции древесной щепы как полидисперсного сыпучего материала [0].

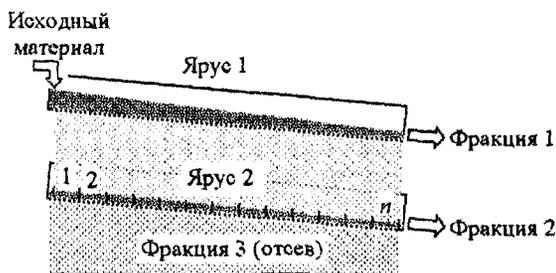


Рисунок 2 – Разбиение сыпучего материала на условные блоки 1, 2, ..., n

9. Выводы. Предложена математическая модель процесса фракционирования полидисперсного сыпучего материала на установках с ярусной компоновкой сит. При построении модели использован новый в данной области прикладных исследований подход, который на теоретическом уровне сводит рассматриваемую задачу к решению уравнения Ферхюльста.

С использованием предложенной модели могут быть исследованы изменения концентрации частиц сыпучего материала в процессе рессева в зависимости от длины сита, угла его наклона и скорости движения сыпучего материала вдоль сита.

На модельных примерах показано, что известная характеристика эффективности рессева ε адекватна в случае небольшой (до 0,2) концентрации проходных частиц. Предложена и обоснована более точная оценка ε_2 , сводящаяся к вычислению относительного изменения концентрации частиц сыпучего материала в процессе его разделения на фракции.

Представленные в данной статье результаты могут быть использованы при обосновании рекомендаций по совершенствованию оборудования для фракционирования сыпучих материалов методом рессева, что, в частности, подтверждено получением патента РФ [5].

Достоверность полученных результатов подтверждена их согласованностью с известными по литературе данными, полученными по другим методикам.

Перспективы развития работы связаны с использованием полученных результатов при оптимизации технологических параметров оборудования для разделения сыпучих материалов на фракции методом рессева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмадиев, Ф.Г. Математическое моделирование и оптимизация процессов разделения дисперсных материалов на многоярусных ситовых классификаторах / Ф.Г. Ахмадиев, Р.Ф. Гиззатов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. – № 4. – С. 330-340.
2. Васильев, С.Б. Изучение возможности сортирования щепы по толщине на плоских гирационных сортировках / С.Б. Васильев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2005. – № 172. – С. 105-111.

3. Васильев, С.Б. Влияние технологии раскряя балансовой древесины на фракционный состав щепы / С.Б. Васильев, Л.Н. Девятникова, Г.Н. Колесников // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2011. – Вып. 195. – С. 123–134.
4. Васильев, С.Б. Логистический подход к моделированию фракционирования сыпучих материалов / С.Б. Васильев, Г.Н. Колесников // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. – № 4 (109). – С. 61–65.
5. Васильев С.Б., Колесников Г.Н., Шегельман И.Р., Андреев А.А., Кульбицкий А.В. Патент РФ № 109025. Установка для сортировки древесной щепы. (Опубликовано 10.10.2011).
6. ГОСТ 15815-83. Щепа технологическая. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1984. 11 с.
7. Жуковский, Н.Е. Заметка о плоском расसेве / Н.Е. Жуковский // Собрание сочинений. Т. 3. М.: ГИТТЛ. – 1949. – С. 515–522.
8. Кульбицкий, А.В. Влияние на стратификацию щепы толщины сортируемого слоя и угла наклона сит / А.В. Кульбицкий, С.Б. Васильев // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». 2009. – № 7 (101). – С. 98–100.
9. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление: Пер. с англ. Том 1. // М.: Недра, 1981. – 343 с.
10. Локтионова, О.Г. Численное моделирование динамики вибрационного процесса разделения сыпучих смесей / О.Г. Локтионова // Известия Тульского гос. техн. ун-та. Сер. Технологическая системотехника. Вып.8. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 190-195.
11. Непомнящий, Е.А. Применение теории случайных процессов к определению закономерности сепарирования сыпучих смесей / Е.А. Непомнящий // Всесоюзный научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ). Труды, выпуск 42. М., 1963. – С. 47 – 56.
12. Постан М.Я. Обобщенная логистическая кривая: ее свойства и оценка параметров / М.Я. Постан // Экономика и статистические методы. 1993. Т. 29, вып. 2. – С. 305–310.
13. Федосов, С.В. Моделирование процесса классификации полидисперсных материалов на виброгрохотах / С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов // Строительные материалы. 2007. – №11. – С.26-28.
14. Hartmann H., Böhm T., Jensen P.D., Temmerman M., Rabier F. and Golser M. Methods for size classification of wood chips // Biomass and Bioenergy. Vol. 30, Issue 11, November 2006, P. 944-953.
15. Nati C., Spinelli R., Fabbri P. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use // Biomass and Bioenergy. Vol. 34, Issue 5, May 2010. P. 583-587.

Колесников Геннадий Николаевич

Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой механики
E-mail: KolesnikovGN@yandex.ru

Васильев Сергей Борисович

Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих производств
E-mail: KolesnikovGN@yandex.ru

G.N. KOLESNIKOV, S.B. VASILYEV

MATHEMATICAL SIMULATION OF FREE-FLOWING BULK POLYDISPERSE MATERIALS FRACTIONING PROCESS BY MEANS OF TIERED PACKAGED SCREENS

Mathematical simulation of a free-flowing bulk material fractioning process was investigated. According to the simulation free-flowing bulk polydisperse material moving along a screening surface consists of two types of particles. One type of particles can penetrate screening surface holes, the other one – can not. Concentration of both types of particles can be taken as an indicator of screening process efficiency. The method based on the simulation makes it possible to calculate the main performances indicators of the process with allowance for that the screening material layer tapers off towards the end of the screening surface. Fractioning process by means of tiered packaged screens is under discussion. Correlation between calculated results and industrial experience sets the reliability of designed equations.

Keywords: free-flowing bulk polydisperse material; fractioning process; mathematical simulation; Verhulst equation; tiered packaged screens.

BIBLIOGRAPHY

1. Ahmadiyev, F.G. Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija processov razdelenija dispersnyh materialov na mnogojarusnyh sitovyh klassifikatorah / F.G. Ahmadiyev, R.F. Gizzjatov // *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2011. – № 4. – S. 330-340.
2. Vasil'ev, S.B. Izuchenie vozmozhnosti sortirovanija wepy po tolwine na ploskih giracionnyh sor-tirovkah / S.B. Vasil'ev // *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. 2005. – № 172. – S. 105-111.
3. Vasil'ev, S.B. Vlijanie tehnologii raskroja balansovoy drevesiny na frakcionnyj sostav wepy / S.B. Vasil'ev, L.N. Devjatnikova, G.N. Kolesnikov // *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. 2011. – Vyp. 195. – S. 123-134.
4. Vasil'ev, S.B. Logisticheskij podhod k modelirovaniju frakcionirovanija sypuchih materialov / S.B. Vasil'ev, G.N. Kolesnikov // *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. Serija: Estestvennye i tehnicheckie nauki. 2010. – № 4 (109). – S. 61-65.
5. Vasil'ev S.B., Kolesnikov G.N., Shegel'man I.R., Andreev A.A., Kul'bickij A.V. Patent RF № 109025. Ustanovka dlja sortirovki drevesnoj wepy. (Opublikovano 10.10.2011).
6. GOST 15815-83. Wepa tehnologicheskaja. Tehnicheckie uslovija. M.: Izd-vo standartov, 1984. 11 s.
7. Zhukovskij, N.E. Zametka o ploskom rasseve / N.E. Zhukovskij // *Sobranie sochinenij*. T. 3. M.: GITTL. – 1949. – S. 515-522.
8. Kul'bickij, A.V. Vlijanie na stratifikaciju wepy tolwiny sortiruемого sloja i ugla naklona sit / A.V. Kul'bickij, S.B. Vasil'ev // *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. Serija «Estestvennye i tehnicheckie nauki». 2009. – № 7 (101). – S. 98-100.
9. Linch A. Dzh. Cikly droblenija i izmel'chenija. Modelirovanie, optimizacija, proektirovanie i upravlenie: Per. s angl. Tom 1. // M.: Nedra, 1981. – 343 s.
10. Loktionova, O.G. Chislennoe modelirovanie dinamiki vibracionnogo processa razdelenija sypu-chih smesej / O.G. Loktionova // *Izvestija Tul'skogo gos. tehn. un-ta*. Ser. Tehnologicheskaja sistemotekhnika. Vyp.8. Tula: Izd-vo TulGU, 2006. – S. 190-195.
11. Nepomnjawij, E.A. Primenenie teorii sluchajnyh processov k opredeleniju zakonornosti sepa-rirovaniya sypuchih smesej / E.A. Nepomnjawij // *Vsesojuznyj nauchno-issledovatel'skij institut zerna i pro-duktov ego pererabotki (VNIIZ)*. Trudy, vypusk 42. M., 1963. – S. 47 – 56.
12. Postan M.Ja. Obobwennaja logisticheskaja krivaja: ee svojstva i ocenka parametrov / M.Ja. Postan // *Jekonomika i statisticheskie metody*. 1993. T. 29, vyp. 2. – S. 305-310.
13. Fedosov, S.V. Modelirovanie processa klassifikacii polidispersnyh materialov na vibrogro-hotah / S.V. Fedosov, V.E. Mizonov, V.A. Ogurcov // *Stroitel'nye materialy*. 2007. – №11. – S.26-28.
14. Hartmann H., Böhm T., Jensen P.D., Temmerman M., Rabier F. and Golser M. Methods for size classification of wood chips // *Biomass and Bioenergy*. Vol. 30, Issue 11, November 2006, P. 944-953.
15. Nati C., Spinelli R., Fabbri P. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use // *Biomass and Bioenergy*. Vol. 34, Issue 5, May 2010. P. 583-587.

Kolesnikov Gennady Nikolaevich
 Petrozavodsk State University
 PhD, professor, Head of Department for Mechanics
 E-mail: KolesnikovGN@yandex.ru

Vasilyev Sergey Borisovich
 Petrozavodsk State University
 PhD, professor, Head of Pulp&Paper and Sawn Wood Production Department
 E-mail: KolesnikovGN@yandex.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.4

Д.Ю. БАТЫЩЕВ, И.Е. СТАРЧЕНКО

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БИТОПЛИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Кратко описано устройство и принципы действия новой электронной системы управления карбюраторным двигателем ВАЗ-2110. Система управления обеспечивает работу двигателя на газовом топливе и бензине. Применение разработанной системы значительно улучшает эксплуатационные показатели автомобиля.

Ключевые слова: электронная система управления; работа двигателя; эксплуатационные показатели

В настоящее время на рынке отсутствуют эффективные системы питания карбюраторных двигателей газовым топливом. Существующие на рынке системы питания газовым топливом не обеспечивают оптимального состава смеси даже при работе двигателя на основных режимах, и как следствие автомобиль не обеспечивает потенциальных динамических, экономических, экологических и ресурсных показателей. Бытует расхожее мнение, выраженное в идиомах: "жрет и не едет", "машина на газу тупая", "газ гробит двигатель". Эти ошибочные мнения связаны с принципиально неправильной работой системы питания газовым топливом. Так же при типовом переоборудовании двигателя для питания газовым топливом совершенно не уделяется внимания доработке системы зажигания, а для получения высоких показателей двигателя требуется комплексная модернизация систем питания и зажигания.

На кафедре Техническая эксплуатация автомобилей ЮРГУЭС в рамках научно-исследовательской работы со студентами была разработана микропроцессорная система управления битопливным двигателем на базе карбюраторного двигателя ВАЗ-2110. Система управления обеспечивает работу двигателя на бензине и газовом топливе. Фотография моторного отсека автомобиля с разработанной системой управления приведена на рисунке 1.

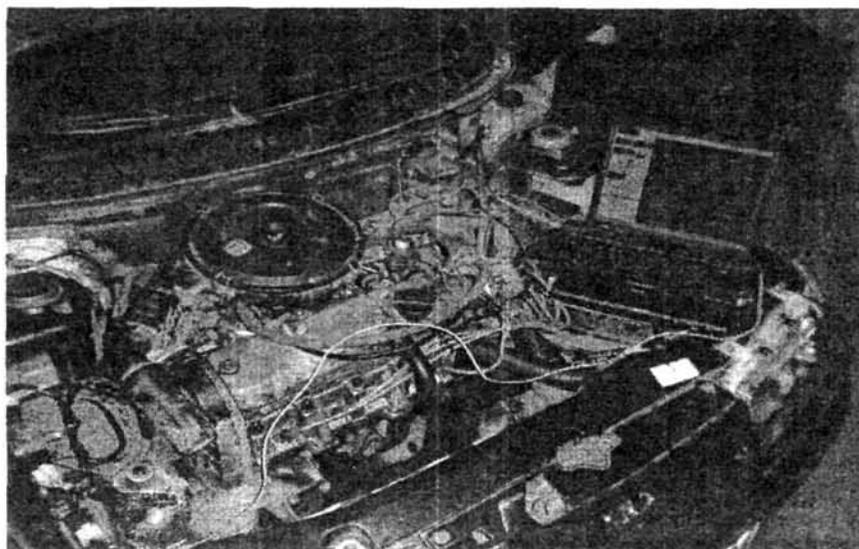


Рисунок 1 – Автомобиль ВАЗ-2110 с разработанной системой управления в процессе настройки

Схема электрическая принципиальная системы управления двигателем приведена на рисунке 2. Основным элементом системы является электронный блок управления, выполненный на базе популярного блока Январь 5.1 применяемого на современных автомобилях ВАЗ. Электронный блок управления обрабатывает сигналы датчика положения коленчатого вала, датчика абсолютного давления, датчика температуры охлаждающей жидкости, датчика температуры воздуха, концевого выключателя дроссельной заслонки карбюратора, сигнал датчика кислорода и формирует сигнал для управления коммутатором системы зажигания и управляет газовыми форсунками, подающими топливо. В результате момент зажигания и подача топлива является оптимальным для всех режимов работы двигателя. Также электронный блок управляет включением вентилятора системы охлаждения.

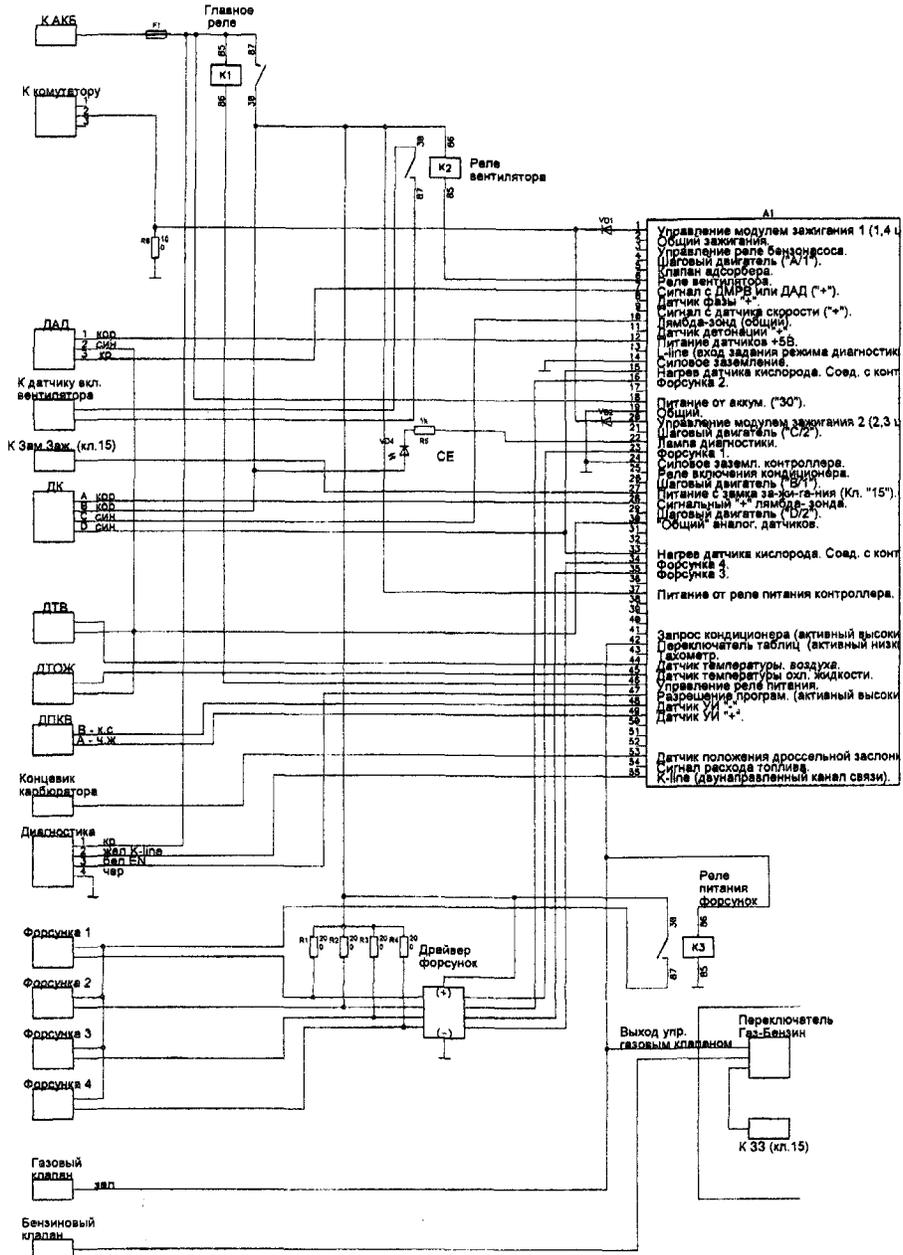


Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная системы управления двигателем

Газовые электромагнитные форсунки отличаются, по электрическим параметрам от бензиновых форсунок и не могут непосредственно подключаться к электронному блоку управления Январь 5.1. Для электрического согласования выходов с электронного блока управления с газовыми форсунками используется, так называемый, драйвер низковольтных форсунок. Драйвер обеспечивает форсированное нарастание тока электромагнита форсунки и его удержание на заданном уровне. В результате удалось получить малую задержку открытия газовой форсунки.

Электронный блок управления поддерживает два режима настроек параметров системы, которые выбираются в зависимости от выбора вида топлива (газ/бензин).

В случае обнаружения неисправностей датчиков блок управления зажигает лампу диагностики (Check Engine). Конкретный вид неисправности можно узнать, воспользовавшись диагностическим сканером, подключив его к разъему диагностики. Также лампа диагностики индицирует обнаружение системой пропусков воспламенения в цилиндрах двигателя (так называемое "троение" двигателя).

При разработке системы управления ставилась задача минимального вмешательства в электрооборудование и конструкцию автомобиля. Так, например, сохранены штатная система питания (карбюратор, воздушный фильтр и т. п.) и зажигания (датчик-распределитель зажигания, коммутатор, высоковольтные провода). Слесарные работы сведены к минимуму. Изменения стандартной схемы электрооборудования не проводились. Система экономайзера принудительного холостого хода и комбинация приборов работают в штатном режиме. Возврат к стандартной системе питания и зажигания осуществляется переключением одного соединительного разъема, что является дополнительным преимуществом повышающим надежность автомобиля.

Электронный блок управления Январь 5.1 рассчитан на работу совместно с двухканальным модулем зажигания 42.3705. В разработанной системе удалось обеспечить взаимодействие электронного блока со стандартной системой зажигания ВАЗ-2110, содержащей электронный коммутатор, катушку зажигания, разносчик зажигания, путем объединения выходов блока с помощью схемы монтажного ИЛИ.

Особенностью разработанной системы управления двигателем, в отличие от известных систем, является отсутствие регулятора циклового наполнения двигателя в режиме холостого хода, так называемого регулятора холостого хода. Его функции выполняет система холостого хода карбюратора. Дополнительно стабилизация оборотов холостого хода обеспечивается автоматической регулировкой угла опережения зажигания.

Главным достоинством системы управления двигателем является наличие обратной связи по составу отработанных газов. Система управления, с помощью датчика кислорода, следит за составом отработанных газов двигателя, поддерживая близкий к стехиометрическому состав топливовоздушной смеси. Причем в режиме малых и средних нагрузок двигателя поддерживается обедненная смесь, в режиме больших нагрузок обогащенная. Таким образом, обеспечиваются высокие показатели мощности, топливной экономичности и ресурса двигателя.

Субъективные дорожные испытания автомобиля показали: более высокую равномерность крутящего момента двигателя, значительное увеличение момента двигателя на низких оборотах (при использовании газа и бензина), полное отсутствие детонации на всех режимах, что позволяет автомобилю развивать высокие динамические показатели. Двигатель прощает водителю ошибки в выборе передачи и неточности управления дроссельной заслонкой. Также заметно снизился расход топлива.

Таким образом, путем нетрудоёмкой модернизации морально устаревшего двигателя удалось получить битопливный автомобиль, отвечающий современным требованиям.

Парк газовых автомобилей с карбюраторными двигателями еще очень велик, и подобная модернизация может значительно повысить эффективность эксплуатации этих автомобилей. При различном объеме трудозатрат подобную систему можно установить на любой карбюраторный автомобиль. Особый интерес представляет автомобили семейства Газель-

Соболь с карбюраторным двигателем ЗМЗ-406.3. Данную систему можно установить на этот автомобиль с минимумом трудозатрат. Также в основном эти автомобили зачастую используются в качестве общественного транспорта и уже оснащены газобаллонным оборудованием. Принимая во внимание этот факт, объем доработок сведется к минимуму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тирявец, А.К. Теория управления автомобильным бензиновым двигателем / А.К. Тирявец. – М.Стройздат, 1999
2. Григорьев, Е.Г. Газобаллонные автомобили / Е.Г. Григорьев, В.Д. Колумбаев, В.И. Ерохов. – М: Машиностроение, 1989.

Батышев Денис Юрьевич

Южно-Российский Университет Экономики и Сервиса
студент гр. СТТМ-Р52 кафедры Техническая эксплуатация автомобилей
346500, Ростовская область, г. Шахты, ул. Текстильная 37 а
+79281780457
E-mail: denis.batyshev@mail.ru

Старченко Иван Евгеньевич

Южно-Российский Университет Экономики и Сервиса
канд. техн. наук, доц. кафедры Техническая эксплуатация автомобилей
346500, Ростовская область, г. Шахты, ул. Шевченко 147
+79198758924
E-mail: starchenko@mail.ru

D.Y. BATISHEV, I.E. STARCHENKO

CONTROL SYSTEM OF ENGINE ON THE TWO FUEL

Theory of operation and description of a new electronic control system for VAZ 2110 twin-engine carburetor engine are described. Electronic control system provides engine operation on gasoline or condensed gas fuel. Application of this new electronic control system improves engine performance.

Keywords: electronic control system; gas engine operation; performance data.

BIBLIOGRAPHY

1. Tirjavec, A.K. Teorija upravljenja avtomobil'nym benzinovym dvigatelem / A.K. Tirjavec. – M.Strojzdat, 1999
2. Grigor'ev, E.G. Gazoballonnye avtomobili / E.G. Grigor'ev, V.D. Kolumbaev, V.I. Erohov. – M: Mashinostroenie, 1989.

Batishev Dennis Yurievich

The South Russia State University of Economics and Service
student of the Department of the «Technical exploitation vehicles»
Zipp 346500, Rostov region, Shakhty, Tekstilnaya st., 37a
+79281780457
E-mail: denis.batyshev@mail.ru

Starchenko Ivan Evgen'evich

South Russia State University of Economics and Service
Ph.D, associate professor
Zipp 346500, Rostov region, Shakhty, Shevchenko st., 147
+79198758924
E-mail: starchenko@mail.ru

Н.В. ЗЕМЛЯКОВ

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ОСЕВОЙ ВЕНТИЛЯТОР

В статье рассматривается ранее не использовавшийся в практике конструкций осевых вентиляторов энергосберегающий эффект, получаемый от особой конструкции лопастей пропеллерной крыльчатки.

Ключевые слова: центробежная сила, пропеллерная крыльчатка, рабочая поверхность лопасти, законцовка лопастей, осевой поток, радиальный поток, защитный кожух, внутренняя поверхность защитного кожуха.

ВВЕДЕНИЕ

В современной специальной литературе [1], [2] вентилятор классифицируется как: машина, предназначенная для перемещения определенных объемов воздуха (газа) из одной части пространства в другую. Конструкция осевого вентилятора, в отличие от других типов вентиляторов обладает рядом достоинств, одно из которых, это его простота. Осевой вентилятор представляет собой осесимметричную конструкцию, основными узлами которой являются, пропеллерная крыльчатка, называемая еще рабочим колесом, которая выполнена из осесимметричной втулки на наружной поверхности которой жестко закреплены лопасти (лопасти), которые равноудалены друг от друга, и рабочие поверхности которых расположены под одним и тем же острым углом к плоскости вращения. При этом каждая лопасть имеет переднюю и заднюю кромки. Крыльчатка осевого вентилятора осесимметрично, с возможностью вращения вокруг оси, размещена во внутренней полости (цилиндрической или профильной) трубчатого кольца (кожуха) с определенным зазором между законцовками лопастей и внутренней поверхностью кожуха. При вращении пропеллерной крыльчатки передние кромки лопастей захватывают определенный объем воздуха и подают под рабочую поверхность, которая, как наклонной плоскостью смещает этот объем воздуха к задней кромке каждой лопасти, обеспечивая таким образом суммарное осевое смещение потока воздуха, с определенными расходом и давлением. Осевые вентиляторы находят широкое применение в технике систем пылеулавливания и пневмотранспорта, в механизмах охлаждения машин и их узлов, в механизмах охлаждения приборов, в системных блоках персональных компьютеров, в компрессорах холодильных машин, в системах вентиляции и кондиционирования воздуха, в системах транспортных средства на воздушной подушке, аэросанях, экранопланах, в двигателях джетаблей (рис.1 и 2) и др.



Рисунок 1 – Аэросани

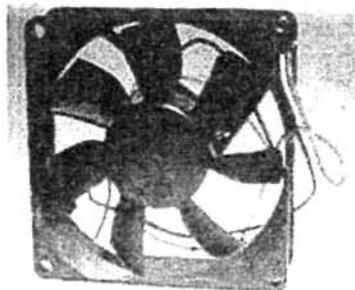


Рисунок 2 – Вентилятор для охлаждения процессора компьютера

В процессе экспериментальных исследований автором на кафедре МАПП (Машины и аппараты пищевых производств) в ТИ Госуниверситета - УНПК было установлено, что все известные осевые вентиляторы имеют один реальный недостаток, который в процессе его работы увеличивает энергопотребление. Этот недостаток был выявлен при сравнительном анализе потребляемого тока во время работы с максимальной производительностью известного осевого вентилятора ВН-2, используемого для охлаждения приборных узлов.

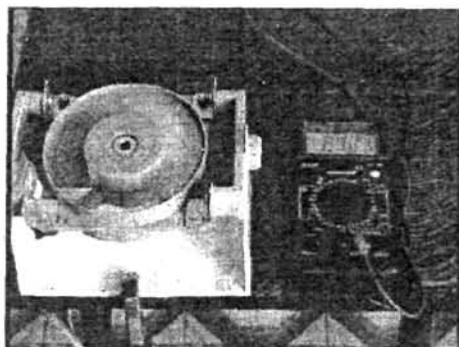


Рисунок 3 – Испытательная установка

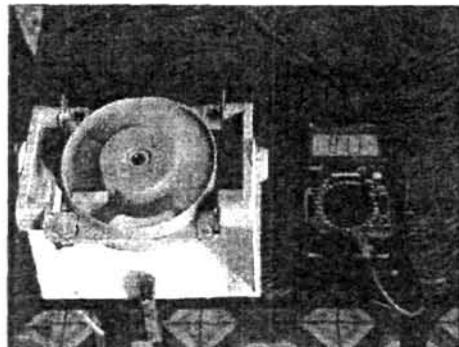


Рисунок 4 – Испытательная установка

Так, на рисунке 3 изображена испытательная установка с работающим осевым вентилятором ВН-2, к которому подключен мультиметр измеряющий потребляемый ток, который составлял 84 миллиампера. После прекращения вращения пропеллерной крыльчатки она удалялась с оси вентилятора и ко всем законцовкам лопастей крыльчатки со стороны их рабочих поверхностей под углом 90° приклеивались специальные гребни из медной фольги (рис. 5). Модернизированная конструкция крыльчатки вновь устанавливалась на ось вентилятора. На рисунке 4 изображена испытательная установка с работающим осевым вентилятором ВН-2 с модернизированной крыльчаткой, к законцовкам лопастей которой были приклеены гребни из медной фольги, при этом подключенный мультиметр показывает, что потребляемый ток составляет уже меньшее значение, а именно – 81,3 миллиампера. Серия таких экспериментов показала, что применение крыльчатки осевого вентилятора ВН-2 с лопастями, снабженными на торцевых концах (законцовках) гребнями новой конструкции позволяет снизить энергопотребление указанного осевого вентилятора на 1,27%.



Рисунок 5 – Конструкция одной из пяти лопастей, снабженная приклеенным бортиком по торцу

Полученная экспериментально новая информация о работе и возможностях осевого вентилятора позволяет отнестись критически к известным теоретическим обоснованиям о работе и возможностях осевого вентилятора. Таких, как [1], где сказано: «Когда осевое колесо начинает вращаться, то воздух захватывается лопастями и перемещается по направлению вращения. При этом существует одна особенность работы, которой обладают осевые вентиляторы. Она заключается в том, что воздух распространяется лишь в осевом направлении и практически не перемещается в радиальном» или в [2]: «При максимальной произво-

дительности отклонение направления потока от аксиального направления минимально, при уменьшении производительности поток выходит из рабочего колеса под некоторым углом к цилиндрической поверхности, удаляясь от оси вращения колеса. Чем меньше производительность, тем больше поток отклоняется от осевого направления. При небольшой производительности поток выходит из колеса почти радиально».

Объяснить выявленный автором энергосберегающий эффект осевого вентилятора имеющего загнутые законцовки лопастей к их рабочим поверхностям можно следующим образом. Классическая физика указывает, что при вращении любой массы вокруг какой-то оси, на эту массу начинает действовать центробежная сила направленная радиально от оси вращения и перпендикулярная к ней. Из этого следует, что воздушный поток, попадая в область действия крыльчатки типового осевого вентилятора, например ВН-2, также закручивается и, при этом обладая определенной массой, подвергается действию центробежной силы. Под действием этой центробежной силы, часть воздушного потока перемещается с большой скоростью вдоль рабочих поверхностей лопастей осевого вентилятора, то есть радиально и, срываясь с законцовок всех лопастей, этот радиальный поток воздуха с большой скоростью ударяется в статически неподвижную внутреннюю цилиндрическую стенку защитного кожуха. При таком ударе радиального воздушного потока о внутреннюю стенку защитного кожуха, вся его масса как бы раздваивается. При этом одна часть раздвоенного потока поворачивает в сторону движения основного осевого потока, а вторая часть направлена в противоположную сторону от направления основного осевого потока и, таким образом создает очевидный тормозящий эффект, то есть происходит эффект «палки в колесо».

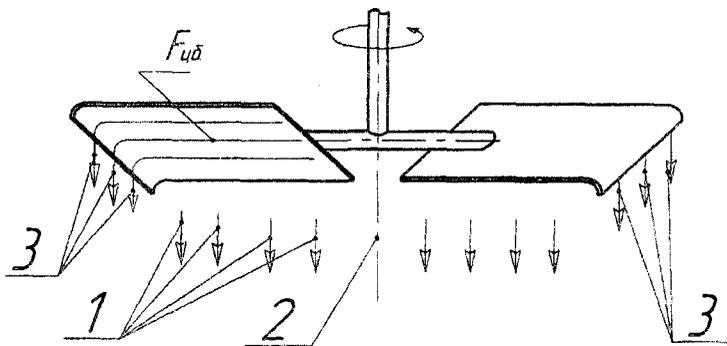


Рисунок 6 – Схема движения потоков, осевого и радиального у крыльчатки с модернизированными лопастями

1 – направление основного осевого потока воздуха; 2 – ось вращения пропеллерной крыльчатки;

3 – измененное направление радиального потока подмешенного к осевому потоку;

$F_{ц}$ – направление действия центробежной силы на радиальный поток;

R – радиус вращения законцовок лопастей

На рисунке 6 представлена схема перемещения потоков воздуха (осевого и радиального), при работе модернизированной крыльчатки, у которой торцы лопастей загнуты на угол 90° в сторону рабочих поверхностей лопастей.

Из сказанного можно сделать вывод, что вся кинетическая энергия от перемещения массы радиального потока воздуха, которую он получил от действия центробежной силы, при его радиальном перемещении от втулки до внутренней поверхности цилиндрической стенки кожуха гасится бесполезно. Такой тормозящий эффект радиального потока способствует лишь увеличению энергопотребления осевого вентилятора и снижению его КПД в целом.

Выявленный экспериментально технический эффект энергосбережения при работе осевого вентилятора позволил получить патент России на изобретение – «Осевой вентилятор»

№2232920. В изобретенном устройстве (Рисунок б) радиальный воздушный поток перемещается также как у прототипа вдоль лопаток, а затем с помощью загнутых на угол 90° законцовок лопастей этот радиальный поток меняет направление своего движения и присоединяется к осевому, основному потоку. При этом величина кольцевого зазора между внутренней цилиндрической поверхностью направляющего кожуха и периметрами загнутых торцов каждой лопатки сохраняется такой же как и у прототипа, и составляет определенную величину.

ВЫВОД

Новая конструкция осевого вентилятора позволяет ему в рабочем состоянии потреблять меньший ток и обеспечивать, таким образом, явное энергосбережение.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Государственный университет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.gree-orel.ru/st2.php>
2. Виноградов, В.И. Вентиляторы электрических машин / В.И. Виноградов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отд-ние, 1980. – 200 с., ил., стр.165.
3. Патент России №2232920.

Земляков Николай Васильевич

Государственный университет - УНПК

Кандидат технических наук, доцент

Тел: (4862) 55-11-87 рабочий, мобильный: +79065684804

E-mail: zem49@mail.ru , mapp@ostu.ru

N.V. ZEMLYAKOV

DEVELOPMENT OF A SERIES OF ENERGY-EFFICIENT EQUIPMENT

In article it is considered earlier not used in practice of designs of axial fans of energy-efficient the effect received from a special design of blades propeller the driving wheel.

Keywords: centrifugal force, propeller the driving wheel, a working surface of the blade, face of blade, blades, an axial stream, a radial stream, a protective casing, an internal surface of a protective casing.

BIBLIOGRAPHY

1. <http://www.gree-orel.ru/st2.php>
2. Vinogradov, V.I. Ventilatoryi jelektricheskikh mashin / V.I. Vinogradov. – L.: Jenergoizdat. Leningr. Otd-nie, 1980. – 200 s., il., str.165.
3. Patent Rossii №2232920.

Zemljakov Nikolay Vasilevich

State University – ESPC

Can. Sc social

Eagle, Russia. Bodies. And fax (4862 551187),

E-mail: mapp@ostu.ru, zem49@mail.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.9.048

О.Н. ДОРОНИН

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕЛОГО ЧУГУНА ЭЛЕКТРОДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ МАРКИ СТИМ

Статья посвящена проблеме исследования технологических параметров процесса электроискрового легирования при упрочняющей обработке деталей машин и рабочего инструмента изготовленных из белого износостойкого чугуна. Цель данной работы - определение причин отрицательного привеса катода при ЭИЛ белого чугуна с применением электродов марки СТИМ. Определение причин отрицательного привеса катода при электроискровом легировании белых чугунов позволит повысить физико-механические свойства получаемых покрытий и выработать рекомендации по применению гравиметрического метода для случаев, в которых наблюдается снижение массы упрочняемого изделия.

Ключевые слова: электроискровое легирование, СТИМ, белый чугун, упрочнение, гравиметрический метод, отрицательный привес, обезуглероживание, зона термического влияния.

Технология электроискрового легирования (ЭИЛ) один из самых универсальных методов повышения стойкости рабочей поверхности тяжело нагруженных деталей промышленного оборудования и деталей машин. Сущность метода состоит в том, что при искровом разряде в газовой среде происходит преимущественно эрозия материала анода и перенос продуктов эрозии на катод, на поверхности которого образуется слой измененной структуры и состава. [1]

На кинетику процесса ЭИЛ оказывают влияние большое количество факторов, таких как: полярный эффект, состав и структура электродов, свойства газовой среды, величина межэлектродного промежутка, образование вторичных структур и т.п. Детальные данные о технологическом процессе электроискровой обработки обычно уточняются экспериментальным путем. [1]

Наиболее распространенным и простым для реализации экспериментальных исследований считается гравиметрический метод, в рамках которого определяют на разных этапах ЭИЛ изменение массы (эрозию) анода и привес катода. Такой подход чрезвычайно полезен тем, что по результатам аналитической обработки данных гравиметрического анализа и микроскопического анализа можно практически полностью проанализировать технологический процесс электроискрового легирования. Гравиметрический метод позволяет определить основные параметры процесса, к числу которых относятся: удельные и суммарные эрозия анода Δ_a и $\sum^{t(n)} \Delta_a$, и привес катода Δ_k и $\sum^{t(n)} \Delta_k$, интенсивность эрозии η , порог хрупкого разрушения легированного слоя $t_x(n_x)$, коэффициент переноса материала $K = \Delta_k / \Delta_a$, эффективность процесса ЭИЛ - γ . [2]

Однако в ряде случаев изучение свойств измененных поверхностных слоев (ИПС) гравиметрическим методом затруднено или не возможно из-за отрицательного значения привеса катода при ЭИЛ. В частности, такой эффект наблюдается при обработке образцов белого чугуна. Определение причин отрицательного привеса при ЭИЛ белого чугуна даст возможность не только провести анализ свойств ИПС, но и позволит скорректировать рекомендации по применению гравиметрического метода для исследования технологического процесса ЭИЛ.

«Классический» вид графического отображения результатов оценки привеса катода при ЭИЛ гравиметрическим методом, характерный для большинства материалов, предполагает, что основной причиной отрицательного привеса на катоде является достижение порога

хрупкого разрушения для ИПС при данных режимах обработки. Однако, несмотря на достаточно широкую универсальность гравиметрического метода исследователи сталкиваются с явлением отрицательного привеса катода на первом этапе ЭИЛ.

В частности при упрочнении титановых сплавов (катод) варьирование параметров обработки значительно усложняет характер графической зависимости привеса катода от времени [2]. В работе [3] показано, что уменьшение длительности импульса от $\tau=100\text{мкс}$ до $\tau=25\text{мкс}$ и соответствующее увеличение энергии разрядов при обработке катода из титанового сплава ОТ4-1 приводит к отрицательному привесу на начальном этапе обработки, при этом с уменьшением длительности импульса увеличивается потеря массы катода. Так же в работе [3] отмечено, что при обработке титанового сплава электродным материалом на основе $\text{TiC-Ti}_3\text{AlC}_2$ с добавкой $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{нано}}$ происходит преимущественная эрозия материала катода во время обработки. Подобное явление также описано в работе [1] при обработке титанового катода с применением различных анодов группы железа (Fe, Co, Ni) в любой из газовых сред - на первом этапе обработки наблюдается интенсивная эрозия катода, затем этот эффект уменьшается и дальнейшее легирование уже ведет к повышению привеса катода. Данное явление объясняется авторами высокой активностью взаимодействия исходного титана с данными металлами (превалирующая эрозия катода) на первом этапе, и интенсивными физико-химическими превращениями с образованием особого подслоя из интерметаллидов, окислов, твердых растворов и т.п. резко меняющей кинетику процесса (положительный привес) на втором этапе. В работе [4] отмечено, что гравиметрический анализ привеса катода при механизированном ЭИЛ сталей 35 и X12Ф1 чистыми металлами дает отрицательный привес катода на разных стадиях обработки (очень часто на титане) – авторы объясняют это явление порогом хрупкого разрушения.

Таким образом, в абсолютном большинстве случаев отрицательный привес катода при ЭИЛ исследователи объясняют пятью причинами:

- достижением порога хрупкого разрушения ИПС;
- подбором энергетических параметров процесса;
- особыми условиями взаимодействия материалов катода и анода при ЭИЛ (например «железо-титан»)
- обратным массопереносом при ЭИЛ.

В некоторых случаях при ЭИЛ высокоуглеродистых сталей отрицательный привес катода на первом этапе процесса объясняется выгоранием с поверхности катода легких элементов и соединений (углерода, азота, оксидов и т.п.) [1, 3] Однако прямых подтверждений такому предположению не получено в связи со сложностью определения количественного и качественного состава ИПС и ЗТВ по «легким» элементам.

Целью исследования явилось определение причин отрицательного привеса катода при ЭИЛ белого чугуна с применением электродов марки СТИМ.

Методы и материалы исследования. В рамках изучения процесса ЭИЛ белого чугуна было проведено экспериментальное исследование по определению кинетики процесса ЭИЛ образцов отбеленного чугуна (Fe – основа, 3.1 % C, 1.89% Si, 0,56 % Mn, 0.4% Cr, 0.9% Ni) электродами марки СТИМ-40НА состава 60%TiC-40%NiAl (СТИМ – синтетический твердый инструментальный материал). Нанесение производили ручным инструментом без синхронизации частоты импульсов генератора с частотой вибрации инструмента (схема с независимым генератором) с помощью установки «Alier-G53» с использованием режимов № 1,2,3,4 (табл. 1).

Для гравиметрического анализа, который состоял во взвешивании анода и катода до и после обработки поверхности катода с удельным временем от $t=1$ до 10 мин/см² использовали аналитические весы "OHAUS Exploer" с погрешностью измерения 0.1 мг.

Для проведения исследования структуры и состава покрытия и зоны термического влияния использовали микроскоп Quanta Inspect с приставкой для энергодисперсионного анализа и микроскоп Quanta 200D с приставкой для рентгеноспектрального анализа с волновой дисперсией.

Таблица 1 – Параметры режимов обработки установки «Alier-53»

| Режим | Длительность импульса, мкс, ±10% | Амплитудное значение тока импульса, А, ±20% | Частота следования импульсного разряда, Гц | Энергия импульса, Дж |
|-------|----------------------------------|---|--|----------------------|
| 1 | 25 | 125 | 1200 | 0.0625 |
| 2 | 50 | 175 | 600 | 0.0175 |
| 3 | 100 | 200 | 400 | 0.4 |
| 4 | 200 | 200 | 300 | 0.8 |

Обсуждение результатов. В ходе проведения исследований технологического процесса электроискрового легирования белого чугуна с применением электродов марки СТИМ, проведен гравиметрический анализ. Параметры суммарной эрозии анода $\sum \Delta_a$ и привеса катода $\sum \Delta_k$ приведены на рисунке 1.

Параметры суммарной эрозии анода $\sum \Delta_a$ и привеса катода $\sum \Delta_k$ приведены на рисунке 1.

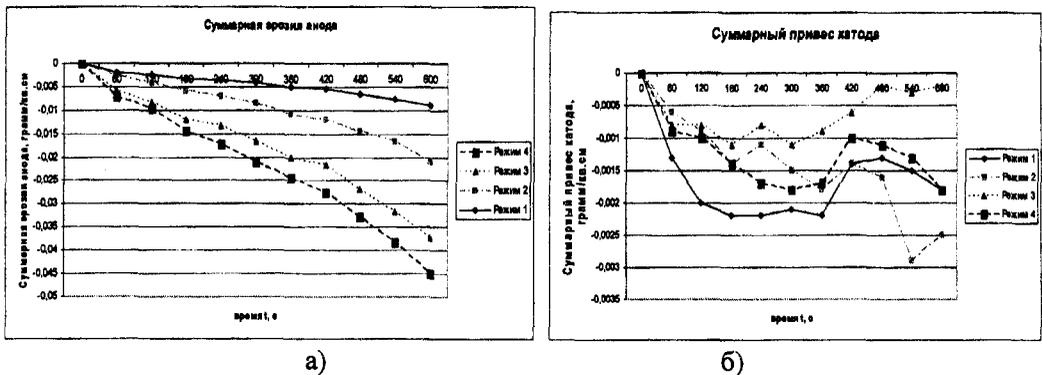


Рисунок 1 – Зависимости суммарной эрозии анода (а) и суммарного привеса катода (б) от времени ЭИЛ подложка - износостойкий чугун (гр./см² за с)

Кинетические зависимости привеса анода от времени имеют традиционный характер, аналогичный большинству электродных материалов, в том числе для электродных материалов марки СТИМ: с увеличением энергии, выделяемой при единичном разряде, увеличивается интенсивность эрозии материала. Видно, что абсолютное значение $\sum \Delta_a$ увеличивается все 10 минут обработки. Некоторая цикличность характера $\sum \Delta_a$ объясняется образованием вторичной структуры на аноде [5].

Зависимости суммарного привеса катода ($\sum \Delta_k$) от времени ЭИЛ (рис. 1) сложнее. На всех примененных режимах обработки наблюдается убыль массы катода. При этом на поверхности образцов четко заметно образование новых слоев. В течение всего процесса обработки исходя из расчета 10 мин/см², величина $\sum \Delta_k$ ни на одном из режимов не привела в абсолютному приросту массы катода по отношению к исходной заготовке.

При исследовании кинетики формирования покрытия заметно резкое снижение общей массы катода уже на первых минутах обработки. Падение общей массы наблюдается вплоть до удельного времени легирования 4 мин/см² для 2 и 3 режима, 5 мин/см² - для 1 режима и 6 мин/см² - для 4 режима, когда появляется первый положительный привес относительно предыдущего измерения. Далее наблюдается рост $\sum \Delta_k$ до времени 7-8 мин/см². После этого наблюдается плавное снижение массы образца вплоть до 10 мин/см².

Убыль $\sum \Delta_k$ на последних минутах обработки хорошо согласуется с теоретическими данными для обработки сплавов на основе железа электродами на основе тугоплавких металлов и карбидов этих металлов и связано, очевидно, с достижением порога хрупкого разрушения покрытия. [1,3,4]

Для выяснения причин потери массы катода на первых минутах обработки был проведен микроскопический анализ образцов с удельным временем легирования 3, 5, 7 и 10 мин/см², обработанных с применением режима №4 на растровом электронном микроскопе с микроанализатором «Quanta Inspect» с измерением толщины нанесенного покрытия. В результате получена зависимость толщины покрытия от времени обработки изделия, которая приведена на рисунке 2.

В начале обработки $t = 1-3$ мин/см², наблюдается значительный рост толщины покрытия, однако, заметна значительная пористость, которая при времени обработки $t=3-5$ мин/см², значительно снижается, структура покрытия становится более плотной и однородной. В период обработки $t=5-7$ мин/см², толщина покрытия интенсивно увеличивается и достигает своего максимума при времени обработки 7 мин/см², затем толщина покрытия начинает снижаться, что позволяет условно принять порог хрупкого разрушения легированного слоя $t_x = 7$ мин/см².

Анализ причин возникновения пористости на основании теоретических исследований затруднен в связи с тем, что в отечественной и мировой научной литературе не достаточно широко рассматривается вопрос электроискрового упрочнения изделий из высокоуглеродистых сплавов железа, в частности чугуна, что, по-видимому, связано с тем, что чугун сравнительно широко применяется в качестве материала электродов и считается достаточно износостойким. Однако при использовании белых чугунов в качестве материала упрочняющего электрода (анода), в покрытии, так же отмечается повышенная пористость, что объясняется интенсивным обезуглероживанием прогретого объема покрытия. [6]

В нашем случае можно предположить, что при времени обработки $t = 1-3$ мин/см², происходит интенсивное обезуглероживание зоны термического влияния на катоде, что вызывает образование пор. При удельном времени легирования $t = 3-5$ мин/см² – покрытие значительно уплотняется, а его толщина несколько снижается. В дальнейшем характер изменения привеса катода и толщины покрытия совпадают.

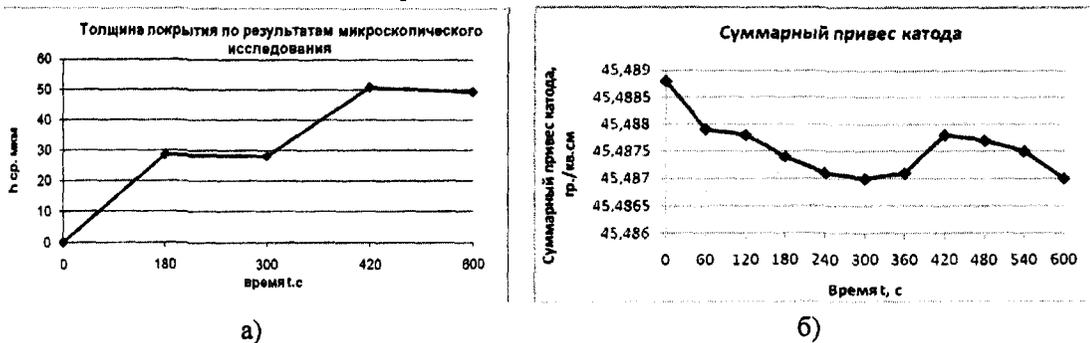


Рисунок 2 – Кинетика процесса ЭИЛ (режим 3)
 а - изменение толщины покрытия, б - суммарный привес катода

Для определения влияния на процесс ЭИЛ явления обратного массопереноса и образования вторичных структур на аноде было проведено сопоставление удельных привеса катода Δ_k и эрозии анода Δ_a на разных этапах обработки. Изменение Δ_k и Δ_a имеет следующий характер: с уменьшением Δ_a уменьшается Δ_k и наоборот. Что свидетельствует о том, что потеря массы катода на всем протяжении эксперимента непосредственно не зависит от обратного массопереноса.

Так же, был проведен проверочный расчет, который показал, что потеря массы катода, с учетом площади нанесения и объема зоны термического влияния, может быть объяснена частичным обезуглероживанием ЗТВ.

Для ориентировочного расчета глубины обезуглероженного слоя по снижению массы катода были приняты следующие допущения:

1. плотность материала катода постоянна и равна 7,7 г/см³;

- привес катода в результате переноса материала анода рассчитывался на основе коэффициента переноса для аналогичного материала анода и режимов обработки на стали Р6М5;
- при расчете не учитывается замедление процесса обезуглероживания за счет затруднения диффузии от приповерхностных слоев непосредственно к поверхности.
- Для упрощения расчета приняли, что в расчетном слое содержание углерода сократилось в 2 раза (до 1,55% по массе).

Расчет массы «выгоревшего» материала (вещества):

$$\Delta m_x = \Delta m_{a\Sigma} * \gamma - \Delta m_{k\Sigma}, \quad (1)$$

где $\Delta m_{a\Sigma}$ – общая эрозия анода; $\Delta m_{k\Sigma}$ – общий привес катода; $\gamma = \Delta m_k / \Delta m_a$, значения Δm_k и Δm_a принимаем из результатов гравиметрического анализа стали Р6М5.

Предполагая, что вся убыль веса катода объясняется обезуглероживанием, рассчитаем толщину обезуглероженного слоя:

$$h = \Delta m_x / (0,0155 * \rho * S_{нов}), \quad (2)$$

В результате были получены данные (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты расчетов

| Режимы | γ | $\Delta m_{k\Sigma, гр}$ | $\Delta m_{a\Sigma, гр}$ | $\Delta m_{x, гр}$ | h, см |
|--------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------|
| 1 | 0,4 | -0,0018 | 0,0089 | 0,00536 | 0,045 |
| 2 | 0,28125 | -0,0025 | 0,0121 | 0,005903 | 0,048 |
| 3 | 0,24 | 0,0028 | 0,0162 | 0,001088 | 0,0091 |
| 4 | 0,179775 | -0,0018 | 0,0078 | 0,003202 | 0,026 |

Для определения содержания углерода в ЗТВ был проведен анализ с использованием рентгеноспектральной приставки с дисперсией по длинам волн на базе электронного растрового микроскопа Quanta 200D. Волновой спектрометр позволяет проводить качественный и количественный анализ в выбранных точках, а также получать карты распределений элементов по площади и профили вдоль линии.

В качестве объекта исследования использовали поперечный срез образца обработанного с удельным временем легирования 1,5 мин/см² с использованием высокоэнергетического четвертого режима (E=0.39 Дж) (табл. 1). Именно при данных времени и режиме обработки наиболее заметна потеря массы катода и высока пористость покрытий.

Общий вид анализируемой области приведен на рисунке 3. Измененный поверхностный слой имеет структуру, характерную для большинства материалов. Верхний слой толщиной до 15 мкм представляет собой достаточно неоднородную структуру с крупными дефектами глобулярной формы диаметром от 1 до 5 мкм. Следующий слой представляет собой светлый не травящийся участок, имеющий четкую границу с поверхностным слоем (рис. 3). Ниже расположены слои с характерной для материала подложки структурой белого чугуна (ледебурит).

Картирование с применением волнового спектрометра позволило получить качественную картину распределения углерода в измененном поверхностном слое образца. Результаты картирования представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Результаты картирования ИПС по углероду

Содержание элемента, по которому производится картирование пропорционально насыщенности светлого тона. На картограмме распределения углерода (рис. 3) хорошо отличим поверхностный слой сложного состава на основе карбида титана толщиной до 15 мкм. Наибольшая концентрация углерода наблюдается в области дефектов глобулярной формы, о чем свидетельствует наиболее яркая окраска дефектных участков покрытия. Ниже расположена зона, имеющая менее интенсивную светлую окраску. Форма этой зоны повторяет форму нетравящегося участка хорошо различимого на результатах микроскопического исследования.

Ниже расположен слой с более интенсивной светлой окраской, что свидетельствует о более высоком содержании углерода, чем в предшествующем слое. Так же необходимо отметить, что интенсивность светлой окраски данного слоя меньше, чем поверхностного.

Для установления графической зависимости распределения углерода была построена качественная кривая распределения углерода вдоль линии с на отрезке АВ на глубине $h_A=12$ мкм, $h_B=88$ мкм (рис. 4).

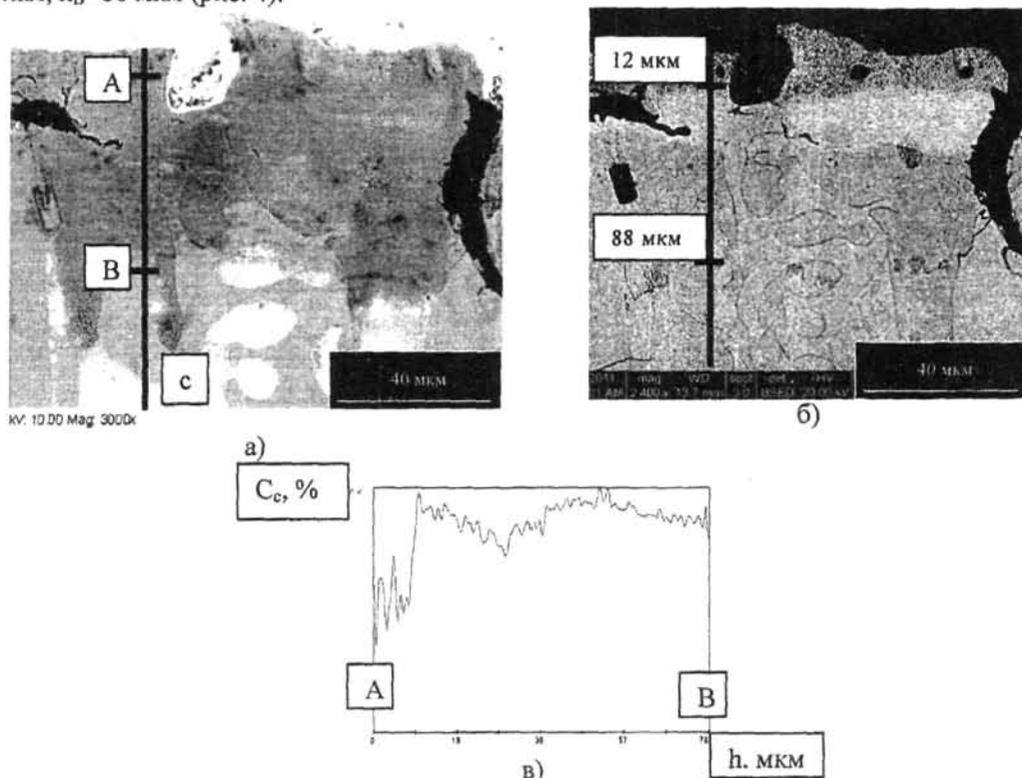


Рисунок 4 – Построение кривой распределения углерода по глубине образца

Графическая зависимость распределения углерода по глубине ИПС (рис. 4в) показывает, что средняя концентрация углерода на глубине $h=12-22$ мкм в среднем составляет 0,5-0,6 (что соответствует результатам аналитического расчета) от концентрации на отрезке $h=22-88$ мкм, причем резкий рост концентрации происходит на отрезке глубиной около 1,5 мкм (от 22 до 23,5 мкм). Эти данные могут служить подтверждением предположения о наличии обезуглероживания в зоне термического влияния на катоде.

В результате работы:

1. Установлено, что при электроискровом легировании белого износостойкого чугуна происходит обезуглероживание зоны термического влияния.

2. Для получения покрытий с максимальной сплошностью на изделиях из белого износостойкого чугуна удельное время процесса электроискрового легирования должно быть не менее 5 мин/см², при котором прекращается интенсивное обезуглероживание зоны термического влияния, из-за наличия газовых пор на первых этапах обработки (менее 5 мин/см²).

3. При наличии пика на графике гравиметрического исследования зависимости привеса катода, которому предшествует стабильный прирост массы катода, его можно условно считать порогом хрупкого разрушения.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гитлевич, А.Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский и др. – Кишинев: Штиинца. – 1985. – 195 с.
2. Верхотуров, А.Д. Электродные материалы для электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева, Л.Ф. Прядко, Ф.Ф. Егоров. – М.: Изд-во Наука. – 1988. – 224 с.
3. Погожев, Ю.С. Дисперсноупрочненные наночастицами электродные материалы и покрытия на основе карбида титана: дис. ... канд. техн. наук. / Ю.С.Погоже. – Москва, 2006 г.
4. Коваленко, С.В. Исследование процесса формирования поверхностного слоя при механизированном электроискровом легировании сталей тугоплавкими металлами и их соединениями: дис. ... канд. техн. наук. / С.В. Коваленко. – Хабаровск, 2003 г.
5. Верхотуров, А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А.Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
6. Химухин, С.Н. Разработка научных основ формирования измененного поверхностного слоя на металлах и сплавах с заданными свойствами при низковольтной электроискровой обработке: автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-р техн. наук / С.Н. Химухин; Комсомольск-на-Амуре, 2009 г.

Доронин Олег Николаевич

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» Старооскольский технологический институт (филиал)

Соискатель

E-mail: o-doronin@mail.ru

O.N. DORONIN

FEATURES OF ELECTRO-SPARK DEPOSITION TREATMENT OF WHITE CAST IRON BY ELECTRODE MATERIALS MARK STIM

Article is devoted a problem of research of technological parameters of process of an electric-spark deposition at strengthening processing of machine parts and the working tool made of wear-resistant white pig-iron. The purpose of the given work - definition of the reasons of a negative additional weight of the cathode at ESD white pig-iron with application of electrodes of mark STIM. Definition of the reasons of a negative additional weight of the cathode at an electric-spark deposition white pig-iron will allow to raise physic-mechanical properties of received coverings and to develop recommendations about application of a gravimetric method for cases in which decrease in weight of a strengthened product is observed.

Keywords: *electric-spark deposition, STIM, white pig-iron, hardening, a gravimetric method, a negative additional weight, decarburization, a zone of thermal influence.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gitlevich, A.E. Jelegtroiskrovoye legirovanie metallicheskih poverhnostej / A.E. Gitlevich, V.V. Mihajlov, N.Ja. Parkanskij i dr.. – Kishinev: Shtiinca. – 1985. – 195 s.
2. Verhoturov, A.D. Jelegtroodnye materialy dlja jelegtroiskrovogo legirovanija / A.D. Verhoturov, I.A. Podchernjaeva, L.F. Prjadko, F.F. Egorov. – M.: Izd-vo Nauka. – 1988. – 224 s.
3. Pogozhev, Ju.S. Dispersnouprochnennye nanochasticami jelegtroodnye materialy i pokrytija na osnove karbi-da titana: dis. ... kand. tehn. nauk. / Ju.S.Pogozhe. – Moskva, 2006 g.
4. Kovalenko, S.V. Issledovanie processa formirovanija poverhnostnogo sloja pri mehanizirovannom jelegtroiskrovom legirovanii stalej tugoplavkimi metallami i ih soedinenijami: dis. ... kand. tehn. nauk. / S.V. Kovalenko. – Habarovsk, 2003 g.
5. Verhoturov, A.D. Formirovanie poverhnostnogo sloja metalov pri jelegtroiskrovom legirovanii / A.D. Verhoturov. – Vladivostok: Dal'nauka, 1995. – 323s.
6. Himuhin, S.N. Razrabotka nauchnyh osnov formirovanija izmenennogo poverhnostnogo sloja na me-tallah i splavah s zadannymi svojstvami pri nizkovol'tnoj jelegtroiskrovoy obrabotke: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. d-r tehn. nauk / S.N. Himuhin; Komsomol'sk-na-Amure, 2009 g.

Doronin Oleg Nikolaevich

National University of Science and Technology "MISIS" Starooskolskiy technological institute (branch of)

Applicant

E-mail: o-doronin@mail.ru

А.М. КОЗЛОВ, Е.В. КИРЮЩЕНКО

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В работе рассматриваются методы повышения устойчивости технологической системы, позволяющие повысить точность фрезерной обработки крупногабаритных деталей, на основе моделирования динамики технологической системы и составления математических моделей для определения оптимальных режимов обработки.

Ключевые слова: крупногабаритная деталь, фрезерование, режимы резания, виброскорость, обратная связь.

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении повышение эффективности механической обработки идет многими путями. Наименее исследованным, но открывающим большие производственные возможности, направлением является изучение и правильное использование динамических процессов, происходящих в технологических системах. Это, прежде всего, относится к колебаниям технологических систем, что особенно актуально при обработке крупногабаритных деталей, масса которых более 100 т., а отдельные поверхности обрабатываются по шестому и седьмому квалитетам, при площади более 2 м². Особенностью технологии обработки таких деталей является применение портативного металлорежущего оборудования при трудоёмкой технологической подготовке, а основным методом лезвийной обработки поверхностей является фрезерование. При этом процесс фрезерования по силовым и температурным нагрузкам часто протекает в крайне тяжелых условиях из-за его нестационарности, вследствие периодических входов и выходов зубьев из контакта с заготовкой. Всё это способствует уменьшению жесткости технологической системы и росту уровня колебаний в ней. Разработка специальных мер, способствующих уменьшению уровня колебаний в технологической системе, является актуальной задачей, решение которой позволит использовать более производительные режимы резания при обеспечении требуемой точности обработки и качества обработанных поверхностей. В данной статье рассмотрены три основных метода, позволяющие повысить устойчивость технологической системы, обеспечив требуемый уровень геометрической точности и качества обработанных поверхностей.

1. Минимизация колебаний за счёт оптимальных режимов обработки

Технологическое обеспечение процесса механической обработки должно предусматривать в первую очередь выбор таких режимов резания, которые бы обеспечивали заданные требования к точности и качеству обработанных поверхностей. С другой стороны, эти режимы должны обеспечивать минимально возможные колебания в маложесткой технологической системе.

В первую очередь необходимо найти критическое значение глубины резания, определив тем самым виброустойчивость портативного станка. Используя критерий устойчивости Найквиста и запаздывание при обработке по следу, условие потери динамической системой станка устойчивости при резании будет иметь вид:

$$\operatorname{Re} \left(\frac{(W_{xx} \cdot R_{xx}^{\Sigma} + W_{xy} \cdot R_{xy}^{\Sigma} + \dots + W_{zz} \cdot R_{zz}^{\Sigma}) \cdot (1 - e^{-i\omega\tau})}{u_{\Sigma} / P} \right) \Big|_{\operatorname{Im}=0} \leq -1, \quad (1)$$

где $(W_{xx} \cdot R_{xx}^{\Sigma} + W_{xy} \cdot R_{xy}^{\Sigma} + \dots + W_{zz} \cdot R_{zz}^{\Sigma})$ – податливость эквивалентной упругой системы, приведённая к направлению изменения толщины стружки;

$W_{xx}, W_{xy}, \dots, W_{zz}$ – динамические податливости в соответствующих направлениях;

$R_{xx}^{\Sigma}, R_{xy}^{\Sigma}, \dots, R_{zz}^{\Sigma}$ – суммарные коэффициенты соответствующих направлений;

u_{Σ}/P – податливость зоны резания, приведённая к направлению изменения толщины стружки;

u_{Σ} – упругая деформация зоны резания;

P – сила резания;

$\tau = \frac{60}{nZ}$ – постоянная времени запаздывания;

n – частота вращения фрезы;

Z – число зубьев фрезы;

ω – угловая скорость.

В общем виде определить величину податливости зоны резания ($u_{\Sigma}/P = \delta_p$) можно путем вычисления ее упругой деформации u_{Σ} в направлении изменения толщины стружки от действия суммарной силы резания P . суммарная податливость зоны резания δ_p будет складываться из податливости трех составляющих – податливости режущего клина инструмента $\delta_{p.к.}$, податливости обрабатываемого материала заготовки в зоне резания δ_m и контактной податливости подвижного стыка между инструментом и заготовкой δ_k . Опуская промежуточные выкладки, получим выражение податливости зоны резания:

$$\delta_p = \frac{R}{a_{cp} \cdot b} \cdot (\delta_m^{y/a} + \delta_{p.к.}^{y/a} + \delta_k^{y/a}),$$

где R – коэффициент направления;

a_{cp} – средняя толщина срезаемого слоя, мм;

b – ширина резания, мм;

$\delta_{p.к.}^{y/a}$ – удельная податливость режущего клина инструмента,

$\delta_m^{y/a}$ – удельная податливость обрабатываемого материала заготовки в зоне резания,

$\delta_k^{y/a}$ – удельная контактная податливость подвижного стыка между инструментом и заготовкой.

Определив величину суммарной податливости зоны резания δ_p , уравнение (1) можно решить относительно ширины резания b (или глубины резания t) и найти ее критическое значение, определяющее устойчивость динамической системы станка при резании. [1]

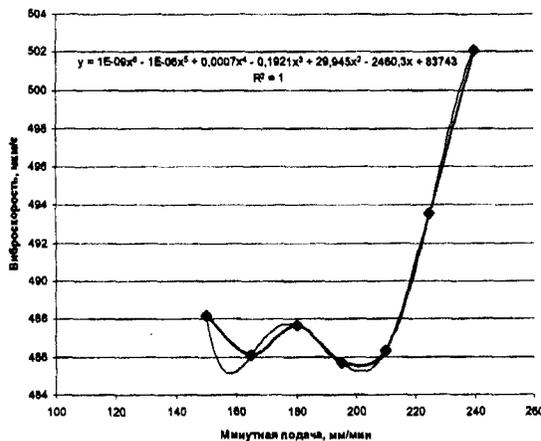


Рисунок 1 – Влияние минутной подачи на вибростороность

Далее необходимо определить значение подачи. По предварительному анализу экспериментальных данных (рис. 1) выяснили, что взаимосвязь минутной подачи и вибростороности шпинделя может быть охарактеризована следующими уравнением:

$$V = \frac{8,25}{\cos(0,05 \cdot S + 5,47)} + 25,41, \quad (2)$$

где V – виброскорость, мкм/с;

S – минутная подача, мм/мин.

Большой удельный вес постоянной в уравнении (2) можно объяснить большим влиянием на рассматриваемую зависимость вынужденных колебаний, вызванных переменными силами, возникающими в системе вне зоны резания. К этой группе относятся колебания, вызванные дефектами механизмов станка: перекосом осей, погрешностями зубчатых или клиноремennых передач, повышенными люфтами и т.п.; дисбалансом его отдельных вращающихся частей: заготовок, приспособлений, инструментов.

Задав значения глубины резания и подачи можно определить скорость резания как основной параметр лезвийной обработки, а о уровне вибраций в системе можно судить по виброскорости шпинделя станка. Для выявления взаимосвязи между ними мы провели соответствующее исследование [2].

В результате математического анализа экспериментальных данных [2] получили модель, описывающую изменение виброскорости шпинделя станка при варьировании значений скорости резания:

$$V = 0,155 \cdot v \cdot \cos(-15,2 \cdot v^{0,5} + 9,87) + 0,61 \cdot v + 324,5, \quad (3)$$

где v – скорость резания, мм/мин.

По уравнению (3) был построен график теоретической зависимости виброскорости шпинделя станка от скорости резания для процесса торцового фрезерования. Анализ полученного графика (рис. 2) позволяет определить оптимальные значения скорости резания, соответствующие минимальным предельным значениям виброскорости в заданном диапазоне.

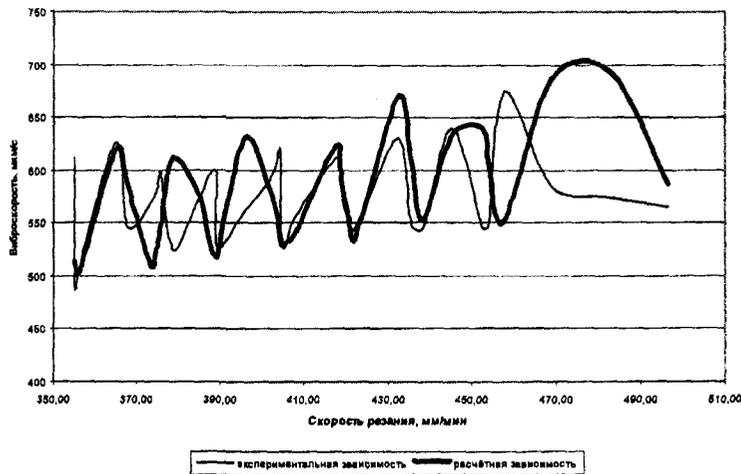


Рисунок 2 – График зависимости виброскорости от скорости резания

Таким образом, полученная математическая модель (3) позволяет определить оптимальное значение скорости резания, которой соответствует минимальное значение виброскорости, при регулировании режимов обработки в заданном диапазоне, с целью увеличения производительности или повышения качества обработанной поверхности.

2. Применение технологии высокоскоростной обработки (ВСО).

Для выявления механизма возникновения механизма колебаний в технологической системе и их оценки необходим анализ системы в динамике, поэтому, мы провели исследование [3], с целью определения характера зависимости между силой резания и виброскоростью шпинделя станка и составления её математической модели. Анализ экспериментальных данных показал, что определённым режимам резания, при которых происходит компенсация колебаний сис-

темы, соответствуют определённые диапазоны сил резания, на которых наблюдается снижение виброскорости шпинделя.

По графику рассматриваемых параметров (рис. 3) видно, что взаимосвязь между ними носит колебательный характер, следовательно можно выделить диапазоны значений силы резания при которых виброскорость будет снижаться. Исходя из математического анализа экспериментальных данных эту зависимость можно представить в виде уравнения:

$$V = 0,173 \cdot \tan(-12,45 \cdot P^{0,42} + 4,5) - 0,61 \cdot \cos(2,4 \cdot P^{0,7} + 2,71) - 0,512 \cdot P + 428,18, \quad (4)$$

где P – сила резания.

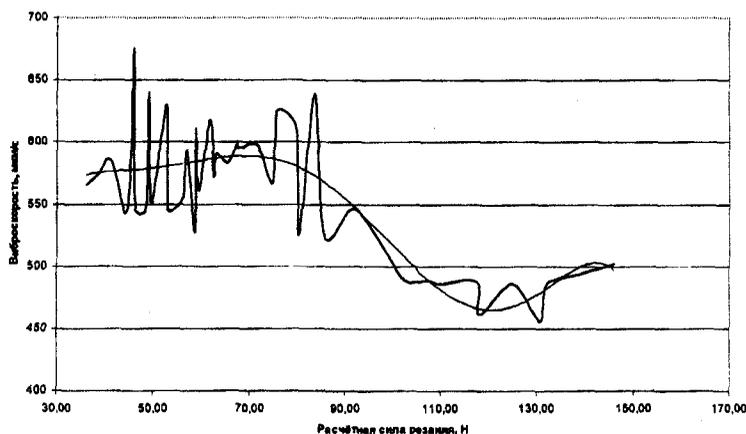


Рисунок 3 – Взаимосвязь расчётной силы резания и фактической виброскорости шпинделя станка

Анализ графической зависимости на рисунке 3 также позволяет сделать вывод об общей тенденции к снижению виброскорости при увеличении силы резания. Это означает, что увеличение сил резания до определённых значений будет способствовать снижению вибраций в системе (особенно при большой протяженности обработки), делая целесообразным применение режимов высокоскоростной обработки (ВСО). [3]

Таким образом, соотношение между силой резания и виброскоростью при фрезеровании носит колебательный характер, представляя собой сочетание двух колебательных процессов. При этом, в определённых диапазонах значений, увеличение силы резания приводит к снижению виброскорости шпинделя, наблюдается «сглаживание» колебаний системы: уменьшается их частота и амплитуда. Поэтому одним из способов снижения вибраций в технологической системе может служить применение режимов высокоскоростной обработки (ВСО).

Для практической реализации ВСО необходимо выбрать допустимые режимы резания, установить значения вибродиагностических параметров технологической системы для управления качеством обрабатываемой детали и техническим состоянием самой системы. Имеются литературные данные [4], что высокоскоростная обработка для конкретной технологической системы осуществима в очень узком диапазоне скоростей, подачи и глубин резания, который характеризуется низкими уровнями её вибраций.

В ходе математического анализа результатов проведённых исследований [4] с проверкой адекватности по критерию Фишера, получаем уравнение для расчёта и анализа виброскорости шпинделя от скорости резания и минутной подачи при торцовом фрезеровании:

$$V = 0,096 \cdot v + 9,718 \cdot S - 5,4 \cdot 10^{-5} \cdot v^2 - 0,833 \cdot S^2 - 65,658, \quad (5)$$

где v – скорость резания;

S – минутная подача.

Графически уравнение (5) можно представить в виде поверхности (рис. 4). Следует отметить, что в полученном уравнении (5) скорость резания является сложной переменной, зависимой от целого ряда постоянных и варьируемых факторов: частоты вращения шпинде-

ля, подачи, параметров инструмента (диаметр, стойкость, число зубьев, материал режущей части, углы заточки, погрешность изготовления и установки, величина износа), параметров заготовки. Дальнейшее преобразование, с подстановкой вместо скорости резания определённой зависимости, значительно усложнит уравнение (5), но сделает модель более адекватной и наглядной.

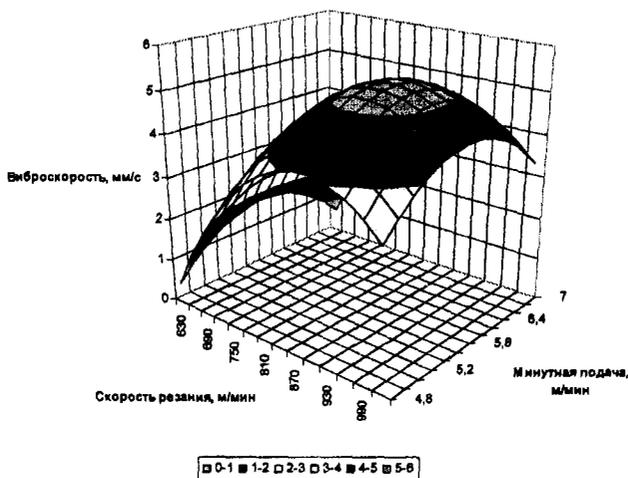


Рисунок 4 – Зависимость виброскорости шпинделя от скорости резания и подачи при высокоскоростном фрезеровании

Анализ полученной модели (5) позволяет сделать вывод, что, в определённом интервале значений скорости резания и подачи, виброскорость будет иметь пиковые значения. Соответственно за пределами этого интервала виброскорость будет снижаться при определённом соотношении скорости резания и подачи (рис. 4). Это значит, что на больших скоростях резания, при определённом значении минутной подачи, можно добиться снижения виброскорости.

3. Управление процессом резания на основе отрицательной обратной связи.

Если мы стремимся к качеству лезвийной обработки, значит, значения выходных параметров процесса должны соответствовать определённому, заданному нами, эталону, с отклонениями от него в относительно малом диапазоне. Поэтому, в качестве элемента технологии, позволяющего повысить точность обработки, можно рассматривать управление процессом резания на основе отрицательной обратной связи. Та обратная связь, которая способствует поддержанию стабильности системы, называется отрицательной обратной связью. Все технические системы, где главная функция – обеспечение стабильности некоего фактора, используют этот механизм. Задача отрицательной обратной связи состоит в том, чтобы в ответ на внешние воздействия на систему вырабатывать собственное управляющее воздействие, устраняющее последствия этих внешних воздействий. Отрицательная обратная связь делает систему более устойчивой к случайному изменению параметров резания.

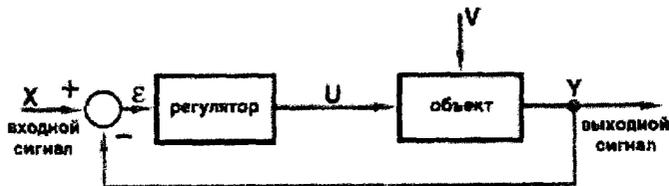


Рисунок 5 – Схема отрицательной обратной связи
 X – входной сигнал; Y – выходной сигнал; V – возмущение; ϵ – сигнал рассогласования,
 U – сигнал управления

Принцип управления, основанный на использовании отрицательной обратной связи, характеризуется тем, что не требует градуировки и сохраняет высокую точность и в тех случаях, когда нагрузка и параметры элементов системы со временем изменяют свои значения (рис. 5). В этом заключается основное достоинство систем с обратной связью.

Задача нашей работы состоит в получении требуемого качества обработанной поверхности детали, при воздействии случайных факторов обработки (неоднородность поверхностного слоя заготовки, плохое качество отдельных элементов инструмента и станочной оснастки, человеческий фактор и т.д.), за счёт варьирования режимов резания, при соответствующей системе управления. Это создаёт необходимость использования, наряду с системой управления оборудования, адаптивных систем динамического контроля различных параметров качества поверхности. В случае с фрезерованием плоских поверхностей большой площади, речь идёт о системе контроля отклонений от плоскостности и шероховатости непосредственно в процессе обработки, которая позволит своевременно реагировать на воздействие факторов обработки и избежать брака.

Для этой цели мы предлагаем использовать систему контроля на базе индуктивных бесконтактных датчиков. Датчики положения являются первичными источниками информации для систем автоматики, как на основе релейных или логических схем, так и на базе программируемых контроллеров. Именно бесконтактные датчики положения часто располагаются в зоне воздействия вибрации, пыли, воды, агрессивных жидкостей, предельных температур и электромагнитных помех, и надёжность их работы определяет надёжность всей системы управления. [5]

Система контроля интегрирована в фрезерную оправку и представляет собой комплекс бесконтактных датчиков, расположенных по окружности относительно оси инструмента (рис. 6). Инструмент с оправкой вращаются, а корпус с датчиками остается неподвижным за счёт системы подшипниковых опор и упругих элементов, что делает возможным подключить датчик к системе ЧПУ оборудования. Датчики могут измерять как расстояние до поверхности детали с высокой точностью, так и уровень вибрации непосредственно в зоне резания. При торцевом фрезеровании плоской поверхности это позволяет в режиме реального времени следить за отклонениями от плоскостности и уровнем виброскорости и в случае необходимости корректировать режимы обработки для их изменения. Такую систему можно назвать адаптивной. Она позволяет учитывать влияние труднопрогнозируемых факторов и обеспечить требуемый уровень точности при большой протяженности обработки.



Рисунок 6 – Оправка для торцевой фрезы с интегрированной системой контроля отклонений от плоскостности

Функционирование разработанной нами системы контроля, осуществляется на базе управляющей программы (УП), разработанной на основе динамической модели процесса фрезерования. Динамическая модель, заложенная в УП, определяет взаимосвязь между величиной отклонений от плоскостности и различными факторами, влияющими на технологическую систему, в частности – вибрацией. Оценка отклонений от плоскостности производится согласно рассматриваемой схеме измерения (рис. 7), по двум критериям:

1) Определяется отклонение от эталонного значения. Эталонное значение показаний датчиков l_0 задаётся, исходя из глубины резания. Далее, в одном из модулей УП определяется разность между предельными показаниями датчиков и l_0 .

$$\Delta_1 = |l_{\max} - l_0|;$$

$$\Delta_2 = |l_{\min} - l_0|.$$

Полученные значения Δ сравниваются с предельными отклонениями, заданными по чертежу. Если значения Δ больше, то УП выдаёт рекомендации по изменению параметров обработки или меняет их автоматически, взаимодействуя с САМ-системой. Для своевременного реагирования необходимо предельные отклонения по чертежу делить на два. Таким образом, определяются отклонения от плоскостности на локальном участке поверхности детали в заданный момент времени.

2) Определяется пространственное положение плоскости. Оно определяется как проекция равностороннего треугольника (по вершинам которого проходят измерения) со стороны a (рис.8) на обработанную поверхность детали. По разности в показаниях датчиков определяется угол наклона поверхности на заданном участке относительно эталонного уровня и определяется наибольшая разность в показаниях:

$$\Delta_{\text{изм}} = l_{\max} - l_{\min}.$$

Значение $\Delta_{\text{изм}}$ рассчитывается с заданным временным интервалом, по мере того, как ось инструмента смещается на определённое расстояние, относительно начала обработки (которое задаётся требованиями чертежа). Таким образом, определяется отклонение от плоскостности на заданной длине участка поверхности детали в процессе обработки с возможным прогнозом изменения отклонений по измерению углу наклона.

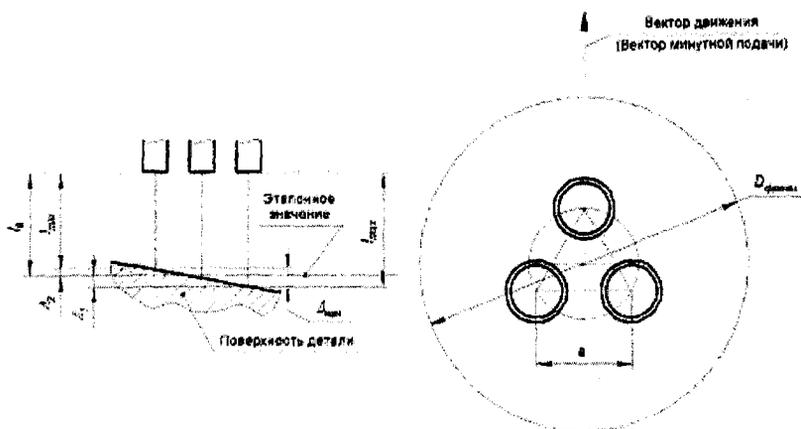


Рисунок 7 – Схема работы предлагаемой системы контроля

Наличие интегрированной системы контроля на базе бесконтактных датчиков позволит вести мониторинг, непосредственно в зоне резания, основных динамических параметров: уровня виброскорости и изменения отклонений от плоскостности, в режиме реального времени. В результате появляется возможность для автоматизации ряда технологических операций: изменение сложной траектории инструмента, вспомогательные ходы, операции контроля, а также улучшается качество обработанной поверхности.

ВЫВОДЫ

1. Представленная методика позволяет рассчитать режимы резания при которых колебания в системе будут минимальными и количественно оценить её виброустойчивость.

2. Применение режимов высокоскоростного фрезерования, в определённых диапазонах, позволяет снизить виброскорость шпинделя, повысив точность обработки при относительно высокой производительности.

3. Отрицательная обратная связь делает технологическую систему более устойчивой к случайному изменению параметров резания.

4. Разработанная система контроля качества поверхности при фрезеровании позволит:

- повысить производительность обработки на 7-10 % за счёт снижения времени холостых ходов в результате автоматической коррекции режимов резания и контроля выходных параметров обработки с высокой точностью в режиме реального времени;

- повысить качество обрабатываемой поверхности за счёт контроля уровня вибрации в режиме реального времени и коррекции режимов обработки при его изменении;

- использовать в системе управления металлорежущего оборудования, управляющие программы на базе динамических моделей, за счёт создания отрицательной обратной связи, посредством системы динамического контроля, что делает возможным линеаризацию нелинейных уравнений, описывающих динамику технологической системы;

- повысить срок службы инструмента.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилин, Ю.В. Методика расчета виброустойчивости станков / Ю.В. Кирилин // СТИН. – 2005. – №1. – С. 3 – 6.

2. Кирющенко, Е. В. Взаимосвязь скорости резания и виброскорости шпинделя при фрезеровании // Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения: сборник научных трудов / гл. ред. А. Н. Емельюшин; отв. ред. А. А. Веселовский. – Орск: Издательство Орского гуманитарно-технического института (филиала) ОГУ, 2012. – С. 87 – 90.

3. Козлов, А.М. Динамический анализ технологической системы при фрезеровании плоских поверхностей крупногабаритных деталей / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко // Современные технологии в горном машиностроении: сборник науч. трудов семинара. – М.: МГТУ. – 2012. – С. 417 – 424.

4. Козлов, А.М. Зависимость параметра виброскорости от прогнозируемых факторов процесса торцового фрезерования / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко // Современные проблемы машиностроения: труды VI Международной научно-технической конференции / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета – 2011. – С. 266 – 271.

5. Козлов, А.М. Система динамического контроля отклонений от плоскостности при торцовом фрезеровании / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко // Машиностроение – традиции и инновации: материалы всероссийской научно-образовательной конференции (МТИ-2011). Сборник докладов. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2011. – С. 123 – 126.

Козлов Александр Михайлович

ФГОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»

доктор технических наук, профессор

Тел: (4742) 328186

E-mail: kam-48@yandex.ru.

Кирющенко Евгений Владимирович

ФГОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»

аспирант

Тел: (4742) 328186

E-mail: ironfalcon@mail.ru.

A.M. KOZLOV, E.V. KIRYUSHCHENKO

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF LARGE-SIZED DETAILS MILLING ACCURACY

The paper considers the methods of a technological system stability increasing to enhance the accuracy milling processing of large-sized details, on basis of technological systems dynamics modeling and drawing up of mathematical models for determination of optimum cutting modes.

Keywords: large-size detail, milling, cutting modes, vibration, feedback.

BIBLIOGRAPHY

1. Kirilin, Ju.V. Metodika rascheta vibroustojchivosti stankov / Ju.V. Kirilin // STIN. – 2005. – №1. – S. 3 – 6.
2. Kirjuwenko, E. V. Vzaimosvjaz' skorosti rezanija i vibroskorosti shpindelja pri frezerovanii // Innovacionnye tehnologii v mashinostroenii: problemy, zadachi, reshenija: sbornik nauchnyh trudov / gl. red. A. N. Emeljushin; otv. red. A. A. Veselovskij. – Orsk: Izdatel'stvo Orskogo gumanitarno-tehnicheskogo insti-tuta (filiala) OGU, 2012. – S. 87 – 90.
3. Kozlov, A.M. Dinamicheskij analiz tehnologicheskoy sistemy pri frezerovanii ploskih poverhno-stej krupno-gabaritnyh detalej / A.M. Kozlov, E.V. Kirjuwenko // Sovremennye tehnologii v gornom mashino-stroenii: sbornik nauch. trudov seminar. – M.: MGGU. – 2012. – S. 417 – 424.
4. Kozlov, A.M. Zavisimost' parametra vibroskorosti ot prognoziruemyh faktorov processa torcovogo frezerovaniya / A.M. Kozlov, E.V. Kirjuwenko // Sovremennye problemy mashinostroenija: trudy VI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii / Tomskij politehnicheskij universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta – 2011. – S. 266 – 271.
5. Kozlov, A.M. Sistema dinamicheskogo kontrolja otklonenij ot ploskostnosti pri torcovom freze-rovanii / A.M. Kozlov, E.V. Kirjuwenko // Mashinostroenie – tradicii i innovacii: materialy vsrossijskoy nauchno-obrazovatel'noj konferencii (MTI-2011). Sbornik dokladov. – M.: MG TU «STANKIN», 2011. – S. 123 – 126.

Kozlov Alexander Mikhailovich
Lipetsk state technical university
doctor of technical sciences, professor
Phone: +7(4742) 328186
E-mail: kam-48@yandex.ru.

Kiryuschenko Evgeniy Vladimirovich
Lipetsk state technical university
post graduate
Phone: +7(4742) 328186
E-mail: ironfalcon@mail.ru.

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТЕХНОЛОГИЯМ ВИБРОУДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

В статье рассматриваются вопросы формирования нормативных требований к технологическим процессам виброударного упрочнения деталей авиационного и ракетного производства, которые изготавливаются с максимальным ограничением по массе и минимально допустимым запасом прочности. Нормативные требования к технологиям виброударного упрочнения являются основой для расчета и проектирования виброупрочняющих станков и оборудования. Признано, что основным, но не исчерпывающим требованием к технологиям виброударного упрочнения является оперативное управление и контроль процесса.

Ключевые слова: виброударное упрочнение, нормативные требования, управление и контроль.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении для финишной обработки деталей сложной формы применяются технологические процессы виброударного упрочнения. Особенностью этих технологий является отсутствие кинематических связей среды – инструмента с деталью и станком. Процессы виброударного упрочнения деталей сложной формы применяют в машиностроении с 1970-х годов. В это время были выявлены технологические возможности виброударного упрочнения; доказано их положительное влияние на эксплуатационные свойства изделий. По виброударному упрочнению накоплен большой, но недостаточно обобщенный и систематизированный экспериментальный материал, выполнены серьезные теоретические разработки, которые служат базой для создания рационального технологического процесса виброупрочнения деталей. Однако, актуальность проблемы обеспечения качества поверхностного слоя с учетом эксплуатационных нагрузок за последние годы не только не уменьшалась, но еще более возросла. Был разработан метод теоретического трехмерного формирования параметров качества поверхностного слоя при виброударном упрочнении деталей с закреплением, для конечного множества ее участков с указанием координат расположения проблемных недостаточно упрочненных участков [1]. Экспериментально подтверждена достоверность метода теоретического определения формирования остаточных напряжений на основе сплайнового моделирования упрочнения поверхностного слоя детали [2]. Дальнейшее совершенствование, развитие и систематизация такого подхода к проектированию технологического процесса виброударного упрочнения невозможно без четко определенных требований к технологии. В связи с этим формирование технологических требований к процессам виброударного упрочнения является актуальной задачей.

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

К деталям авиационного производства, изготавливаемых при максимальном ограничении массы и минимальным запасом прочности, работающих при интенсивных нагрузках, предъявляются повышенные требования к усталостной прочности и надежности. В 25–50 % всех случаев отказов основными причинами являются несовершенство технологических процессов, низкая технологическая дисциплина, неэффективный контроль, недостаточная стабильность и надежность технологических процессов [1]. Особая роль в обеспечении технологической надежности авиационных деталей принадлежит технологиям виброударного упрочнения, так как именно они обеспечивают усталостную прочность, ресурс и надежность при соблюдении указанных ограничений [2]. Для деталей, имеющих сложную форму, в большинстве случаев с недоступным расположением поверхностей для закрепленных лезвийных и абразивных инструментов, виброабразивная обработка и виброударное упрочнение, является единственным эффективным методом упрочнения. В зарубежном авиационном

производстве большее применение находит пневмодинамический наклеп с программным управлением. Это объясняется более ранним и успешным развитием робототехники за рубежом, которая использовалась для программного управления перемещениями сопла вдоль стрингерного набора панелей. В настоящее время технологии виброобразивного и виброударного упрочнения не отвечают современным требованиям производства и технологической надежности, главным образом из-за неуправляемости и бесконтрольности процесса.

При конструировании изделий и проектировании технологий их изготовления формируются требования к критическим параметрам деталей, обеспечивающих с требуемой вероятностью допустимые эксплуатационные показатели изделий; при производстве предпринимаются меры для их реального выполнения; при эксплуатации осуществляется реализация технологической надежности [2]. Отработка на технологическую надежность может выполняться параллельно с отработкой на технологичность деталей, которая предусматривает оценку выполнимости требований конструкторской документации и достижение оптимальных затрат на изготовление.

Основным затруднением в определении показателей технологической надежности является высокая трудоемкость натурных испытаний в течении длительного времени, в то время как информация о надежности необходима уже на этапе конструирования изделия и проектирования технологий. В мировой практике машиностроения для отработки и обеспечения технологической надежности изделий авиационной техники используются различные методы компьютерного моделирования рабочих, технологических и эксплуатационных процессов, с последующей экспериментальной проверкой [2].

Целью любого производственного технологического процесса является получение изделий, полностью соответствующих требованиям и показателям качества. Однако в условиях реально действующего производства чрезвычайно сложно, а зачастую и невозможно обеспечить стопроцентный выход годных изделий по всем показателям качества. При этом в силу формирования показателей качества на различных этапах производства изделий вероятность выхода несоответствующей продукции по каждому из них будет разной. Следует также отметить, что из-за своего многообразия показатели качества производимой продукции могут обладать различной значимостью (весомостью) для потребителей. В связи с этим и способности технологического процесса по обеспечению требуемых значений разных показателей качества продукции приобретают различную весомость. Возникает задача оценки технологического процесса не только с точки зрения возможности производить изделия с показателями качества требуемого уровня, но и с учетом их весомости. Данную задачу можно определить как оценку состояния технологического процесса с точки зрения его способности обеспечить выпуск годных изделий по различным показателям их качества.

Основной целью в области качества для предприятий авиастроения является создание надежных и безопасных изделий, гарантированного соответствия их параметров и характеристик действующей нормативной документации и требованиям потребителей. Для реализации этой цели решаются следующие задачи: внедрение конструктивных и технологических мероприятий по совершенствованию авиационной техники; создание новых типов изделий авиатехники и другой продукции для удовлетворения потребителей; поддержание стабильности производства для обеспечения высокого уровня качества, надежности и безопасности изделий; создание и обеспечение соответствия системы менеджмента качества предприятия, установленным требованиям.

Согласно Федеральному закону «О техническом регулировании» государство отвечает за безопасность продукции и процессов [1]. При этом техническое регулирование рассматривается как правовое управление в области установления и применения обязательных и добровольных требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации.

Требования к технологическим (производственным) способам обеспечения надежности (ГОСТ 27.003-90) должны содержать: требования к точностным параметрам технологического оборудования и его аттестации; требования к стабильности технологических процес-

сов, свойствам сырья, материалов, комплектующим изделиям; требования к необходимости, длительности и режимам технологического прогона изделий в процессе изготовления; требования к способам и средствам контроля уровня надежности (дефектности) в ходе производства.

В практике машиностроения принято считать, что стабильность технологического процесса по критерию шероховатости считается низкой, если коэффициент $\eta < 1$ не превышает 1,0, а процент выхода параметра за пределы допуска превышает $k_{\text{вых}} > 0,27\%$. Если $1,0 < \eta \leq 1,33$, $k_{\text{вых}} = 0,006 - 0,27\%$, то стабильность считается удовлетворительной. Если $\eta_{\text{вых}} > 1,33$, $k < 0,006\%$, то стабильность технологического процесса – хорошая [1].

Экспериментальные исследования показывают, что при виброабразивной обработке и виброударном упрочнении с жестким закреплением детали стабильность процесса недопустимо низкая: $\eta < 1$, $k_{\text{вых}} > 0,27\%$ [2]. Для повышения стабильности необходимо вращать деталь, либо обеспечить смену траектории ее колебаний. Увеличение амплитуды скорости экструзии снижает высотные параметры шероховатости, повышает стабильность процесса ее формирования.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРОУДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Технологические возможности процесса виброударного упрочнения характеризуются предельно достижимыми значениями технологических параметров поверхностного слоя за цикл обработки. Из-за ограниченности скоростных возможностей процесс виброударного упрочнения реализуется обычно при исходной шероховатости не более $Rz\ 10-20$ мкм. При более значительной шероховатости впадины микронеровностей обрабатываются посредством виброабразивной обработки.

При виброударном упрочнении деталей с закреплением из стали 30ХГСНА в среде свободно вибрирующих стальных шариков диаметром 0,5 см в жидкости с амплитудой виброперемещений 0,5 см по круговой траектории с угловой частотой $140\ \text{с}^{-1}$ в течение 60 мин обеспечиваются в среднем следующие технологические результаты [2]. Параметр шероховатости снижается с $Ra\ 2,5-5,0$ мкм до $Ra\ 1-2$ мкм. Средний шаг микронеровностей S_m уменьшается с $0,4-0,15$ мм до $0,1-0,05$ мм. Относительная несущая длина профиля микронеровностей, измеренная на половине Rz_{max} , возрастает с $t_{0,5} = 0,4-0,45$ до $t_{0,5} = 0,6-0,8$. Радиус выступов микронеровностей возрастает в 25-200 раз. Структура неровностей приобретает ненаправленный характер.

Сжимающие остаточные напряжения первого рода при указанных ранее режимах виброударного упрочнения достигают следующих величин [2]: в сталях 30ХГНА 600-750 МПа, в титановых сплавах ОТ-4 ВТ-1 200-400 МПа, в алюминиевых высокопрочных сплавах Д16Т, В95 150-250 МПа. Глубина формирования остаточных сжимающих напряжений первого рода составляет 200-350 мкм и более. Эпюра распределения остаточных напряжений имеет характерный подслоный максимум на глубине 10-50 мкм. Это выгодно отличает метод виброударного упрочнения от других методов поверхностно-пластической деформации. С увеличением диаметра шариков и сохранением виброскорости колебаний значение остаточных напряжений возрастает. Повышение амплитуды виброперемещений увеличивает значение остаточных напряжений и смещает подслоный максимум к поверхности. Величина наклепа составляет: для стали 30ХГСНА 5-10 %, для титановых сплавов 3-5 %, для высокопрочных алюминиевых сплавов 2-3 %.

Виброударное упрочнение обеспечивает повышение усталостной и контактной прочности, коррозионной стойкости деталей. Так, например, малоцикловая усталостная долговечность гладких цилиндрических образцов в результате их виброударного упрочнения повышается: для сталей типа 30ХГСНА, 07Х16, ВКС210 при $\sigma_0 = 136\ \text{кг/мм}^2$.

повышается до двух - трех раз; для сталей ВНС2, ВНС5 при $\sigma_0 = 100 \text{ кг/мм}^2$ - до 5 раз; для алюминиевых сплавов АК6, АК8 - в 1,5-2,0 раза [1].

Усталостная прочность виброударно-упрочненных образцов повышается: для 30ХГСНА - до 30-50 %; для АВТ-1 ВТ-8 - на 20-25 %; для Д16Т В95 после химических покрытий типа оксидирования до 2-3 раз. Коррозионная прочность упрочненных образцов, испытанных под нагрузкой $0,8\sigma_r$, повышается в несколько раз. Коррозионно-усталостная прочность в результате виброударного упрочнения повышается: для алюминиевых сплавов в воздухе в 3,5 раза, а в 3-процентном растворе NaCl в 2 раза[2].

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ к технологиям виброударного упрочнения. Возможности технологий виброударного упрочнения в настоящее время используются не полностью, масштабы их применения неоправданно малы. Это обусловлено рядом причин. Отсутствием надежного серийно выпускаемого оборудования с системами контроля и управления; слабой управляемостью и низким уровнем контроля технологических процессов при отсутствии кинематической связи между инструментальной средой, деталью и станком; недостаточной точностью методов проектирования технологических процессов; отсутствием надежных методов расчета и конструирования оборудования.

Основой для более эффективного применения технологий виброударного упрочнения и преодоления указанных трудностей являются системные теоретические исследования динамики процессов и формирования технологических параметров поверхностного слоя методами компьютерного сплайнового моделирования с последующей экспериментальной проверкой их адекватности. Другим важным аспектом является создание виброупрочняющего оборудования с системами программного управления и автоматизированного контроля процессом.

Особенно важным является формирование нормативных требований к технологиям виброударного упрочнения в авиационной и ракетных производствах машиностроения, где продукция проходит жесткую систему контроля и сертификации. Основой при разработке требований к технологическому процессу являются технологические возможности виброударного упрочнения.

Виброударное упрочнение является финишной упрочняющей операцией. Инструментальное воздействие производится на поверхностный слой материала, поэтому требования по точности размеров, формы, взаимного расположения поверхностей обеспечиваются на предыдущих операциях.

Технические требования к технологическим процессам виброударного упрочнения и допуски обуславливаются служебным назначением детали и сводятся к следующему.

1. Из-за ограниченных скоростных возможностей виброударное упрочнение следует выполнять при удаленном дефектном слое и исходном среднеарифметическом отклонении профиля микронеровностей не более Ra 2,5мкм с допуском не более 25-35 %.

2. Сжимающие остаточные напряжения первого рода формируются в пределах 250-650 МПа с допуском не более 10-15 %, с проверкой по критерию коробления детали.

3. Степень наклепа формируется в пределах от 7 до 15% с допуском 15-20 %.

4. Амплитуды скорости колебаний детали составляет: при виброабразивной обработке 0,6-0,8 м/с; при виброударном упрочнении 0,85-1,20м/с. Большие значения амплитуд скоростей соответствуют более высокой прочности материала детали.

5. Не допускается приостановка циркуляционных и виброударных перемещений частиц вибрирующей инструментальной среды в любом ее локальном объеме, тем более в пограничных слоях ее у поверхностей детали и контейнера.

6. Для снижения погрешностей, повышения стабильности и надежности процессов виброударного упрочнения необходимо изменять положение упрочняемых поверхностей детали относительно импульсно-силового поля периодических соударений детали с инструментальной средой через промежутки времени не более 5-7 мин. Постоянная и

равномерная смена относительного положения детали обеспечивает минимальную погрешность и максимальную стабильность.

7. Для повышения качества и производительности процессов виброударного упрочнения деталей применяется регулирование динамического разрыхления рабочей среды за счет поджатия вибрирующей инструментальной среды из расчета $\Pi \cong 0,03 \div 0,05 (A\omega^2/g)$, погрешности по всем динамическим и технологическим параметрам снижаются

ВЫВОДЫ. Технологический процесс виброударного упрочнения представляет собой сложную систему, совокупность свойств которой определяет пригодность ее для обеспечения высоких показателей эффективности производства. Соответствие конкретного технологического процесса современным требованиям по совершенствованию техники и технологии, повышению эффективности производства и качеству продукции определяется аттестацией его уровня. В основу аттестации технологии заложены параметры, которые регламентируются положениями Единой системы технологической подготовки производства и обеспечивают высокое качество и стабильность параметров изготавливаемых деталей.

Технологии виброударного упрочнения деталей сложной формы должны обладать высокой стабильностью и отвечать высоким эксплуатационным требованиям, а также минимальным затратам средств и времени. Для грамотного решения перечисленных задач, необходимо несколько составляющих: использование передовых методов разработки технологий виброударного упрочнения и оборудования на основе строго регламентируемых требований и критериев аттестации технологического процесса, а также компьютерных методов сплайнового моделирования, так как методы осредненной оценки качества дают недопустимо большие погрешности. Необходимо формировать параметры поверхностного слоя в соответствии с действиями эксплуатационными нагрузками, обеспечить достоверное прогнозирование повышения усталостной прочности за счет численного обоснования конструктивных и технологических параметров.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов, Ю.Р. Виброударное упрочнение [Текст]. / Ю.Р. Копылов // Воронеж: Изд.-во ВГУМВД. – 1999. – 386 с.
2. Копылов, Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения [Текст]. / Ю.Р. Копылов // Воронеж: Научная книга. – 2011. – 569 с.
3. Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов. Р 50-601-20-91 (оборудования). Москва 1991. 76 с.
4. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение. 1993. 304 с.

Копылов Юрий Романович

ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»

доктор технических наук, профессор

Тел: 8-4732-70-27-20

E-mail: urkopulov@mail.ru

Гордиенко Екатерина Петровна

ФГОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения»

Кандидат технических наук, доцент,

Тел: 8-905-658-38-94

E-mail: life9643@yandex.ru

FORMATION OF DEMANDS ON VIBRO-IMPACT HARDENING AIRCRAFT PARTS

The article deals with questions of the formation of regulatory requirements for production processes vibroshock hardening of parts of aircraft and missile industries, which are made with a maximum limit on the mass and the minimum acceptable margin of safety. Statutory requirements for technologies vibroshock hardening are the basis for calculation and design vibrouprochnyayuschih machines. It is recognized that a major, but not limited to the requirement to technology vibroshock hardening are the operational management and control process.

Keywords: vibro-impact hardening, regulations, management and control

BIBLIOGRAPHY

1. Kopylov, Ju.R. Vibroudarnoe uprochnenie [Tekst]. / Ju.R. Kopylov // Voronezh: Izd.-vo VGUMVD. – 1999. – 386 s.
2. Kopylov, Ju.R. Dinamika processov vibroudarnogo uprochneniya [Tekst]. / Ju.R. Kopylov // Voronezh: Nauchnaja kniga. – 2011. – 569 s.
3. Rekomendacii po ocenke tochnosti i stabil'nosti tehnologicheskikh processov. R 50-601-20-91 (oborudovaniya). Moskva 1991. 76 s.
4. Kuznecov N.D., Cejtlin V.I., Volkov V.I. Tehnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti detalej mashin: Spravochnik. M.: Mashinostroenie. 1993. 304 s.

Kopylov Yuri Romanovich

GOU VPO «Voronezh State Technical University».

Doctor of Technical Sciences,

Tel: 8-4732-70-27-20

E-mail: urkopulov@mail.ru

Gordlenko Ekaterina Petrovna

FSEIHPE "Moscow State University of Posts»

Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor,

Phone: 8-905-658-38-94

E-mail: life9643@yandex.ru

УДК 621.923

С.В. НОСЕНКО, Ю.Н. ПОЛЯНЧИКОВ, В.А. НОСЕНКО, Л.Л. КРЕМЕНЕЦКИЙ

НАРАБОТКА И РЕЖУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ НА ПЕРЕХОДНОМ ЭТАПЕ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ КРУГОМ ПРЯМОГО ПРОФИЛЯ

Представлены математические модели наработки, режущей и мгновенной режущей способностей процесса глубинного шлифования плоских цилиндрических поверхностей кругом прямого профиля на переходном этапе добора глубины. Показаны закономерности изменения показателей за период шлифования на этапе заготовок различной длины. Определены максимальные значения показателей.

Ключевые слова: глубинное шлифование, наработка, режущая способность, математические модели, длина заготовки, этапы шлифования.

Глубинное шлифование (ГШ) относится к числу наиболее эффективных процессов абразивной обработки, обеспечивающих высокое качество изделия при высокой производительности процесса.

Одно из основных отличий ГШ от обычного маятникового заключается в большой длине дуги контакта.

Большая длина дуги контакта предполагает наличие этапа врезания, равного ему по длине шлифования этапа выхода и этапа постоянной длины дуги контакта. Длина этапов ГШ плоской горизонтальной поверхности кругом цилиндрического профиля зависит от глубины шлифования t , радиуса круга R и длины l обрабатываемой поверхности. При $l < b = \sqrt{t(2R - t)}$ появляется переходный этап добора глубины [1].

Учитывая, что длина обрабатываемой поверхности заготовок достаточно часто бывает меньше b , представляет научный и практический интерес исследование особенностей ГШ на данном этапе.

Одними из основных показателей процесса шлифования являются наработка и режущая способность [2]. К числу определяющих показателей относится и мгновенная режущая способность, представляющая собой производную от наработки, например, объёмной V по времени τ : $q = dV/d\tau$ [3].

В связи с чем, целью работы является вывод математических моделей наработки, режущей и мгновенной режущей способностей глубинного шлифования для переходного этапа добора глубины и исследование закономерности их изменения с учётом длины обрабатываемой поверхности.

Рассмотрим процесс плоского глубинного попутного шлифования кругом прямого профиля на этапе добора глубины (рис. 1). Поскольку для вычисления q необходимо знание наработки V , решение задачи начнём с математической модели наработки.

Будем считать, что рабочая поверхность шлифовального круга представляет собой цилиндр радиуса R , торцовые поверхности которого перпендикулярны оси цилиндра, H – высота круга. Заготовку примем в форме прямоугольного параллелепипеда, где l и h – соответственно длина и ширина заготовки. Примем, что $h > H$.

Расположим систему координат в центре шлифовального круга, направив ось X по оси инструмента. Обрабатываемую поверхность заготовки ориентируем строго горизонтально, боковые и торцовые поверхности параллельно соответственно плоскостям YOZ и XOY .

Объёмную номинальную наработку (далее – наработка) будем определять как объём, отсекаемый в теле круга тремя плоскостями: горизонтальной плоскостью или обрабатываемой поверхностью; вертикальной плоскостью, в которой лежит торец заготовки; второй вертикальной плоскостью, в которой находится боковая сторона заготовки.

При выводе формулы наработки примем следующие начальные условия: поверхности заготовки шлифовального круга считаем идеально гладкими; скорость подачи стола v_s и скорость шлифования v постоянны; размеры круга за время шлифования не изменяются. Учитывая, что рабочая поверхность абразивного инструмента представляет собой цилиндр, показатели будем рассматривать приведёнными к единице высоты круга.

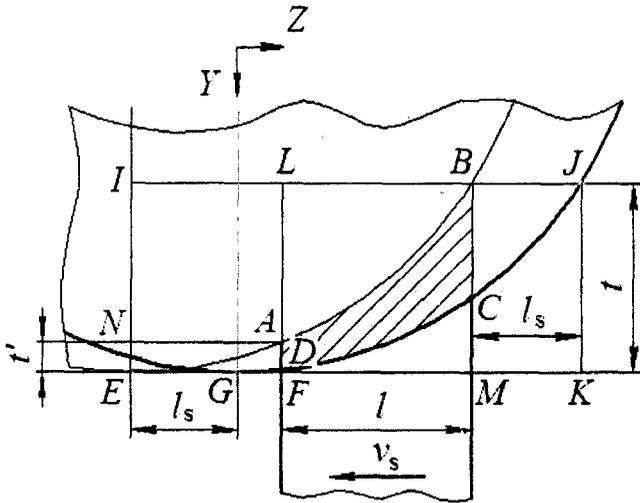


Рисунок 1 – Схема попутного ГШ на этапе добора глубины

На этапе добора глубины в проекции на плоскость YOZ (см. рис. 1) при шлифовании заготовки $DLBM$ приведённая наработка за время τ определяется площадью фигуры $ABCD$, которую выразим в виде разности площадей:

$$ABCD = EBCG - EADG.$$

Фигуры $EBCG$ и $EADG$ представляют собой приведенные к единице ширине шлифовального круга наработки на этапе выхода при удалении материала, имеющего в продольном сечении соответственно форму прямоугольника $EIBM$ и $ENAF$. Тогда

$$V_{bn} = V_{bv}(\tau, t) - V_{bv}(\tau, t') = v_s \tau (t - t') - [V_{bp}(\tau, t) - V_{bp}(\tau, t')]. \quad (1)$$

где $t' = R - \sqrt{R^2 - (b-l)^2}$ и $V_{bp}(\tau, t')$ – соответственно глубина и приведенная наработка на этапе врезания при удалении припуска в виде прямоугольника $ENAF$. Приведенную наработку на этапе добора глубины можно найти из разности площадей:

$$V_{bn} = ABCD = LJD - LBA - BJC.$$

Площади LJD , LBA и BJC представляют собой приведенные наработки на этапе врезания за время соответственно $\tau' + \tau$, τ' и τ , где $\tau' = l/v_s$, тогда

$$V_{bd} = V_{bp}(\tau' + \tau) - [V_{bp}(\tau') + V_{bp}(\tau)]. \quad (2)$$

Используя зависимости (1) и (2), с учетом формулы наработки на этапе врезания [4] после преобразований получена математическая модель приведенной наработки на этапе добора глубины:

$$\begin{aligned} V_{bd} = & \frac{1}{2} \left((b-l) \sqrt{R^2 - (b-l)^2} + R^2 \arcsin \frac{b-l}{R} - b(R-t) - R^2 \arcsin \frac{b}{R} \right) + \\ & + \frac{1}{2} \left((b-v_s \tau) \sqrt{R^2 - (b-v_s \tau)^2} + R^2 \arcsin \frac{b-v_s \tau}{R} \right) \\ & - \frac{1}{2} \left((b-l-v_s \tau) \sqrt{R^2 - (b-l-v_s \tau)^2} + R^2 \arcsin \frac{b-l-v_s \tau}{R} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Протяжённость этапа добора глубины

$$l_{s \max} = b-l. \quad (5)$$

При l_{\max} наработка достигает максимальной величины, значение которой получаем подстановкой в (4) $v_s \tau = b-l$ из (5):

$$V_{\text{вд}} = \frac{1}{2} \left((b-l) \sqrt{R^2 - (b-l)^2} + l \sqrt{R^2 - l^2} - b \sqrt{R^2 - b^2} \right) + \frac{R^2}{2} \left(\arcsin \frac{b-l}{R} + \arcsin \frac{l}{R} - \arcsin \frac{b}{R} \right) \quad (6)$$

Приведённую режущую способность находим делением наработки (4) или (6) на время, за которое данный объём материала был удалён. Приведённую мгновенную режущую способность на этапе получаем дифференцированием (4) по времени:

$$q_{\text{вд}} = v_s \left[\sqrt{R^2 - (b-l-v_s \tau)^2} - \sqrt{R^2 - (b-l)^2} \right] \quad (7)$$

В работах [3, 5] показано, что изменение составляющих силы ГШ согласуются с изменением показателя мгновенной режущей способности. Используя математические модели мгновенной режущей способности на этапах врезания, постоянной длины дуги контакта, выхода [3, 4] и переходного этапа добора глубины (7) можно прогнозировать закономерности изменения силы резания при ГШ на всех этапах обработки.

С использованием полученных моделей исследовано влияние длины обрабатываемой поверхности l на закономерность изменения показателей безотказности этапа добора глубины. Исходные данные: глубина шлифования $t=3$ мм, скорость подачи стола $v_s=50$ мм/мин, радиус круга $R=234$ мм, длина обрабатываемой поверхности 2, 6, 12, 15, 18, 22 и 30 мм.

Закономерности изменения приведённых значений наработки, режущей и мгновенной режущей способностей от времени шлифования показаны на рисунке 2.

Из (5) следует, что протяженность этапа добора глубины линейно возрастает с уменьшением длины обрабатываемой поверхности заготовки, соответственно возрастает и время шлифования. Зависимость $V_{\text{вд}}$ от времени шлифования τ в общем случае можно выразить полиномом второй степени без свободного члена:

$$V_{\text{вд}} = a\tau^2 + b\tau, \quad (8)$$

где a, b – постоянные коэффициенты, значения которых приведены в таблице 1.

С увеличением l увеличиваются темпы роста $V_{\text{вд}}$, но максимальная наработка на этапе $V_{\text{вдmax}}$ в зависимости от l имеет экстремум. Согласно рисунку 2а, с увеличением l максимальная наработка на этапе вначале возрастает, затем снижается. Зависимость $V_{\text{вдmax}}$ от τ_{max} или длины обрабатываемой поверхности можно с коэффициентом корреляции близким к единице описать неполным полиномом второй степени:

$$V_{\text{вдmax}} = -0,0557\tau_{\text{max}}^2 + 2,50\tau_{\text{max}}. \quad (9)$$

Экстремум функции (9) найдём, приравняв к нулю её первую производную:

$$-0,1114\tau_{\text{max}} + 2,50 = 0.$$

Откуда $\tau_{\text{max}} \sim 22,4$ мм.

Закономерности изменения режущей $Q_{\text{вд}}$ и мгновенной режущей $q_{\text{вд}}$ способностей от τ (рис. 2б, в) подчиняются линейной зависимости

$$Y_{\text{вд}} = b\tau + c, \quad (10)$$

где b, c – постоянные коэффициенты (см. табл. 1)

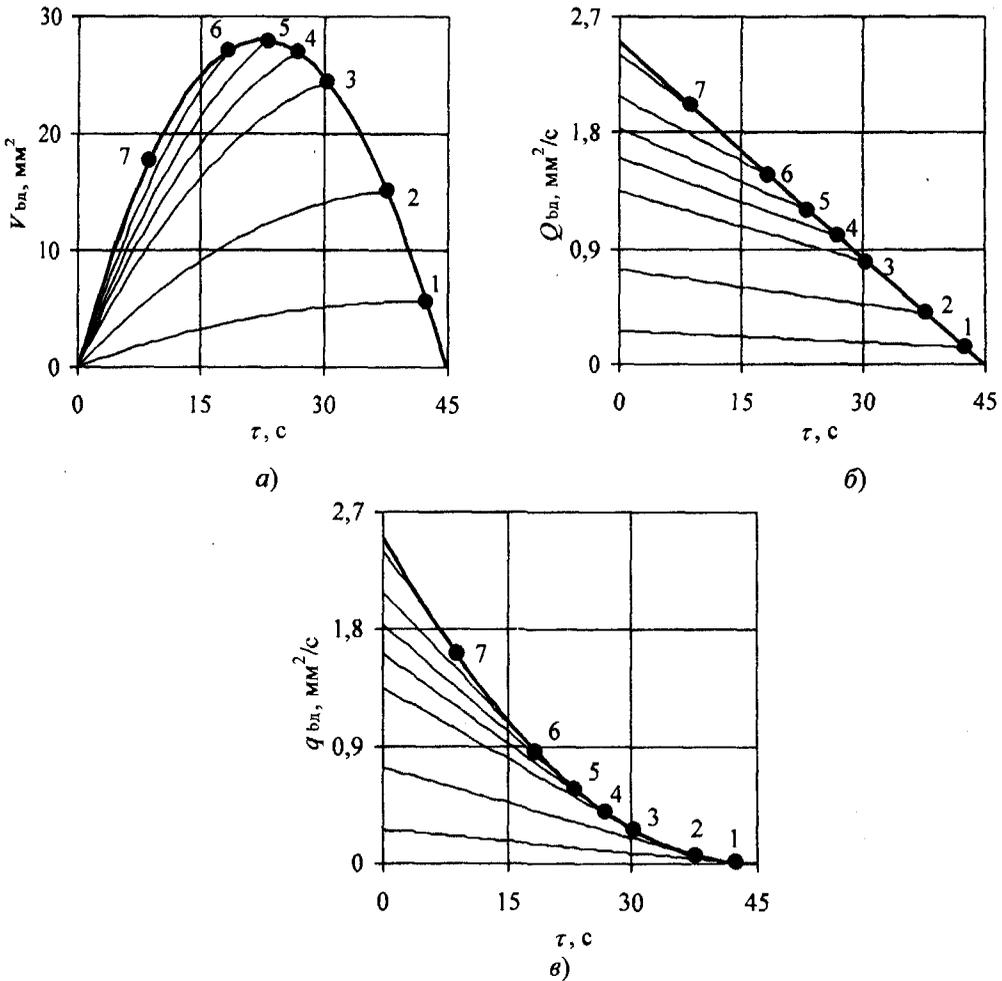


Рисунок 2 – Изменение наработки $V_{бд}$, режущей $Q_{бд}$ и мгновенной режущей $q_{бд}$ способностей от времени шлифования τ заготовок с различной длиной обрабатываемой поверхности l
 1 – 2 мм; 2 – 6 мм; 3 – 12 мм; 4 – 15 мм; 5 – 18 мм; 6 – 22 мм; 7 – 30 мм

Таблица 1 – Постоянные коэффициенты зависимостей (8), (10) и (11) при различной длине обрабатываемой поверхности l

| $l, \text{ мм}$ | $V_{бд}$ | | $Q_{бд}$ | | $q_{бд}$ | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|----------------------------|--|--|----------------------------|
| | $a, \text{ мм}^2/\text{мм}^2$ | $b, \text{ мм}^2/\text{мм}$ | $b, \text{ мм}^2/\text{с}\cdot\text{мм}$ | $c, \text{ мм}^2/\text{с}$ | $a, \text{ мм}^2/\text{с}\cdot\text{мм}^2$ | $b, \text{ мм}^2/\text{с}\cdot\text{мм}$ | $c, \text{ мм}^2/\text{с}$ |
| 2 | -0,00301 | 0,261 | -0,00302 | 0,262 | 0 | -0,00601 | 0,261 |
| 6 | -0,00902 | 0,741 | -0,00906 | 0,742 | 0 | -0,0180 | 0,740 |
| 12 | -0,0180 | 1,35 | -0,0181 | 1,35 | 0 | -0,0360 | 1,35 |
| 15 | -0,0225 | 1,61 | -0,0226 | 1,61 | 0 | -0,0451 | 1,61 |
| 18 | -0,0271 | 1,83 | -0,0271 | 1,83 | 0 | -0,0541 | 1,83 |
| 22 | -0,0331 | 2,08 | -0,0331 | 2,08 | 0 | -0,0661 | 2,08 |
| 30 | -0,0451 | 2,40 | -0,0452 | 2,40 | 0 | -0,0902 | 2,40 |
| $V_{бд\text{max}}$ | -0,0557 | 2,50 | -0,0558 | 2,50 | 0,00125 | -0,112 | 2,50 |

Максимальные значения показателей режущей способности в зависимости от соответствующего максимального значения τ_{max} с коэффициентом корреляции близким к единице

аппроксимированы линейной функцией. Для приведённой мгновенной режущей способности установлена зависимость её значения в конце этапа добора глубины $q_{\text{вд}} (\tau_{\text{max}})$ от соответствующего значения τ_{max} , которая аппроксимирована полным полиномом второй степени. В общем случае зависимость максимальных значений показателей безотказности от соответствующих значений τ_{max} , определяемых длиной обрабатываемой поверхности можно выразить следующей зависимостью

$$Y_{\text{вд}}(\tau_{\text{max}}) = a\tau_{\text{max}}^2 + b\tau_{\text{max}} + c, \quad (11)$$

где a, b, c – коэффициенты полинома второй степени, значения которых приведены в последней строке табл. 1.

ВЫВОДЫ

Разработаны математические модели наработки V , режущей Q и мгновенной режущей q способностей для переходного этапа глубинного шлифования, используя которые можно прогнозировать процесс шлифования.

Установлены закономерности изменения показателей V, Q и q на этапе от времени шлифования и значений показателей в конце этапа в зависимости от длины обрабатываемой поверхности или полного времени шлифования.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носенко, В.А. Площадь и толщина сечения срезаемого слоя на операции плоского глубинного шлифования / В.А. Носенко, В.К. Жуков, А.В. Авилов. // Справочник. Инженерный журнал. №1, 2006. С. 22-27.
2. ГОСТ 4.349. Система показателей качества продукции. Абразивный инструмент. Номенклатура показателей. М.: Издательство стандартов, 1986. 7 с.
3. Носенко, В.А. Технология шлифования: монография / В.А. Носенко, С.В. Носенко. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – 424 с.
4. Носенко, В.А. Математические модели наработки и режущей способности для различных этапов плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля / В.А. Носенко, С.В. Носенко // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2010. – №4. – С. 92–98.
5. Носенко В.А. Закономерности изменения силы плоского глубинного шлифования / В.А. Носенко, А.В. Авилов, С.В. Носенко // Справочник. Инженерный журнал. 2009. – №7. – С. 10–19.

Носенко Сергей Владимирович

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

Аспирант,

Тел. (8443) 39-79-17

E-mail: nosenkos@inbox.ru

Полянчиков Юрий Николаевич

Волгоградский государственный технический университет

Доктор технических наук, профессор

Тел. (8442) 24-84-38

E-mail: tehmarsh@vstu.ru

Носенко Владимир Андреевич

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

Доктор технических наук, профессор

Тел. (8443) 38-10-49

E-mail: nosenko@volpi.ru

Кременецкий Леонид Леонидович

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

Студент

Тел. (8443) 39-79-17

S.V. NOSENKO, Y. N. POLYANCHIKOV, V. A. NOSENKO, L. L. KREMENETSKIY

LAWS OF CHANGING SOME OF RELIABILITY INDEXES OF DEEP GRINDING AND EFFECT OF WORKPIECE'S LENGTH DURING TRANSITIONAL STAGE

Mathematical models of removing material volume, cutting ability and instantaneous cutting ability were developed for stage of depth increasing for deep grinding processes. Indexes' laws of changing during transitional stage of grinding workpieces with different lengths was described

Keywords: deep grinding, removing material volume, cutting ability, mathematical models, workpiece's lengths, grinding stages.

BIBLIOGRAPHY

1. Nosenko, V. A. The area and thickness of the section of the cutting layer during the deep grinding process / V.A. Nosenko, V.K. Zhukov, A.V. Avilov. // Directory. Engineering journal. № 1, 2006. P. 22-27.
2. Standard 4.349. The system of products' quality. The abrasive tool. Nomenclature of indices. Moscow: Publishing Standards, 1986. 7 s.
3. Nosenko, V.A. Grinding Technology: monograph / V.A. Nosenko, S. V. Nosenko. – Volgograd: IUNL VSTU, 2011. - 424 p.
4. Nosenko V. A. Mathematical models of operating time and cutting capacity for various stages of flat creep feed grinding of horizontal surface by circle of direct profile / V. A. Nosenko, S. V. Nosenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2010. - № 4. - P. 92-98.
5. Nosenko, V. A. Regularities of changes in the force of the flat deep grinding process / V.A. Nosenko, A. V. Avilov, S. V. Nosenko // directory. Engineering journal. - 2009. - № 7. - P.10-19.

Nosenko Sergey Vladimirovich

Volzhsky polytechnical institute (branch) of FSBEI HPO "VSTU", Volzhsky
P.G. student,
Phone: (8443) 39-79-17
e-mail: nosenkos@inbox.ru

Polyanchikov Yuri Nikolaevich

Doctor of Engineering, professor
Volgograd State Technical University
Tel. (8442) 24-84-38
e-mail: tehmarsh@vstu.ru

Nosenko Vladimir Andriyovych

Volzhsky polytechnical institute (branch) of FSBEI HPO "VSTU", Volzhsky
Doctor of Engineering, professor
Phone: (8443) 386834
e-mail: nosenko@volpi.ru

Kremenetskiy Leonid Leonidovich

student
Volzhsky polytechnical institute (branch) of FSBEI HPO "VSTU", Volzhsky
Tel. (8443) 39-79-17

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВОГО И БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье рассматриваются научные разработки и промышленный опыт в области изготовления продукции, с точной формой упрочнённой высоконагруженной при эксплуатации рабочей поверхностью методами нанотехнологий, ионно-вакуумного импульсного азотирования, увеличить производство выпускаемых и освоить новые изделия нефтепромыслового и бурового оборудования, а также расширить использование новой технологии ИВА в различных отраслях машиностроения.

Ключевые слова: нефтяное машиностроение, нефтепромысловое оборудование, азотирование, ионно-вакуумное импульсное азотирование, упрочнение.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении непрерывно повышаются требования к технологическим процессам направленным на упрочнение высоконагруженных поверхностей, так, например, для повышения износостойкости и коррозионной стойкости изделий нефтепромыслового назначения используется азотирование, позволяющее увеличить твердость рабочей поверхности канала цилиндра скважинного штангового насоса (СШН) на 870...1124 HV с толщиной покрытия не менее 0,2...0,5 мм.

Известно, что в США для упрочнения цилиндров штанговых насосов применяется закалка ТВЧ и цементация, но наибольшее распространение получили хромирование и азотирование, это связано с более широкой сферой применения данных методов. Полученные с использованием хромирования и азотирования цилиндры СШН обладают высокими коррозионной стойкостью, усталостной прочностью, контактной выносливостью по сравнению с другими методами упрочнения [3].

К сожалению, в настоящее время серийной технологии хромирования внутренней поверхности цилиндров в России нет, в виду сложного оборудования и трудной утилизации хрома Cr^{+6} . Нельзя не отметить опыт ОАО «Ижнефтемаш» в изготовлении хромированных цилиндров. Однако, на сегодняшний момент используются при нефтедобыче в России, импортные.

В нашей стране широкое распространение получил процесс азотирования цилиндров (рис. 1, 2), который стал бурно развиваться с 90-х годов прошлого века. Этому способствовало и развитие технологий ионно-вакуумного азотирования, появление производительного оборудования для данного процесса. В конечном счёте, усилиями российских машиностроителей (ЗАО «ПКНМ», ОАО «Ижнефтемаш») импорт СШН с азотированными цилиндрами был полностью прекращён, а импорт хромированных цилиндров значительно уменьшен. Авторами были разработаны специальные технологии ионно-вакуумного азотирования (ИВА), которые позволили превзойти импортные хромированные цилиндры практически по всем показателям [1, 2]. Важнейшее значение имеет и безусловное преимущество азотирования по экологичности (рис. 3).

Традиционная технология ионно-вакуумного азотирования с глубиной 0,25...0,30 мм увеличивает непрямолинейность оси участка цилиндра длиной 1 м в среднем до 0,2 мм, что превышает допуск на этот параметр в 2 раза. Для обеспечения регламентированного стандартами *American Petroleum Institute (API)* и ГОСТом допуска 0,1 мм требуется правка поперечным изгибом, после которой на азотированной поверхности появляются трещины размером 2...5 мкм [2].

Кроме того, после правки для обеспечения гарантированного зазора между цилиндром и плунжером 0,025 мм необходимо хонингование многорядными хонинговальными головками, имеющими жесткий корпус.

Такое хонингование обеспечивает прямолинейность оси канала, но удаляет часть азотированного слоя глубиной до 0,03...0,10 мм.

При традиционном технологическом процессе формирования канала цилиндра и азотирования его поверхности, снижается твердость поверхности в местах удаления припуска с 900 HV до 600...650 HV [1].

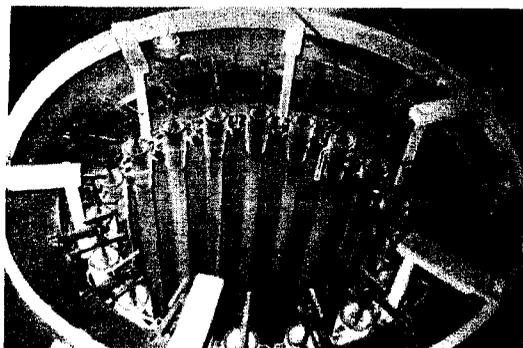


Рисунок 1 – Азотирование цилиндров штанговых насосов



Рисунок 2 – Азотирование деталей машиностроения

Сравнительные коррозионные испытания азотированного слоя со съемом припуска 2...3 мкм и 50 мкм показали увеличение скорости коррозии в 3 раза, с 0,12 г/м²ч до 0,37 г/м²ч. В совокупности с трещинами на поверхности эксплуатационные свойства такого слоя весьма не велики.

Особенностью нового метода упрочнения азотированием в импульс-плазме (технология ИВА), является обеспечение максимальной твердости на глубине 0,2 мм азотированного слоя, минимального коробления цилиндра, исключающего последующую правку изгибом и позволяющего оставлять припуск под окончательное хонингование в пределах 3...5 мкм.

Новая технология азотирования (ИВА) в сочетании с технологией обработки канала цилиндра решили поставленную задачу, - технологически обеспечена точность формы высоконагруженной контактной поверхности деталей. Так можно сделать вывод о значительном влиянии параметров технологических факторов на увеличение ресурса цилиндра СШН [4].

Применяемые процессы изготовления цилиндра (многократная расточка канала – от 3 до 7 проходов, правка по оси канала, хонингование многорядными хонинговальными головками до азотирования) обеспечивают прямолинейность оси канала цилиндра в пределах 0,07 мм на каждом метре длины.

В этом проекте предусматривается упрочнение деталей из конструкционных Cr-Ni-Mo-V сталей с различной категорией прочности для повышения их потребительских свойств при тяжёлых условиях эксплуатации.

Развитие азотирования не возможно без постоянного обновления и совершенствования оборудования для этого процесса. Сравнительные характеристики защитных покрытий пары «цилиндр-плунжер» СШН, упрочненных азотированием – ИВА и гальваническим хромированием приведены в таблице [1].

На сегодня широкое применение для упрочнения деталей в ПКНМ применяются различные методы: закалка ТВЧ и ТПЧ; газопламенное напыление твердым сплавом с последующим оплавлением; плазменное напыление; сверхзвуковое напыление, в т.ч. с последующим оплавлением слоя; хромирование, кадмий-хромирование; химическое нанесение никель-фосфорного покрытия.

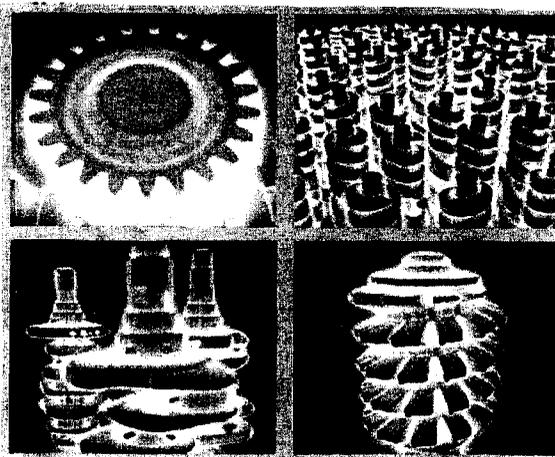


Рисунок 3 – Азотирование деталей общего машиностроения

Наиболее эффективным, особенно для рассматриваемых цилиндров штанговых насосов и других деталей машиностроения, оказался метод азотирования. Ионно-вакуумное азотирование позволяет в большей степени регулировать образуемые на поверхностях деталей слои по строению и фазовому составу. Кроме обычных технологических параметров, влияющих на формирование упрочненного слоя (номинальная мощность импульсного источника питания; напряжение в импульсе; номинальный импульсный ток; рабочее давление в камере; рабочая температура; максимальный вес обрабатываемых деталей), ионное азотирование имеет ряд дополнительных: давление насыщающего газа, электрические характеристики, межэлектродное расстояние значения которых представляют собой ноу-хау.

Следует заметить, что технологические параметры находятся между собой в сложной и пока недостаточно изученной зависимости. Поэтому, в настоящее время, технологические процессы ионной химико-термической обработки (ХТО) основаны на экспериментальном подборе оптимальных режимов диффузионного насыщения.

Данные о наработке оборудования импортного производства свидетельствуют о низком ресурсе США с хромовым покрытием в США, Судане и Индонезии применение нашли цилиндры с азотированием и карбонитрированием рабочей поверхности. В результате применения новой технологии достигнуто [5]:

1. Расширение технологических возможностей ионных процессов и достижение качественного структурно-энергетического состояния упрочнённых поверхностей:
2. Максимальное увеличение подвижности и проникающей способности плазмы, что обеспечило азотирование сложноконтурных деталей с различными отверстиями и узкими пазами.
3. Повышение плотности укладки деталей в садке с минимальными зазорами, что увеличило производительность обработки.
4. Обеспечение высокой воспроизводимости и узких допусков в результате обработки разнотипных изделий.
5. Повышена производительность процесса изготовления деталей скважинных штанговых насосов без корректировки технологического процесса.

ВЫВОД

Актуальными являются работы по упрочнению высоконагруженных поверхностей деталей нефтегазового и бурового оборудования, определение технологических параметров формирования азотированного слоя, его наноструктурной составляющей, в зависимости от технологических факторов обработки.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов, В.В. Ионное азотирование - прогрессивная технология поверхностного упрочнения / В.В. Богданов // Передовой опыт. 1984. №7.
2. Мокронос, Е.Д. Повышение эксплуатационной надежности скважинного штангового насоса / Е.Д. Мокронос, В.В. Богданов, М.Н. Елтышев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007. №12. С. 43-44.
3. Песин, М.В. Технологические особенности упрочнения деталей скважинных штанговых насосов / Песин М.В., Мокронос Е.Д. // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. В 2ч. Ч.2.: Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербург гос. политехн. ун-т, Науч.-произв. «Фирма Плазмацентр». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010г.
4. Песин, М.В. Триботехническое упрочнение высоконагруженных поверхностей деталей и создание на этой основе производства изделий нефтегазового назначения / Песин М.В., Е.Д. Мокронос // Экспозиция. Нефть. Газ. 2010. №9. С. 8-9.
5. Песин, М.В. Технологическое обеспечение повышения долговечности изделий машиностроения / Мокронос Е.Д., В.В. Богданов // Новые материалы и технологии – НМТ-2010: материалы Всерос. науч.-тех.

конф., г. Москва, 16-18 нояб. 2010г.: в 3 т. Т.2 / М-во образования и науки РФ, ГОУ ВПО МАТИ - рос. гос. тех. ун-т им. К.Э. Циолковского. – М.: МАТИ, 2010. – С. 32.

6. Песин М.В., Мокроносов Е.Д. Скважинное оборудование: обработка, внедрение, сервис, технологические особенности изготовления СЦН // Инженерная практика. 2010. №1(2). С. 90-92.

Песин Михаил Владимирович

ЗАО «Торговый дом ПКНМ» г. Пермь (ЗАО «Пермская компания нефтяного машиностроения» г. Краснокамск), Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Кандидат технических наук, доцент, первый заместитель директора по нефтепромысловому оборудованию, доцент кафедры «Технология машиностроения» Пермского государственного технического университета

Тел. (342) 265-15-22, 265-06-70, 263-11-52

E-mail: M.Pesin@mail.ru

M.V. PESIN

MAINTENANCE OF ACCURACY OF THE FORM OF THE CONTACT SURFACE OF DETAILS WITH TECHNOLOGICAL METHODS

On the basis of available scientific development and industrial experience in the field of manufacturing production, with the exact form strengthened высоконагруженной at operation by a working surface by methods nanotechnologies, ionic-vacuum pulse nitriding to increase manufacture let out and to master new products of the oil-field and chisel equipment, and also to expand use of new IVA-technology in various branches of mechanical engineering.

Keywords: oil mechanical engineering, the oil-field equipment, nitriding, ionic-vacuum pulse nitriding, hardening.

BIBLIOGRAPHY

1. Bogdanov, V.V. Ionic nitriding - progressive technology of superficial hardening / V.V.Bogdanov // Best practices. 1984. №7.
2. E.D.Mokronosov, E.D. Increase of operational reliability for subsurface sucker rod pump / E.D.Mokronosov, V.V. Bogdanov, M.N.Elytshev // Chemical and oil-and-gas mechanical engineering. 2007. №12. P. 43-44.
3. Pesin, M.V. Technological of feature of hardening of details pump / Pesin M.V., Mokronosov E.D. // Resources saving up technologies of repair, restoration and hardening of details of machines, mechanisms, the equipment, the tool and industrial equipment from nano-up to a macrolevel. V.2.: Federal agency by formation, St.-Petersburg gov. politech. ins., Firm Plazmatsentr. – S.-Pb.: Publishing house Politechn., 2010.
4. Pesin, M.V. Tribotechnical hardening of highly loaded surfaces for details and creation on this basis of manufacture of products of oil-and-gas purpose / Pesin M.V., E.D. Mokronosov // Exposition. Oil. Gas. 2010. №9. P. 8-9.
5. Pesin M.V. Technological maintenance of increase for durability of mechanical engineering products / Mokronosov E.D., V.V.Bogdanov // New materials and technologies – NMT-2010. Moscow. 2010r.: in 3 v. V.2 / M-in of formation and a science of the Russian Federation, MATI name of K.E.Tsiolkovsky - M.: MATI, 2010. - P. 32.
6. Pesin M.V., Мокроносов Е.Д. Well equipment: processing, introduction, service, technological features of manufacturing for subsurface sucker rod pump // Engineering practice. 2010. 1 (2). P. 90-92.

Pesin Mikhail Vladimirovich

Can. Sc. technic., Deputy Director for oil production equipment

Deputy Director CJSC Trading house PKNM (Perm Oil Engineering Company),

State National Research Polytechnical University of Perm

Associate Prof. of the department

«Technological of Machine building», Perm

Phone: (342) 265-15-22

E-mail: M.Pesin@mail.ru

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 687.022

Ю.Н. НЕКРАСОВ

КОНТРОЛЬ ПОРОКОВ ТКАНИ ТЕЛЕВИЗИОННО-СТРОБОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В статье рассматривается применение телевизионной аппаратуры для обнаружения дефектов при разбраковке тканей в швейной и текстильной промышленности с целью повышения производительности труда и улучшения условий работы разбраковщиков путем использования стробоскопического эффекта.

Ключевые слова: дефекты ткани, разбраковка, стробоскопический эффект, телевидение.

Сортность материала по наличию дефектов внешнего вида определяют визуально на промерочно-браковочных машинах или на промерочных столах.

Разбракованный материал перемещается по плоскости промерочного стола лицевой стороной вверх со скоростью 15-20м/мин.

При этом работница визуально просматривает ткань, определяя вид порока и места его расположения.

Физическая усталость, цветовая адаптация глаза, изменчивость окружающих условий затрудняют разбраковку ткани.

С увеличением скорости движения ткани происходит ослабление видимого контраста между дефектом и окружающим его фоном.

При большой скорости движения ткани, глаз не успевает просмотреть всю контролируемую поверхность, ввиду ограниченной скорости зрительного восприятия, ряд пороков остается незамеченными, что приводит к снижению сортности готовых изделий.

Одним из существующих решений этой проблемы является использование метода, основанного на последовательном просмотре периодически повторяющихся по рисунку и структуре с участком движущейся ткани, метода на базе использования телевизионной аппаратуры, заключающегося в следующем: с помощью импульсивных ламп или специального затвора осуществляется импульсный режим работы телевизионной системы, т.е. такой режим, когда экспонирование трубки происходит за достаточно короткий промежуток времени. Величина этого временного промежутка должна быть достаточно малой, чтобы не было заметного скоростного смаза изображения на накопителе передающей трубки.

С помощью специального датчика экспонирование трубки производится каждый раз при смене участка ткани, попадающего в поле зрения камеры, и на экране ВКУ получается неподвижное изображение участка ткани.

При этом имеющиеся дефекты будут появляться на экране ВКУ в течение некоторого времени, определяемого частотой экспонирования и регистрироваться контролером.

Рассмотренный принцип положен в основу телевизионного стробоскопа, предназначенного для дефектоскопии тканей.

Рассмотрим детально процесс дефектоскопии с помощью телевизионного стробоскопа на рисунке 1.

На рисунке 1 показана упрощенная схема контроля ткани.

Как видно из схемы, ткань протягивается перед объективом передающей камеры, работающей в импульсном режиме. Импульсный режим работы камеры осуществляется с помощью датчика и специального устройства управления экспонирования трубки, определяющего время ее экспонирования. Работа схемы происходит следующим образом: движущаяся ткань вызывает вращение датчика, который вырабатывает сигнал положения объекта (ткани).

По сигналу от датчика происходит экспонирование передающей трубки и считывание потенциального рельефа ее мишени. Полученный видеосигнал по кабелю подается на ВКУ, где воспроизводится изображение тканевого участка.

Вследствие малой скорости экспонирования передающей трубки изображение тканевого участка на экране ВКУ будет неподвижным. После того, как проэкспонированный участок ткани уйдет из поля зрения камеры, с датчика поступает следующий сигнал, и процесс повторяется. В результате этого на экране ВКУ создается неподвижное изображение тканевого участка. Частота смены изображений тканевых участков будет определяться скоростью движения ткани « g » и высотой поля зрения передающей камеры « h » и связана с ним соотношением:

$$f_{\text{пр}} = \frac{g}{h}$$

При этом имеющиеся дефекты будут появляться на экране ВКУ в течение промежутка времени $t_{\text{пр}} = \frac{l}{f_{\text{пр}}}$

и регистрироваться наблюдателем.

Для более эффективного обнаружения дефектов, размеры которых малы, может быть дополнительно использован эффект скоростного смаза, возникающий на накопителе передающей трубки вследствие того, что экспозиции подлежит движущийся предмет.

Благодаря этому, угловой размер минимального дефекта будет увеличен, и обнаружение такого дефекта упростится.

Первоочередное требование, предъявляемое к установке, состоит в получении максимальной скорости дефектоскопии и создания более благоприятных условий работы контролеров, при повышении качества контроля.

Исходя из этого, определяем условия наблюдения и регистрации дефектов.

Для этого необходимо выбрать масштаб изображения, т.е. определить число строк развертки, приходящейся на дефект, предварительно выбрав частоту строк, определить условия обеспечения требуемой контрастности изображения и инженерно-психологические требования ко времени предъявления изображения участка ткани наблюдателю.

Для определения размера дефекта в элементах разложения (строках) необходимо, чтобы угловой размер дефекта превышал пороговую величину остроты зрения равную Γ' [1].

В соответствии с вещательным стандартом страны при 625 строчном разложении, угловой размер « α » между двумя черными различными линиями составляет 2 при наблюдении с оптимального расстояния

$$\rho = 5 = \frac{L}{H} \quad (1)$$

где L – расстояние от наблюдателя до экрана

H – высота экрана.

Поэтому минимальный строчный размер дефекта « h » может быть принят равным одной строке.

Определение поля зрения камеры ведется в предположении, что при обнаружении дефектов используется эффект скоростного смаза изображения.

Величина зоны смещения изображения при этом принята равной 1 мм.

Тогда вертикальный размер дефекта « $h\rho$ » будем считать равным 3 мм.

Вертикальный размер поля зрения передающей камеры

$$H_k = \frac{625 \cdot h\rho}{h} \quad (2)$$

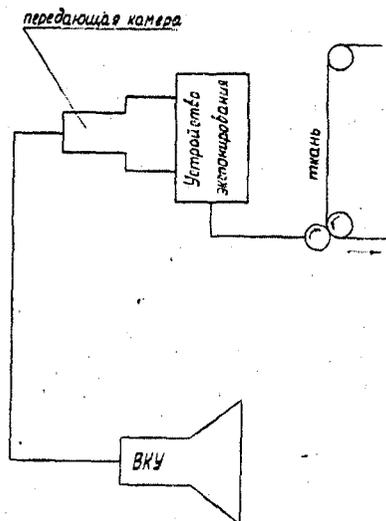


Рисунок 1 – Схема контроля ткани

Угловой размер дефекта в зависимости от его размера в строках

$$\gamma = 2 + \alpha(h - 2) \tag{3}$$

Отношение сторон поля зрения камеры при учете, что горизонтальный размер поля зрения равен ширине ткани и составит $-v$.

$$\frac{H_k}{v} = \frac{625 \cdot h \rho}{h} \tag{4}$$

Результаты вычислений по формулам 2-4 при различных значениях строчного размера дефекта сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты вычисления

| Размер дефекта в строках | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Высота поля зрения камеры H_k | 1350 мм | 935 | 630 | 468 | 375 |
| Формат $\frac{H_k}{v}$ | $\frac{3}{2}$ | $\frac{4}{4}$ | $\frac{3}{4}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{3}$ |
| Угол наблюдения дефекта | 1' | 2' | 4' | 6' | 8' |

Исходя из данных таблицы 1, выбираем размер минимального возможного дефекта, равный трем строкам по следующим причинам.

Угловой размер дефекта в 4 раза превышает пороговую величину остроты зрения, что является достаточным для обнаружения дефекта.

При выбранном строчном размере дефекта получается наиболее выгодное соотношение сторон поля зрения камеры, соответствующее её действительному формату. В этом случае высота поля зрения равна 630 мм.

Условия передачи необходимой конкретности изображения и обнаружения дефекта при заданной контрастности с фоном.

Передача изображения с сохранением требуемой контрастности с окружающим фоном будет определяться яркостью экрана и угловыми размерами дефекта.

На рисунке 2 приведены кривые обнаружения дефектов в зависимости от яркости экрана при различных значениях контраста объекта и фона [1].

Как видно из приведенных кривых, уже при яркости 3,2 кд/м² обнаруживаются детали с угловым размером 2,8, т.е. менее 4, при контрасте объекта с фоном $K=0,1$.

Современные кинескопы имеют яркость экрана от 30 кд/м² и выше.

Поэтому вопрос о яркости экрана может быть снят.

Главным при проектировании оптико-телевизионного стробоскопа является определение скорости транспортировки ткани.

Скорость транспортирования может быть определена как: $v = H_k \cdot f_{np}$

где H_k – ранее определенный вертикальный размер поля зрения камеры равной $H_k=0,63$ м;

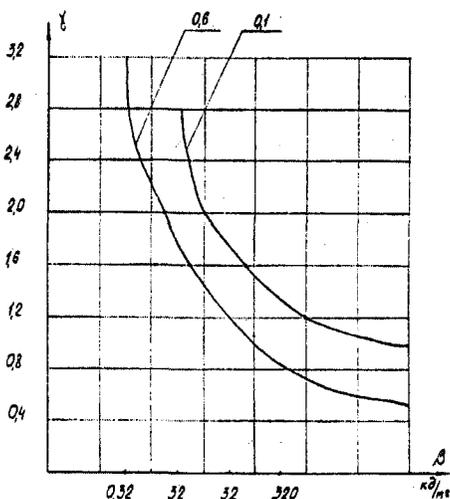


Рисунок 2 – Кривые обнаружения дефектов

f_{np} – частота смены изображений участков.

$$t_{np} = \frac{1}{f_{np}} \text{ (время предъявления)}$$

Минимально-необходимое время предъявления – время для обнаружения дефекта лежит выше 0,1 сек.

Таблица 2 – Минимально-необходимое время предъявления

| | | | | | | |
|--------------|-----|------|-----|------|-----|-----|
| $t_{пр}$ сек | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,4 |
| м/сек | 6,3 | 4,2 | 3,1 | 2,5 | 2,1 | 1,5 |

Как видно из таблицы 2 зависимости скорости движения ткани от времени предъявления изображения, дальнейшее увеличение времени предъявления будет нецелесообразно.

Область выбранного времени составляет 0,1÷0,4 сек

В результате анализа был определен ряд параметров телевизионного стробоскопа.

Таблица 3 – Параметры телевизионного стробоскопа

| | |
|---|-------------------|
| Частота строк | 625 строк |
| Размеры в строках | N=3 строки |
| Коэффициент нелинейности | 2,5 |
| Диапазон времени предъявления изображений | 0,1÷0,4 сек |
| Диапазон скорости ткани, м/сек | 6,3÷1,5м/сек |
| Коэффициент отношения, сигнал/шум | $\varphi \geq 40$ |

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерно-психологические требования к системам управления. ВНИИТЭ, М., 1967.
2. Грязин, Г.Н. Приборы и техника эксперимента / Г.Н. Грязин // Издательство АН СССР, 1971. – №4.

Некрасов Юрий Николаевич

Госуниверситет - УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Тел.: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

Yu.N. NEKRASOV

CONTROL OF DEFECTS OF THE FABRIC BY THE TELEVISION AND STROBOSCOPIC METHOD

In article use of television equipment for detection of defects when grading fabrics in the clothing and textile industry for the purpose of increase of labor productivity and improvement of operating conditions of controller by use of stroboscopic effect is considered.

Key words: defects of a fabric, grading, stroboscopic effect, television.

BIBLIOGRAPHY

1. Inzhenerno-psihologicheskie trebovaniya k sistemam upravleniya. VNIITJe, M., 1967.
2. Grjazin, G.N. Pribory i tehnika jeksperimenta / G.N. Grjazin // Izdatel'stvo AN SSSR, 1971. – №4.

Nekrasov Jury Nikolaevich

State university - ERPC», OreI

Cand.Tech.Sci., the professor of faculty «Technology And designing of garments »

Ph.: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

В.В. ГАЛАГАН, С.Н. ДРОНОВ, Н.Е. БЕЛКИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОНЕЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА ХЛЕБОПЕЧЕНИЯ

В статье рассматриваются результаты теоретических исследований математической модели процесса хлебопечения, влияние на конечные результаты температуры и влажности воздуха в расстоечном шкафу

Ключевые слова: математическая модель, расстойка тестовых заготовок, температура, влажность

Технологические процессы хлебопекарного производства характеризуются многокомпонентностью исходного сырья, высокой степенью неопределенности на различных этапах протекания процесса производства пшеничного хлеба, нелинейными зависимостями между параметрами, т.е. являются сложными системами. В большинстве своем они представляют собой сочетание гидродинамических, тепловых, биохимических и механических процессов.

Поэтому создание системы управления расстойным шкафом, входящим в состав комплекса минипекарни, которая позволит полностью использовать внутренние ресурсы перерабатываемого сырья, улучшить качество выпекаемых изделий, уменьшить процент брака и снизить трудоемкость операции расстойки тестовых заготовок, является весьма актуальной. Для решения этой проблемы была разработана математическая модель прогнозирования результатов расстойки, используя два основных фактора - температуру и влажность.

В современной информатике накоплен большой опыт построения математических моделей систем и объектов из самых различных отраслей науки, техники, промышленности, экологии и др. Однако эффективно использовать имеющуюся информацию, даже из смежных отраслей, удается далеко не всегда. Это связано с целым комплексом причин: большим объемом неоднородной информации, использованием различных понятийных аппаратов, профессиональной разобщенностью и пр. Многочисленные попытки систематизировать информацию, свести ее к иерархической структуре, сделать доступной специалистам различных отраслей знаний привели к появлению понятия сложной системы, как многопараметрического объекта, представимого конечным множеством математических моделей (каждая из которых отражает определенную группу свойств). Поэтому разработка модели расстойки хлебобулочных изделий является малым вкладом в систему уже существующих моделей прогнозирующих конечный высокоэффективный результат.

Первым этапом создания модели было определение важных параметров. Такими параметрами и стала температура расстойки и влажность процесса. Повышение температуры теста свыше 40 °С отрицательно влияет на дрожжи и снижает газообразование. Относительная влажность воздуха не должна быть выше 85 %, так как в противном случае тесто будет прилипать к доскам или кассетам для расстойки. В некоторых случаях продолжительность расстойки увязывают с температурой в печной камере. Чем выше температура, тем большую расстойку следует дать заготовкам. При высокой температуре в пекарной камере скорее заканчивается процесс брожения в заготовках и образуется корка, закрепляющая форму изделия. Повышенная влажность воздуха предупреждает заветривание поверхности тестовых заготовок. Если тесто расстается в атмосфере недостаточной влажности, то на поверхности заготовок образуется сухая пленка, которая под давлением газов затем разрывается, корка готового хлеба из такого теста имеет разрывы и трещины. При достаточном увлажнении верхний слой теста становится эластичным и легко растягивается под действием оксида углерода. Конец расстойки тестовых заготовок определяют органолептически по увеличению объема теста, а также при легком нажиме пальцами на его поверхность.

Планируя активный эксперимент, исследователь имеет возможность поддерживать факторы, влияющие на основной показатель производства (производительность, расход энергии, количество продукта и т. п.), на определенных уровнях и менять по заданному закону комбинации этих уровней. При этом могут решаться две группы задач. Первая, основная группа, оптимизационные задачи, когда в результате планированного эксперимента определяют значения факторов, совокупность которых приводит к оптимальной величине показателя производства (этот показатель называется параметром оптимизации). Задачи второй группы — интерполяционные — являются составной частью оптимизационных задач, но могут иметь и самостоятельное значение. Эти задачи служат для составления математической модели процесса.

Таким образом, математическая модель позволяет прогнозировать время расстойки, в зависимости от технологических параметров процесса. Увеличение времени расстойки больше номинального обычно приводит к :

- перебродившему, т.е. к тесту с повышенным содержанием кислоты;
- к мокрому, т.е. тесту на поверхности которого произошла конденсация пара и конденсат забил все поры;
- к потрескавшейся после выпечки корочке, т.к. влага оставшаяся на поверхности после конденсации, вскипает и разрывает корочку хлеба.

Ниже приведенная таблица (табл.1) параметров полученных в результате проведенных экспериментов используемых для выведения математической модели.

Таблица 1 – Результаты определения времени расстойки заготовок из пшеничного теста в термическом шкафу в зависимости температуры и влажности воздуха

| Температура воздуха в расстоечном шкафу | Относительная влажность воздуха в расстоечном шкафу, % | | | | |
|---|--|-------|------|-------|------|
| | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 |
| 25 | 76,1 | 70,1 | 64,1 | 58,1 | 52,1 |
| 31,25 | 72,2 | 67,05 | 61,9 | 56,75 | 51,6 |
| 37,5 | 68,3 | 64 | 59,7 | 55,4 | 51,1 |
| 43,75 | 64,4 | 60,95 | 57,5 | 54,05 | 50,7 |
| 50 | 60,5 | 57,9 | 55,3 | 52,7 | 50,1 |

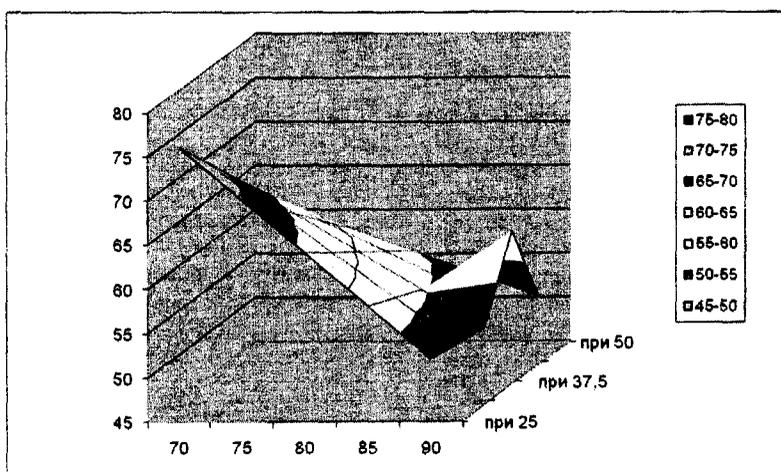


Рисунок 1 – График зависимости времени расстойки заготовок из пшеничного теста от влажности и температуры воздуха

Полученные в результате расчетов математической модели данные позволяют оптимизировать время расстойки и выдать рекомендации затрат времени для того или иного режима, рецептуры теста проводимого процесса. А графики (рис.1 и рис.2) зависимости времени расстойки от влажности и температуры воздуха в расстоечном шкафу, позволяющие определять промежуточные параметры процесса расстойки без дополнительных экспериментов и расчетов.

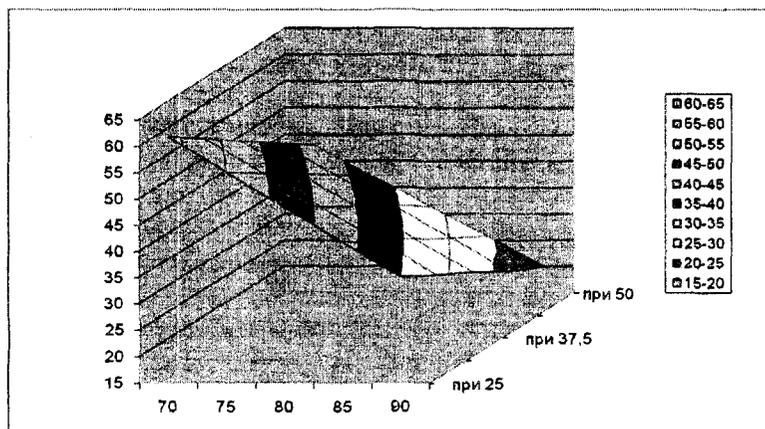


Рисунок 2 – График зависимости времени расстойки заготовок из сдобного теста от влажности и температуры воздуха

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ауэрман, Л.Я. Технология хлебопекарного производства: учебник. - 9-е изд.; перераб. и доп. / Под общ. ред. Л.И. Пучковой. - СПб: Профессия, 2005. - 416 с., ил.
2. Богатырева, Т.Г. Влияние продолжительности термовлажностной обработки на качество хлебобулочных изделий / Т.Г. Богатырева, В.А. Брызун, Нгуен Дак Чыонг. // Хлебопечение России. – 2011. – № 3. – С. 29 – 30.
3. Новиков, К.Г. Зависимость качества тестовых заготовок от микроклимата в расстойном шкафу / К.Г. Новиков, И.Н. Кузнецов // Хлебопечение России. – 2005. – № 2. – С. 40 – 41.
4. Новиков, К.Г. Новый способ контроля процесса расстойки в расстоечных шкафах / К.Г. Новиков, Д.В. Гусев, А.Н. Соломонов // Хлебопечение России. – 2009. – № 1. – С. 24 – 26.
5. Березина Моделирование технологических процессов производства пищевых продуктов: Методические указания для лабораторных занятий // Орел 2010. - 85 с., ил.
6. Дерканосова, Н.М. Практикум по моделированию и оптимизации технологических процессов пищевых производств: учебное пособие / Н.М. Дерканосова, А.А. Журавлев, И.А. Сорокина. // Воронеж 2010. - 165 с., ил.

Галаган Владимир Викторович

Госуниверситет – УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»

302030, г. Орел, ул. Московская, д. 65

Тел. (4862) 55-11-87

E-mail: mapp@ostu.ru

Дронов Сергей Владимирович

Госуниверситет – УНПК, г. Орел

Магистр «Техники и технологии», кафедра «Машины и аппараты пищевых производств»

302030, г. Орел, ул. Московская, д. 65

Тел. (4862) 55-11-87

E-mail: mapp@ostu.ru

Белкина Наталья Евгеньевна

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет»

Старший преподаватель кафедры «Информационных технологий»

302020, г. Орел, ул. Ген. Родина, д. 15

Тел. (4862) 736533

E-mail: alexor2004@yandex.ru

V.V. GALAGAN, S.N. DRONOV, N.E. BELKINA

RESEARCH OF MATHEMATICAL MODEL OF FORECASTING OF THE END RESULTS OF PROCESS OF HLEBOPECHENY

In article results of theoretical researches of mathematical model of process of a bread batch influence on the end results of temperature and humidity of air in for increase in volume of bread case.

Keywords: mathematical model, for increase in volume of bread of test preparations, temperature, humidity

BIBLIOGRAPHY

1. Aujerman, L.Ja. Tehnologija hlebopekarnogo proizvodstva: uchebnik. - 9-e izd.; pererab. i dop. / Pod obw. red. L.I. Puchkovej. - SPb: Professija, 2005. - 416 s., il.
2. Bogatyreva, T.G. Vlijanie prodolzhitel'nosti termovlazhnostnoj obrabotki na kachestvo hlebobu-lochnyh izdelij / T.G. Bogatyreva, V.A. Brjazun, Nguen Dak Chyong. // Hlebopechenie Rossii. - 2011. - № 3. - S. 29 - 30.
3. Novikov, K.G. Zavisimost' kachestva testovyh zagotovok ot mikroklimata v rasstojnom shkafu / K.G. Novikov, I.N. Kuznecov // Hlebopechenie Rossii. - 2005. - № 2. - S. 40 - 41.
4. Novikov, K.G. Novyj sposob kontrolja processa rasstojki v rasstoechnyh shkafah / K.G. Novikov, D.V. Gusev, A.N. Solomonov // Hlebopechenie Rossii. - 2009. - № 1. - S. 24 - 26.
5. Berezina Modelirovanie tehnologicheskikh processov proizvodstva piwevyh produktov: Metodiche-skie ukazaniya dlja laboratornyh zanjatij // Orel 2010. - 85 s., il.
6. Derkanosova, N.M. Praktikum po modelirovaniju i optimizacii tehnologicheskikh processov piwe-vyh proizvodstv: uchebnoe posobie / N.M. Derkanosova, A.A. Zhuravlev, I.A. Sorokina. // Voronezh 2010. - 165 s., il.

Galagan Vladimir Viktorovich

State University ESPC

Candidate of technical sciences, associated professor, chair "Machines and equipment of food production"

302020, Orel, ul. Moskovskaya, 65

Tel.: 4862-55-11-87

E-mail: map@ostu.ru

Dronov Sergey Vladimirovich

State University ESPC

Master of "Techniques and technology", chair "Machines and equipment of food production"

302020, Orel, ul. Moskovskaya, 65

Tel.: 4862-55-11-87

E-mail: map@ostu.ru

Belkina Natalia Yevgenievna

State University ESPC

Senior teacher, chair "Information technologies"

302020, Orel, ul. Generala Rodina, 15

Tel. 4862-73-65-33

E-mail: alexor2004@yandex.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.05

В.Я. РАСПОПОВ

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ, СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВИГАЦИИ

Рассмотрены основные типы инерциальных датчиков и принципы построения информационно-измерительных и управляющих систем ориентации, стабилизации и навигации.

Ключевые слова: инерциальные датчики, гироскоп, акселерометр, ориентация, стабилизация, навигация, комплексирование.

1. Определение и основные типы гироскопов и акселерометров

Гироскопы и акселерометры – приборы, позволяющие измерить угловые и линейные параметры движения твёрдого тела в инерциальном пространстве. На этом основании их называют инерциальными датчиками [2].

1.1. Гироскопы

Идея прибора базировалась на теоретическом положении Л. Эйлера о том, что быстро вращающееся тело, имеющее неподвижную точку и не подверженное влиянию моментов внешних сил, сохраняет в абсолютном пространстве первоначальное направление оси своего вращения.

Таким образом, по отношению к оси быстро вращающегося тела должно наблюдаться перемещение предметов, расположенных на Земле, вращающейся в абсолютном пространстве.

По мнению известного западногерманского ученого-механика К. Магнуса, одна из первых моделей гироскопа была изготовлена в Германии в 1802 году математиком и астрономом Ф. Боненбергером (1765-1831) (рис. 1а). Термин «гироскоп» (от греческих слов «гирос» - вращение, «скопео» - наблюдаю) ввёл знаменитый французский физик Л. Фуко, который 27.09.1852 г. на заседании Парижской академии наук с помощью гироскопа провёл опыт по обнаружению вращения Земли. Гироскоп представлял собой маховик в кардановом подвесе (рис. 1б).

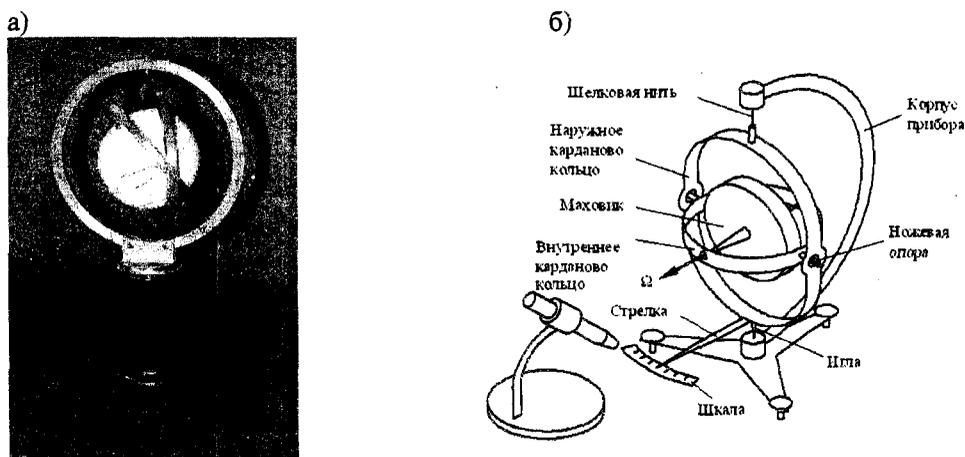


Рисунок 1 – Гироскопы а) Ф.Боненберга, б) Л.Фуко

С помощью специального устройства маховик был приведен во вращение и затем работал на выбеге около 10 минут. Ось собственного вращения маховика была установлена в горизонтальное положение, а стрелка, связанная с наружным кольцом карданова подвеса, совмещена с нулевой отметкой шкалы. Ожидалось, что в силу вращения Земли ось вращения маховика будет иметь кажущийся наблюдателю поворот вокруг вертикальной оси вращения наружного кольца карданова подвеса со скоростью, равной вертикальной составляющей вращения Земли на широте Парижа ($\approx 11^\circ/\text{час}$).

Для наблюдения за ожидаемым медленным движением стрелки применялся микроскоп. В первые минуты опыта стрелка, как и ожидалось, двигалась справа налево с ожидаемой скоростью, но затем из-за уменьшения скорости вращения маховика и влияния моментов трения в осях вращения кардановых колец движение стрелки становилось хаотичным. Таким образом, опыт Л. Фуко удался частично, но для технических возможностей того времени и это было большим достижением.

Опыты Фуко дали мощный толчок развитию гироскопической техники. С появлением электрических машин возникли попытки их применения для вращения маховика гироскопа. Так, уже в 1865 г. такой прибор (электрический гироскоп) был представлен Императорской Академии наук в Санкт-Петербурге профессором Б.Я. Якоби.

Работы Л. Эйлера, Ж. Лагранжа, С.В. Ковалевской явились основой для дальнейших работ по динамике вращающихся твердых тел и, в частности, базой для науки, получившей название «теория гироскопов», или «теория гироскопических систем».

Развитие гироскопической техники привело к тому, что гироскопами стали называть очень широкий класс приборов и сейчас термин «гироскоп» используется для названия устройств, содержащих материальный объект, который совершает быстрые периодические движения. В результате этих движений устройство становится чувствительным к вращению в инерциальном пространстве. При таком понимании слова «гироскоп» для него необязательно наличие симметричного массивного быстровращающегося «маховика», подвешенного без трения таким образом, чтобы его центр масс совпадал с центром подвеса. Быстрые периодические движения могут быть вращательными, возвратно поступательными, колебательными и др. В механических гироскопах носителями быстрых периодических движений могут быть твердое тело, жидкость или газ. В квантовых – атомные ядра, протоны, электроны, обладающие орбитальными и спиновыми магнитными и механическими моментами, в том числе когерентные потоки фотонов, фононов или любых других частиц, не обладающих магнитными моментами.

Основные типы гироскопов и их классификационные признаки приведены на рисунке 2. Классификационными признаками, определяющими особенности конструкции гироскопов, являются вид носителя быстрых периодических движений и способы их создания.

1.2. Акселерометры

Чувствительным элементом (ЧЭ) акселерометров является масса, смонтированная в корпусе на элементах подвеса различного конструктивного исполнения. По виду движения массы ЧЭ акселерометры делятся на осевые и маятниковые. В осевых акселерометрах конструкция подвеса обеспечивает прямолинейное движение массы, а в маятниковых – угловое.

Акселерометры способны измерять линейное и угловое ускорения. Соответственно различают линейные и угловые акселерометры. В линейных акселерометрах ось чувствительности параллельна вектору измеряемого ускорения. Для измерения углового ускорения ось чувствительности должна быть параллельна вектору линейного ускорения, обусловленного угловым ускорением.



Рисунок 2 – Основные типы гироскопов

На рисунке 3 показана принципиальная схема линейного акселерометра для простейшего случая размещения на объекте, перемещающемся с ускорением a_x и при этом вектор силы тяжести mg перпендикулярен вектору a_x .

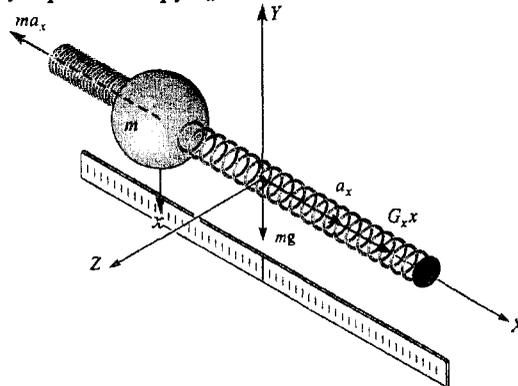


Рисунок 3 – Принципиальная схема линейного акселерометра

Из равенства сил следует выражение для смещения массы $x = ma_x / G_x$, которое содержит информацию об ускорении перемещения объекта с акселерометром.

По принципу измерения акселерометры делятся на приборы прямого и компенсационного измерения (действия, преобразования). Структурная схема акселерометра прямого измерения представляет собой последовательное соединение ЧЭ и элементов измерительной цепи. ЧЭ выполняет преобразование «ускорение – сила – перемещение», а измерительная цепь – преобразование «перемещение – выходной сигнал». Выходной сигнал может быть непрерывным или дискретным. ЧЭ включает массу (m) и систему подвеса (СП), а измерительная цепь – преобразователь перемещений (ПП) и усилитель постоянного тока (УПТ). В акселерометре компенсационного измерения (рис.4) на СП действует разность сил $\Delta F_x = F_x - F_{\delta\delta}$ ($F_x = ma_x$, $F_{\delta\delta}$ - уравновешивающая сила). Основными узлами компенсационного акселерометра, определяющими его метрологические характеристики, являются обратный преобразователь (ОП) и преобразователь «напряжение-ток» (ПНТ).

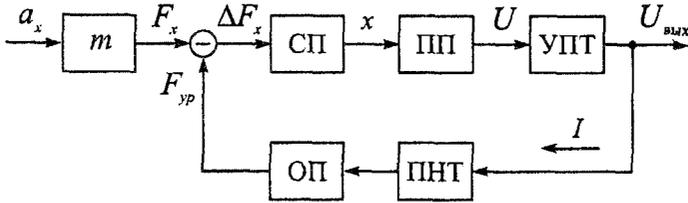


Рисунок 4 – Функциональная схема компенсационного акселерометра

Конструктивно-технологические решения, используемые в гироскопах и акселерометрах, обрабатывались десятилетиями, следствием чего является разработка большого числа различных типов гироскопов и акселерометров с широким спектром метрологических характеристик.

2. Системы ориентации

С математической точки зрения задача ориентации летательного аппарата (ЛА) относится к проблемам, связанным с вращательным движением материальных тел вокруг центра масс. Положение системы координат (СК) XYZ , связанной с ЛА, относительно географической СК – $X_g Y_g Z_g$ определено тремя углами Эйлера-Крылова: ψ , ϑ , γ . Применительно к ЛА углы Эйлера-Крылова называют соответственно углами рыскания ψ , тангажа ϑ и крена γ (рис. 5 б)). Знание углов ψ , ϑ , γ на борту ЛА решает задачу ориентации. Географическая система координат вращается в инерциальном пространстве с угловой скоростью, вызванной суточным вращением Земли U и угловыми скоростями изменения широты ϕ и долготы λ , обусловленными перемещением ЛА относительно сферической поверхности Земли (рис. 5а):

$$\dot{\phi} = V_{xg}/R, \quad \dot{\lambda} = V_{zg}/(R \cos \phi), \quad (1)$$

где R – радиус Земного шара,

V_{xg}, V_{zg} – северная и восточная составляющие линейной скорости ЛА.

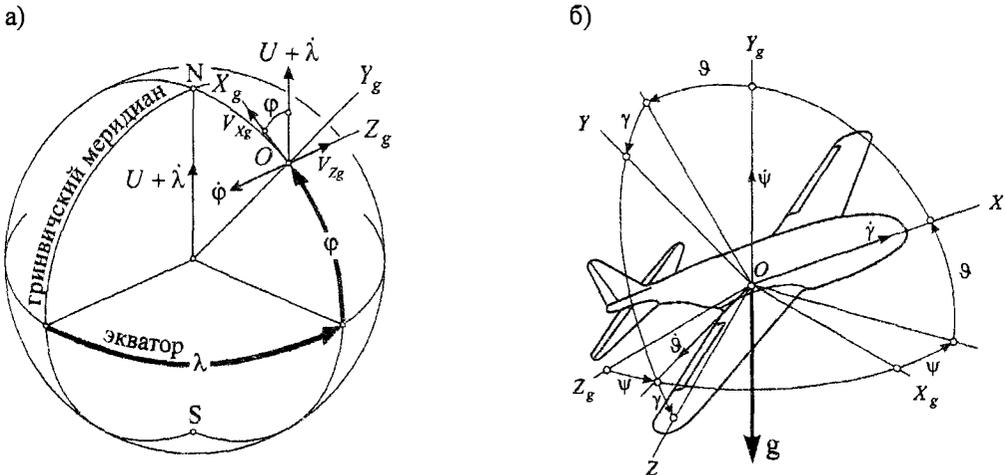


Рисунок 5 – Географическая и связанная системы координат
 а – положение географической системы координат относительно Земли,
 б – взаимное положение географической и связанной систем координат

Углы ψ , ϑ , γ могут быть определены с помощью двух трёхстепенных гироскопов, оси подвеса кардановых колец которых должны быть установлены параллельно осям связанной СК.

Задача ориентации решается также с помощью бесплатформенной системы ориентации (БСО), в которой используются три двухстепенных гироскопа – датчики угловых скоростей (ДУС), измеряющих проекции $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ вектора абсолютной угловой скорости ЛА на оси связанной СК.

В общем случае проекции вектора абсолютной угловой скорости ЛА можно представить в виде суммы переносной угловой скорости (1), обусловленной вращением Земли, а также перемещением ЛА вдоль ее поверхности, и относительной угловой скорости, обусловленной угловыми перемещениями ЛА относительно своего центра масс:

$$\left. \begin{aligned} \omega_x^r &= \dot{\psi} \sin \vartheta + \dot{\gamma}; \\ \omega_y^r &= \dot{\psi} \cos \vartheta \cos \gamma + \dot{\vartheta} \sin \gamma; \\ \omega_z^r &= -\dot{\psi} \cos \vartheta \sin \gamma + \dot{\vartheta} \cos \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На основании (2) могут быть получены дифференциальные уравнения:

$$\dot{\vartheta} = \omega_y^r \sin \gamma + \omega_z^r \cos \gamma; \quad \dot{\psi} = \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_y^r \cos \gamma - \omega_z^r \sin \gamma); \quad (3)$$

$$\dot{\gamma} = \omega_x^r - \operatorname{tg} \vartheta (\omega_y^r \cos \gamma - \omega_z^r \sin \gamma).$$

Уравнения (3) представляют собой, так называемые, кинематические уравнения с углами Эйлера-Крылова, позволяющие при заданных начальных значениях $\psi_0, \vartheta_0, \gamma_0$ и непрерывных определениях проекций $\omega_x^r, \omega_y^r, \omega_z^r$ определять текущие углы рыскания ψ , тангажа ϑ и крена γ , т.е. решать задачу ориентации ЛА. Структурная схема БСО приведена на рисунке 6 [4,6].

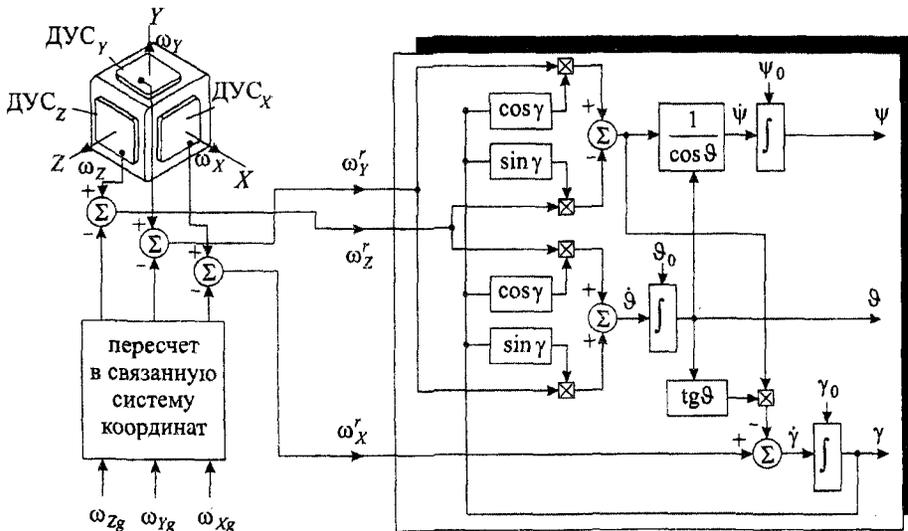


Рисунок 6 – Структурная схема бесплатформенной системы ориентации

Если не вводить в алгоритм работы БСО составляющие угловой скорости географической системы координат $\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}$, то бесплатформенная система ориентации эквивалентна двум свободным (некорректируемым) трёхстепенным гироскопам.

Для запуска алгоритма работы БСО необходимо осуществлять её начальную выставку, под которой понимается определение начальных углов $\psi_0, \vartheta_0, \gamma_0$. Угол ψ_0 может быть

определён с помощью магнитометрической системы. Углы ϑ_0, γ_0 могут быть определены по показаниям a_x, a_y, a_z акселерометров, оси чувствительности которых параллельны одноимённым осям связанной СК.

Недостатком алгоритма бесплатформенной системы ориентации с углами Эйлера-Крылова является нелинейность уравнений (3) по всем трём углам и неспособность решать задачу ориентации при угле тангажа равном 90° . Наиболее удобными являются параметры Родрига-Гамильтона. Кинематические уравнения в параметрах Родрига-Гамильтона линейны и интегрируемы при любых углах ψ, ϑ, γ .

3. Системы навигации

Инерциальные навигационные системы являются автономными. В качестве чувствительных элементов (датчиков) они используют акселерометры и гироскопы и вырабатываемая ими информация не зависит от внешних источников. Гироскопы и акселерометры могут размещаться на гиросtabilизированной платформе, либо непосредственно в своем конструктивном блоке устанавливаться в корпусе летательного аппарата. В первом случае инерциальная система навигации называется платформенной, а во втором – бесплатформенной инерциальной навигационной системой (БИНС).

Рассмотрим принцип действия бесплатформенной инерциальной навигационной системы при движении летательного аппарата вдоль плоскости меридиана сферической и невращающейся Земли [3].

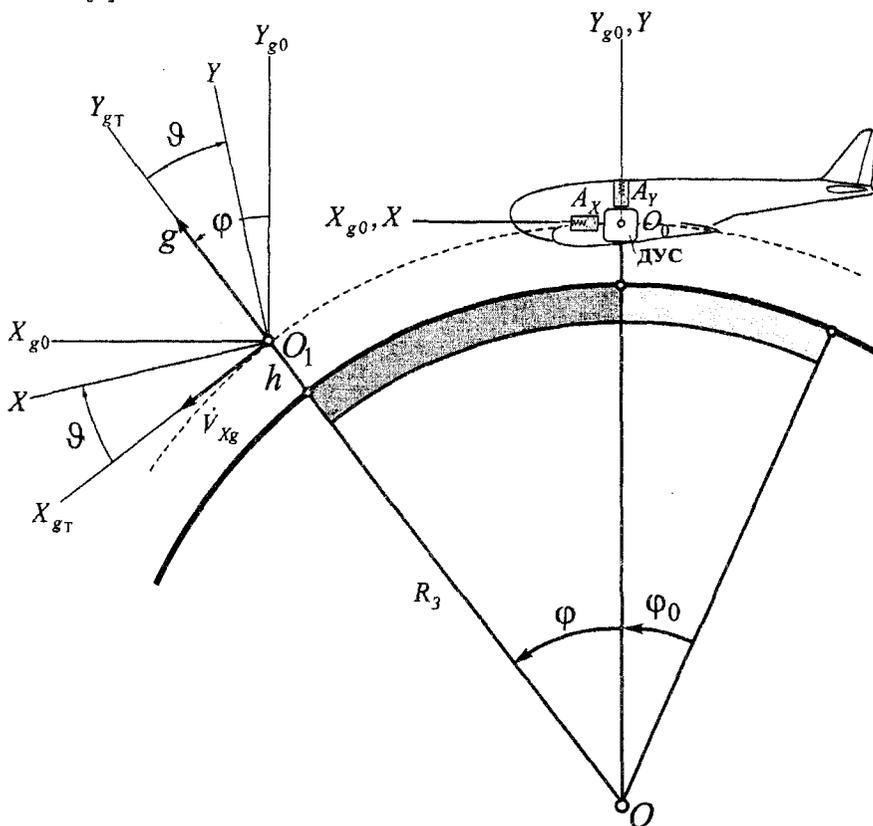


Рисунок 7 – К иллюстрации принципа работы БИНС

С исходным положением ЛА связана географическая система координат $X_g Y_g Z_g$ (рис. 7), где ось X_g лежит в плоскости горизонта и направлена на север, ось Y_g направлена

вдоль истинной вертикали вверх, Z_g направлена на восток (перпендикулярна плоскости рисунка). В начальный момент времени (точка O_0 на земной поверхности) координата и скорость ЛА известны и равны φ_0 и V_0 соответственно. С ЛА связана система координат XYZ , где ось X направлена по продольной оси ЛА, ось Z – вдоль поперечной оси, Y перпендикулярна плоскости крыльев и направлена вверх. Предполагается, что в начальный момент времени системы координат $X_g Y_g Z_g$ и XYZ совпадают.

На борту ЛА размещены два линейных акселерометра A_x и A_y , оси чувствительности которых направлены вдоль осей X и Y соответственно, и гироскопический датчик угловой скорости, измеряющий проекцию ω_z абсолютной угловой скорости ЛА.

Положим, что ЛА совершает горизонтальный полет и перемещается из точки O_0 в точку O_1 с координатой φ , которую необходимо определить. В точке O_1 показаны текущая и начальная ориентация осей $X_{g0} Y_{g0}$ и $X_g O Y_g O$ географической системы координат. Очевидно, что если известно направление истинной вертикали Y_{gO} в каждый момент времени, то задача навигации будет решена измерением угла между осями Y_{gO} и Y_{g0} . Таким образом, задача навигации и задача построения вертикали на борту подвижного объекта весьма близки по своему содержанию. Предположим, что в точке O_1 связанная система координат отклонена от географической на угол тангажа ϑ .

Акселерометры измеряют проекции кажущегося ускорения a на оси X и Y связанного трехгранника, совпадающего с осями чувствительности акселерометров. В соответствии с рисунком 7 проекции кажущегося ускорения на оси чувствительности акселерометров имеют вид:

$$a_x = \dot{V}_{Xg} \cos \vartheta + g \sin \vartheta ; \tag{4}$$

$$a_y = g \cos \vartheta - \dot{V}_{Xg} \sin \vartheta ,$$

где \dot{V}_{Xg} – ускорение ЛА в северном направлении;

g – ускорение силы тяжести.

Если осуществить обратный переход, т.е. перепроектировать показания акселерометров в географическую систему координат:

$$a_{xg} = a_x \cos \vartheta - a_y \sin \vartheta , \tag{5}$$

то можно определить линейное ускорение в северном направлении. После подстановки (4) в (5) следует:

$$a_{xg} = (\dot{V}_{Xg} \cos \vartheta + g \sin \vartheta) \cos \vartheta - (g \cos \vartheta - \dot{V}_{Xg} \sin \vartheta) \sin \vartheta = \dot{V}_{Xg} .$$

Таким образом, если имеется информация об угле ϑ , то перепроектировав показания акселерометров из связанной системы координат в географическую, можно найти проекцию ускорения \dot{V}_{Xg} . Последующее двукратное интегрирование ускорения \dot{V}_{Xg} позволит найти координату и скорость ЛА.

Задача определения угла ϑ между связанной и географической системой координат решается следующим образом. ДУС измеряет проекцию абсолютной угловой скорости ЛА (рис. 7)

$$\omega_z = \omega_{zg} + \dot{\vartheta} = -\dot{\varphi} + \dot{\vartheta} , \tag{6}$$

где ω_{zg} и $\dot{\vartheta}$ – переносная и относительная угловая скорость ребра z связанного трехгранника вокруг оси z_g (рис. 5).

Для того чтобы найти угол ϑ , необходимо предварительно исключить из показаний ДУС (6) переносную угловую скорость $\omega_{zg} = -\dot{\varphi}$. Тогда искомый угол ϑ определяется в результате интегрирования

$$\vartheta = \int_0^t (\omega_z - \omega_{zg}) dt + \vartheta_0 = \int_0^t \dot{\vartheta} dt + \vartheta_0,$$

где ϑ_0 – начальное значение угла тангажа.

Угловую скорость $\dot{\varphi}$ можно найти из алгоритма счисления координаты местоположения ЛА.

Функциональная схема северного канала БИНС, приведенная на рисунке 8, представляет собой, так называемый, алгоритм идеальной работы, когда акселерометры и гироскопы работают без погрешностей.

Вертикальный канал БИНС позволяет определить вертикальную скорость и высоту полета ЛА, если имеется вертикальная составляющая ускорения ЛА.

Особенностью вертикального канала является его неустойчивость (неограниченный рост ошибок), поэтому в автономном режиме он практически не используется.

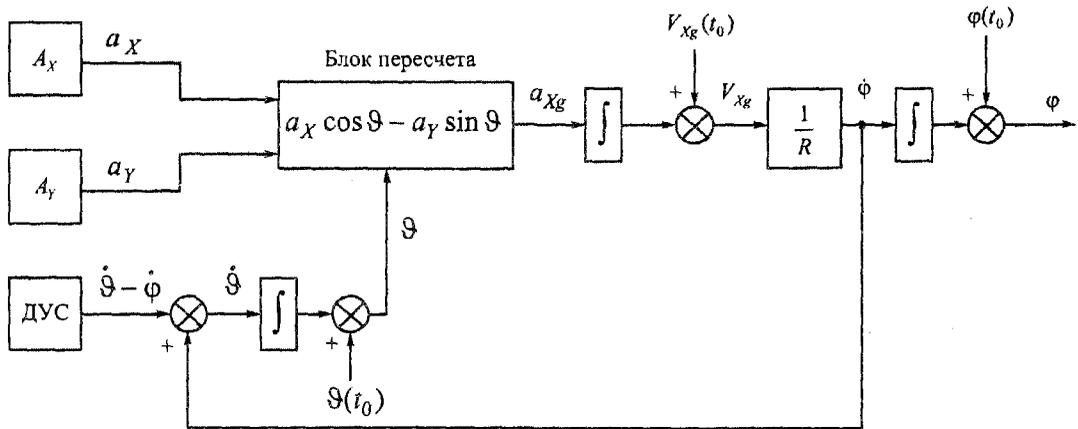


Рисунок 8 – Функциональная схема северного канала БИНС

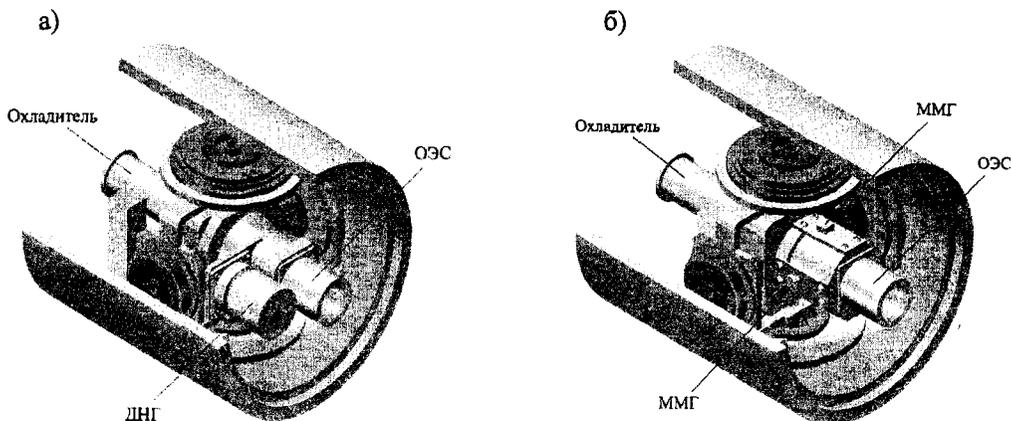
Независимо от типа и исполнения, инерциальные датчики имеют накапливаемую погрешность – дрейф. Поэтому точность определения навигационных параметров существенно зависит от времени полёта ЛА.

Устранение этого недостатка обеспечивается комплексированием БИНС со спутниковыми навигационными системами (СНС). В подобных комплексных (интегрированных) системах навигационные параметры вырабатывает СНС, по которым корректируется БИНС. Работа последней в автономном режиме происходит в моменты пропадания сигнала от СНС.

4. Системы стабилизации

Системы гироскопической стабилизации (гиростабилизаторы) в общем виде состоят из платформы (площадки и пр.) в кардановом подвесе, на которой установлены гироскопы, акселерометры и стабилизирующее устройство. На осях карданова подвеса расположены датчики угла и датчики момента (двигатели разгрузки, стабилизирующие двигатели). Гироскопы выполняют функцию измерения отклонений платформы со стабилизируемым объектом от заданного положения. Сигналы поступают на соответствующие датчики момента, которые возвращают платформу в прежнее положение. Акселерометры выполняют функцию первоначальной выставки платформы, а также её коррекцию по вертикали места. Акселерометры сами могут быть объектами стабилизации [5].

В качестве примера на рисунке 9 показаны 3D-модели оптической головки самонаведения (ГСН) на базе двухосного индикаторного гиросtabilизатора (ГС). ГСН включает оптико-электронную систему (ОЭС) с охладителем. В качестве чувствительных элементов отклонений ГС могут использоваться динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ), микромеханические гироскопы (ММГ) и другие. Сигналы с датчиков угла по осям вращения карданова подвеса поступают на рулевые органы управления ракетой, в которой установлена ГСН. Подавая сигналы на датчики момента, можно управлять положением ГСН.



*Рисунок 9 – 3D-модели оптической ГСН на базе двухосного индикаторного гиросtabilизатора с чувствительными элементами
а – ДНГ; б- ММГ*

Принцип гироскопической стабилизации имеет широкое и разнообразное применение в морской, воздушной и космической навигации, в военной технике, на транспорте, включая, например, двухколёсные самокаты (сегвеи) и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бранец, В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.:Наука, 1992. – 280с.
2. Джашизов, В.Э. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / В.Э. Джашизов, В.М. Панкратов. – Под. общей ред. академика РАН В.Г. Пешехонова.- Спб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – 401с.
3. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – Под ред. В.Я. Распопова.- Спб.: ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2009.- 300с.
4. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов. Под ред. В.Я. Распопова.- М.: Машиностроение, 2011. – 180с.
5. Неусыпин, А.К. Гироскопические приводы / А.К. Неусыпин. – М.: Машиностроение, 1978. – 192с.
6. Распопов, В.Я. Микросистемная авионика / В.Я. Распопов. – Тула:Гриф и К, 2010. – 247с.

Распопов Владимир Яковлевич

Тульский государственный университет, г.Тула
Д-р техн. наук, профессор, зав.каф. «Приборы управления»
Тел.+7(4872) 35-19-59
E-mail: tgupu@yandex.ru

V. Ya. RASPOPOV

**INERTIAL SENSORS AND SYSTEMS OF ORIENTATION,
STABILIZATION AND NAVIGATION**

This article is devoted to main types of inertial sensors and designs principles for data-measuring and control systems of orientation, stabilization and navigation

Keywords: *inertial sensors, a gyroscope, an accelerometer, an orientation, a stabilization, a navigation, an integration.*

BIBLIOGRAPHY

1. Branec, V.N. Vvedenie v teoriju besplatformennyh inercial'nyh navigacionnyh sistem / V.N. Branec, I.P. Shmyglevskij. – M.: Nauka, 1992. – 280s.
2. Dzhashitov, V. Je. Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo i morskogo priborostroenija v us-lovijah teplovyh vozdeystvij / V. Je. Dzhashitov, V.M. Pankratov. – Pod. obvej red. akademika RAN V.G. Peshe-honova.- Spb.: CNII «Jelektropribor», 2005. – 401s.
3. Matveev, V.V. Osnovy postroenija besplatformennyh inercial'nyh navigacionnyh sistem / V.V. Matveev, V.Ja. Raspopov. – Pod red. V.Ja. Raspopova.- Spb.: GNC CNII «Jelektropribor», 2009.- 300s.
4. Mikrosistemy orientacii bescpilotnyh letatel'nyh apparatov. Pod red. V.Ja. Raspopova.- M.: Ma-shinostroenie, 2011. – 180s.
5. Neusypin, A.K. Giroskopicheskie privody / A.K. Neusypin. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 192s.
6. Raspopov, V.Ja. Mikrosistemnaja avionika / V.Ja. Raspopov. – Tula: Grif i K, 2010. – 247s.

Raspopov Vladimir Yakovlevich

Tula state university, Tula

Doctor of technical sciences, professor, chairholder of “Control instrument”

Tel.: 4872-35-19-59

E-mail: tgupu@yandex.ru

УДК 620.179.1.082.7

А.В. СЕЛИХОВ, М.В. МАЙОРОВ, В.Н. ЧЕРНЫШОВ, В.В. МИШИН

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПОРЫ КАЧЕНИЯ

В данной статье рассматривается возможность применение экспертной системы для контроля качества опоры качения. В качестве физического принципа, используемого для получения измерительной информации, используется преобразование акустического сигнала в цифровой.

Ключевые слова: акустика, звук, подшипник качения, экспертная система.

Одной из задач обеспечения качества продукции в области машиностроения является контроль и диагностика опор качения с целью выявления бракованных изделий, определения степени износа и определения возможного времени работы на отказ. Для получения измерительной информации из зоны трения опоры качения нашли широкое применение такие методы контроля, как: электрорезистивный, основанный на контроле электрического сопротивления объекта контроля; температурный, в котором информацию о качестве объекта несет температура поверхностей; электромагнитный, когда изучается внутренняя структура объекта; акустический – диагностическая информация извлекается из упругих волн, распространяющихся в опоре качения и которые вызваны различного рода дефектами, как внутренними, так и находящимися на поверхности. В отечественном авиастроении до сих пор используется органолептический способ контроля опор качения на основе выявления дополнительных акустических составляющих, возникающих в результате появления в опоре качения дефектов. Данный способ контроля является простым и дешевым, тем не менее, присутствует влияние человеческого фактора на результат диагностики, поэтому была поставлена задача о возможности автоматизации процесса контроля опоры качения, принятия суждения о качестве объекта.

Вначале требуется определиться с информационным параметром, который будет использоваться. Так как акустический контроль на основе использования звук волн слышимого диапазона использовался успешно в отечественном машиностроении, то предлагается использовать этот способ контроля. Современные микрофоны охватывают диапазон частот от 20 Гц,

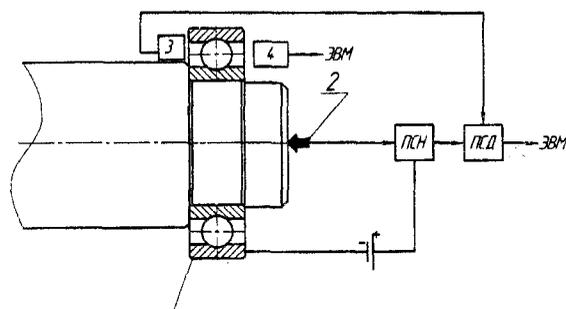


Рисунок 1 – Структурная схема

до 80 кГц [1], что является необходимым и достаточным для замены органолептического способа измерения на инструментальный. Далее требуется определить, описывает ли данный способ процессы, проходящие в зоне трения, для этого было проведено экспериментальное исследование.

Объектом исследования является подшипник марки 1000900, радиальная нагрузка 80 Н, масло И-20, скорость вращения – 300 об/мин, микрофон Genius Mic-01/A, датчик вибрации ДН-3, цифровой осцилло-

граф DSO-2090. Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Принцип измерения заключается в следующем: на испытуемый подшипник 1 через токосъемник 2 подается электрическое от источника напряжение. На входной цепи преобразователя сопротивление-напряжение (ПСН) при работе подшипника образуется электрический сигнал, пропорциональный сопротивлению (проводимости) подшипника. Одновременно с сигналом сопротивления с наружного кольца подшипника качения регистрируется вибросигнал. Акустический сигнал регистрируется преобразователем 4. ПСД осуществляет сбор данных о сопротивлении и вибрации и передает их в ЭВМ.

На рисунке 2 представлены относительные спектры полученных сигналов.

На рисунке 2, а – 2, в представлены полные спектры сигналов, а на рисунке 2, г – 2, д представлены увеличенные части спектров в диапазоне частот от 0 Гц до 100 Гц, для лучшей

визуализации данных. На спектрах видно совпадение спектральных составляющих. Так как сигналы сопротивления и вибрации достоверно описывают физические процессы в зоне трения [2, 3], то так как акустический сигнал с ними коррелирован, то это говорит о достоверности полученного акустического сигнала.

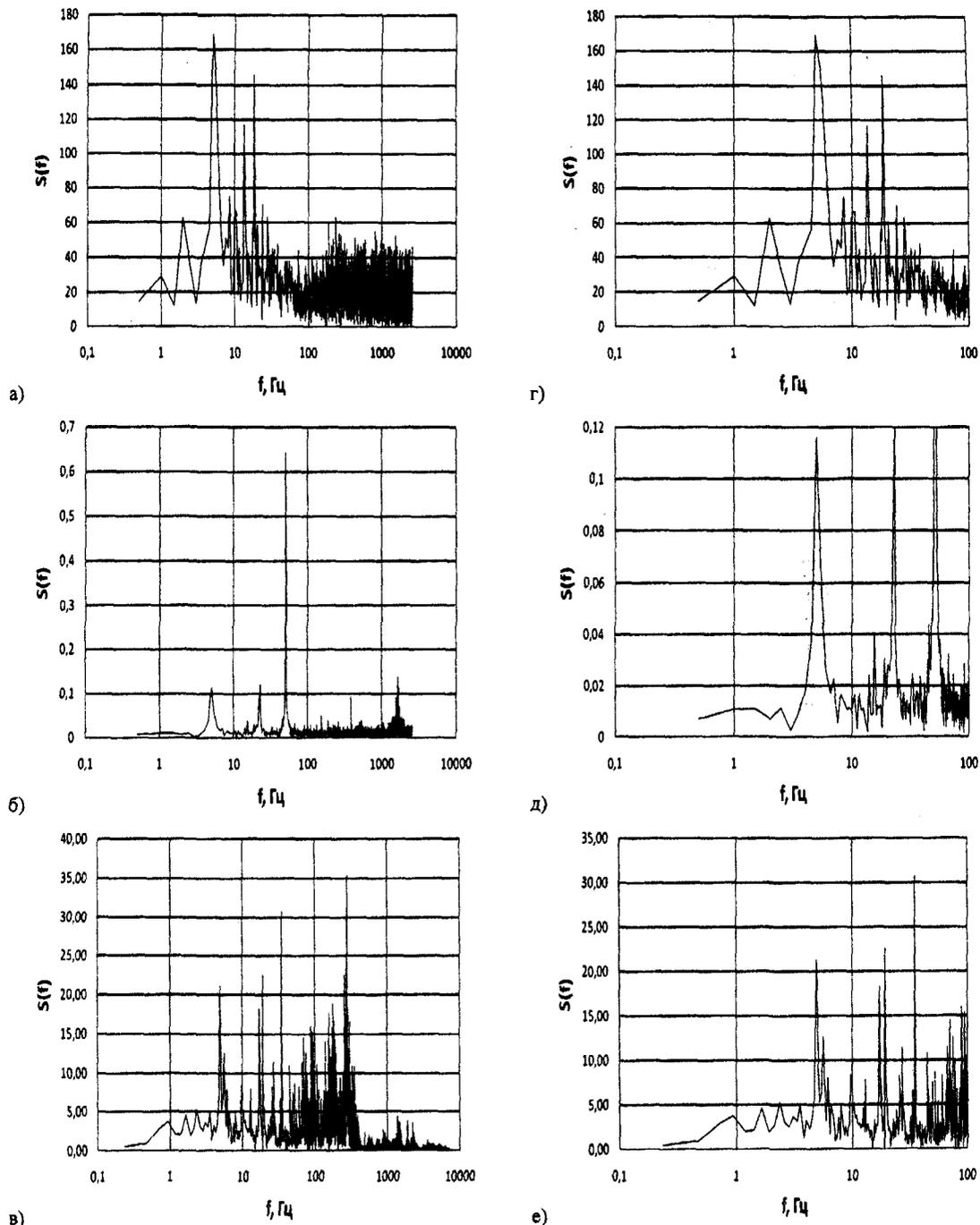


Рисунок 2 – Относительные спектры сигналов сопротивления, вибрации, шума

- а) – спектр сопротивления, б) – спектр вибрации, в) – спектр шума,
- г) – спектр сопротивления в диапазоне частот от 0 Гц до 100 Гц,
- д) – спектр вибрации в диапазоне частот от 0 Гц до 100 Гц,
- е) – спектр шума в диапазоне частот от 0 Гц до 100 Гц

Помимо получения измерительной информации требуется провести её анализ, так как целью стоит автоматизация процесса контроля, то необходима система принятия решения о степени соответствия исследуемого образца контрольному. В настоящее широкое применение нашли экспертные системы. Это компьютерные программы, призванные частично заменить специалиста-эксперта в разрешении определенной проблемы.

Экспертная система включает в себя базу знаний, которая состоит из правил анализа информации, которую вводит пользователь по данной проблеме, информация анализируется и формируется рекомендация по решению проблемы, в рамках решаемой в статье задачи результатом работы системы будет суждение о степени пригодности опоры качения к дальнейшему использованию.

Задача по выявлению соответствия акустического сигнала образца исследуемого и контрольного решается в области биометрии по голосу. Одним из эффективных параметров, несущих измерительную информацию, является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) акустического сигнала. Проводя аналогию между решаемыми задачами целесообразно использовать этот же параметр и для контроля опор качения.

Суть метода заключается в следующем: на основе акустического сигнала строится спектр амплитуд для исследуемого образца и для контрольного, в идеальном случае, если они находятся в одинаковом состоянии, то спектры совпадают, если нет, то состояние образца отличается от заданного и он не пригоден для дальнейшего использования. На практике не может быть получено два одинаковых спектра, практически всегда будет присутствовать некоторое различие, вызванное как погрешностью измерения, так и несущественными дефектами образца, но при этом, при наличии дефектов он годен к эксплуатации. В области биометрии при анализе сигналов используется доверительный интервал, в пределах которого должна лежать разница сигналов, а непосредственно сам интервал подбирается опытным путем. В случае технической диагностики, если разница сигналов превышает определенный эмпирически и заданный заранее диапазон, то выносится суждение о несоответствии контролируемого объекта контрольному, а следовательно, о его непригодности для дальнейшего использования. Изменяя разницу диапазон, в пределах которого может лежать разница сигналов, можно определять степень износа опоры качения. Так же, помимо сравнения с контрольным объектом, может проводиться анализ сигнала с целью определения качественных параметров, позволяющих определить состояние опоры качения. Структурная схема устройства приведена на рисунке 3.

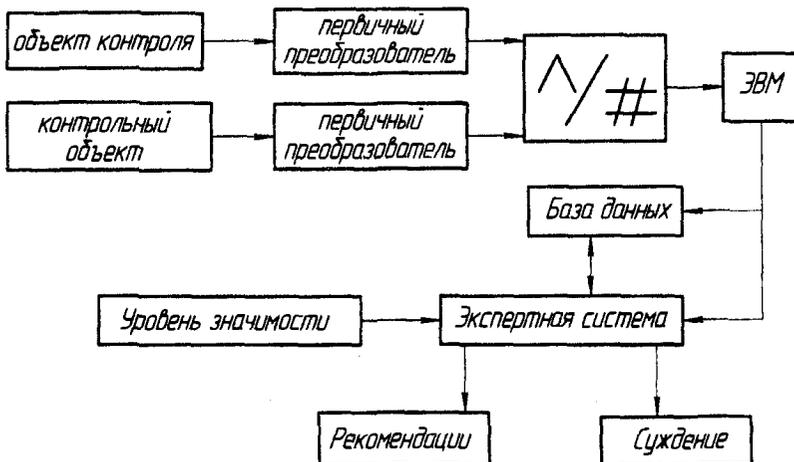


Рисунок 3 – Структурная схема контролирующей системы

Акустический сигнал с объекта контроля, опоры качения, и с контрольного объекта поступает на первичный преобразователь, преобразующий сигнал в напряжение. Аналоговый сигнал поступает на аналогово-цифровой преобразователь, с которого цифровой код,

имеющий функциональную зависимость с акустическим сигналом, поступает на вход компьютера для дальнейшей обработки. Сигналы записываются в базу данных для накопления статистических данных. Сигнал текущего исследования и сигналы из базы данных поступают в экспертную систему для обработки. Уровень значимости заносится в систему на начальных этапах работы системы для подбора оптимального значения, после чего его значение будет неизменным и повторный ввод его в систему не потребуются. Результатом работы системы будет суждение о степени пригодности исследуемого объекта для дальнейшей работы и рекомендации о дальнейшем его использовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преполяризованные конденсаторные микрофоны [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://novatest.ru/equipment/1013/1139/1163>
2. Селихов, А.В. Исследование работы подшипника по параметрам его электрического сопротивления [Текст] / А.В. Селихов, В.В. Мишин, К.В. Подмастерьев, В.В. Семенов, М.В. Майоров, В.Н. Чернышов, К.В. Шаталов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2010. - №5-2/(283). – с. 108-116.
3. Селихов, А.В. Экспериментальное исследование электрического сопротивления (проводимости) подшипника качения как диагностического параметра [Текст] / А.В. Селихов, В.В. Мишин, М.В. Майоров, А.А. Катыхин, К.В. Шаталов, В.И. Некрасов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2010. - №6-2/(284). – с. 25-34.

Селихов Алексей Владимирович
Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Аспирант кафедры «ПМиС»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-76

Майоров Максим Валерьевич
Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Аспирант кафедры «ПМиС»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: stigmoto@gmail.ru

Чернышов Виктор Николаевич
Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Аспирант кафедры «ПМиС»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: vikorbit@gmail.com

Мишин Владислав Владимирович
Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Канд. техн. наук, доцент кафедры «ПМиС»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail : vlad89290@gmail.com

A.V. SELIHOV, M.V. MAYOROV, V.N. CHERNYSHOV, V.V. MISHIN

QUALITY CONTROL SYSTEM OF SUPPORT ROLLING

In this paper was considered the possibility of using expert system for quality control of support rolling. The physical principle which was used for getting measurement information was the transformation of acoustic signals in to digital.

Keywords: acoustics, sound, ball bearings, an expert system.

BIBLIOGRAPHY

1. Prepoljarizovannye kondensatornye mikrofony [Elektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: <http://novatest.ru/equipment/1013/1139/1163>

2. Selihov, A.V. Issledovanie raboty podshipnika po parametram ego jelektricheskogo soprotivlenija [Tekst] / A.V. Selihov, V.V. Mishin, K.V. Podmaster'ev, V.V. Semenov, M.V. Majorov, V.N. Chernyshov, K.V. Shatalov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. - №5-2/(283). – s. 108-116.

3. Selihov, A.V. Jeksperimental'noe issledovanie jelektricheskogo soprotivlenija (provodimosti) podshipnika kachenija kak diagnosticheskogo parametra [Tekst] / A.V. Selihov, V.V. Mishin, M.V. Majorov, A.A. Katyhin, K.V. Shatalov, V.I. Nekrasov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. - №6-2/(284). – s. 25-34.

Selihov Aleksey Vladimirovich

State University ESPC

Post-graduate student, chair "PMiS"

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 4862-41-98-76

Mayorov Maksim Valerievich

State University ESPC

Post-graduate student, chair "PMiS"

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 4862-41-98-76

E-mail: stigmoto@gmail.ru

Chernyshov Viktor Nikolaevich

State University ESPC

Post-graduate student, chair "PMiS"

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 4862-41-98-76

E-mail: vikorbit@gmail.com

Mishin Vladislav Vladimirovich

State University ESPC

Candidate of technical sciences, associated professor, chair "PMiS"

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 4862-41-98-76

E-mail: vlad89290@gmail.com

А.В. НИКИТИН, В.В. СОЛДАТКИН

СТАРТОВАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА И СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕКТОРА ВОЗДУШНОЙ СКОРОСТИ ОДНОВИНТОВОГО ВЕРТОЛЕТА

Рассматриваются особенности построения и алгоритмы обработки первичной информации стартовой системы измерения величины и направления ветра на стоянке, при движении и маневрировании по земной поверхности, составляющих вектора истинной воздушной скорости на взлетно-посадочных режимах и на режиме висения.

Ключевые слова: вертолет, малые воздушные скорости, величина и направление ветра, измерение, система, стоянка, руление, взлетно-посадочные режимы.

Анализ статистических данных авиационных происшествий одновинтовых вертолетов [1] показывает, что значительная их часть связана с опрокидыванием вертолета набок на стоянке и на этапах запуска силовой установки, руления, висения, взлета и посадки при превышении летных ограничений по величине и направлению вектора скорости ветра, с соударением лопастей рулевого винта с земной поверхностью в случае резкого гашения поступательной скорости, а также маневрирования вертолета на предельно малых высотах при висении и в момент приземления, с уменьшением тяги рулевого винта при боковом ветре, со столкновением с землей и/или опрокидыванием вертолета в результате его непреднамеренного снижения с малой высоты со смещением относительно земной поверхности – из-за отсутствия на борту системы измерения метеорологических параметров (температуры наружного воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра).

Все это определяет актуальность создания стартовой системы измерения малых воздушных скоростей одновинтового вертолета, обеспечивающей:

- измерение величины W и направления ψ вектора скорости ветра W относительно продольной оси вертолета или продольной W_x и боковой W_z составляющих вектора W , а также абсолютного давления P_{H_0} и температуры наружного воздуха T_{H_0} на стоянке до запуска силовой установки и раскрутки трансмиссии вертолета (стояночный режим);
- измерение параметров вектора скорости ветра W при запуске силовой установки, раскрутке трансмиссии и вращении несущего винта вертолета, в процессе руления и маневрирования по земной поверхности;
- измерение параметров вектора истинной воздушной скорости V_v (величины (модуля) V_v , угла скольжения β и угла атаки α), абсолютной H и относительной $H_{отн}$ высот и вертикальной скорости $V_y = dH/dt$ при взлете и посадке, при снижении и заходе на посадку, определение продольной W_x и боковой W_z составляющих вектора скорости ветра W на режиме висения при работе силовой установки, вращении несущего винта и работе автомата перекоса (взлетно-посадочный режим).

Необходимо отметить следующие особенности указанных режимов работы стартовой системы измерения малых воздушных скоростей одновинтового вертолета.

1. На стояночном режиме до запуска силовой установки и отсутствии вращения несущего винта отсутствуют возмущения, обусловленные индуктивными потоками несущего винта вертолета. Приемники аэрометрической информации воспринимают невозмущенное статическое давление P_H и температуру окружающей среды T_H , а также параметры вектора скорости ветра W .

2. На режиме маневрирования на земле на работу стартовой системы измерения малых воздушных скоростей вертолета оказывают существенное влияние индуктивные, а также воздушные потоки, отраженные от земной поверхности и от фюзеляжа, что делает невоз-

можным восприятие статического давления P_H , а следовательно, точное определение абсолютной H и относительной $H_{отн}$ высот и вертикальной скорости $V_y = dH / dt$.

3. На взлетно-посадочных (полетных) режимах на работу стартовой системы измерения малых воздушных скоростей одновинтового вертолета оказывают влияние индуктивные потоки несущего винта, что также затрудняет восприятие невозмущенных параметров набегающего воздушного потока в диапазоне малых и околонулевых скоростей, когда приемники аэрометрической информации находятся в створе вихревой колонны несущего винта.

Учитывая специфику работы стартовой системы измерения малых воздушных скоростей одновинтового вертолета, предложено построить ее на основе неподвижного, многоканального, пространственно распределенного (комбинированного) аэрометрического приемника с использованием информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта [2, 3], схема которого приведена на рисунке 1.

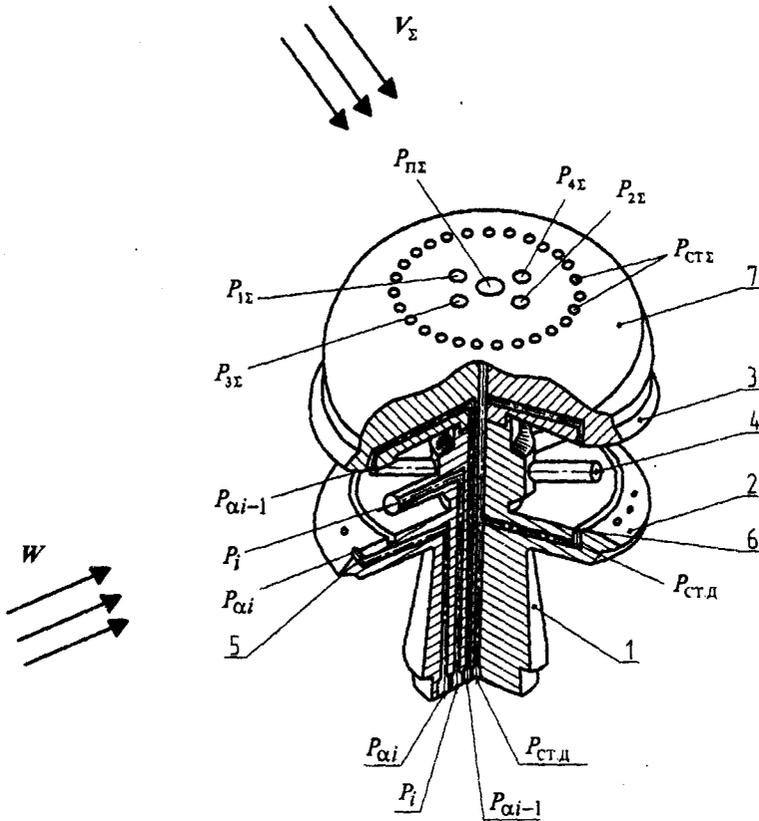


Рисунок 1 – Конструктивная схема неподвижного комбинированного аэрометрического приемника

Комбинированный аэрометрический приемник содержит неподвижный многоканальный аэрометрический приемник 1, выполненный в виде двух разнесенных по высоте экранирующих дисков 2 и 3, между внутренними профилированными поверхностями которых в азимутальной плоскости под одинаковыми углами расположены трубки полного давления 4 для забора давлений P_i , определяющих величину W и горизонтальный угол направления ψ вектора ветра W на стояночном режиме до запуска силовой установки несущего винта. На внутренних поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены кольцевые каналы 6 для забора дросселированного статического давления $P_{ст.д}$ при наличии ветра. На внутренних профилированных поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены отверстия для за-

бора давлений P_{ai} и P_{ai-1} , определяющих угол ветра в вертикальной плоскости.

Для восприятия аэрометрической информации на режиме маневрирования по земле и на взлетно-посадочных (полетных) режимах при вращении несущего винта вертолета, когда неподвижный комбинированный аэрометрический приемник находится в створе вихревой колонны несущего винта, на наружной поверхности экранирующего диска 3 установлен дополнительный аэрометрический приемник 7 в виде полусферы с диаметром, равным диаметру верхнего экранирующего диска. На поверхности полусферы на оси симметрии расположено отверстие, являющееся приемником полного давления $P_{н\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны, определяемой вектором скорости V_2 . В плоскости, параллельной плоскости симметрии вертолета, под углом φ_{01} к оси симметрии, симметрично расположены отверстия, являющиеся приемниками давлений P_1 и P_2 . В плоскости, перпендикулярной плоскости симметрии вертолета, под углом φ_{02} к оси симметрии, расположены отверстия, являющиеся приемниками давлений P_3 и P_4 . Перпендикулярно оси симметрии сферического приемника, на его поверхности по окружности расположены отверстия, являющиеся приемниками статического давления $P_{ст}$ результирующего набегающего воздушного потока колонны.

Тогда при маневрировании по земле и на взлетно-посадочных (полетных) режимах, за меру величин составляющих вектора скорости ветра W и вектора истинной воздушной скорости V_s вертолета принимается угловое положение воздушного потока вихревой колонны, определяемое углами скоса $\alpha_{вк} = 90^\circ - \varphi_1$ и $\beta_{вк} = 90^\circ - \varphi_2$, которые регистрируются ортогонально расположенными приемниками давлений P_1 и P_2 , P_3 и P_4 .

Давления P_1 и P_2 , P_3 и P_4 , $P_{н\Sigma}$ и $P_{ст}$ воспринимаемых дополнительным аэрометрическим приемником, подключены ко входам пневмоэлектрических преобразователей 4 (рис. 2), выходы которых через последовательно соединенные мультиплексор 5 и аналого-цифровой преобразователь 6 подключены к микропроцессору 7. На вход мультиплексора 5 через электроизмерительную схему 8 также подключены выходы приемника температуры торможения $T_{т\Sigma}$ результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны несущего винта и выходы пневмоэлектрических преобразователей 4, на входы которых подаются давления P_i , P_{ai} , P_{ai-1} , $P_{ст.д}$ воспринимаемые неподвижным, многоканальным, проточным аэрометрическим приемником 1.

Приемник температуры торможения $T_{т\Sigma}$ устанавливается на фюзеляже вертолета в зоне действия результирующего набегающего потока вихревой колонны. Выход микропроцессора является выходом аэрометрического канала по величине W и направлению ψ (или продольной W_x и боковой W_z составляющим вектора скорости ветра W); истинной воздушной скорости V_s , углам атаки α и скольжения β , барометрической высоте H , составляющим V_x , V_y , V_z вектора V_s истинной воздушной скорости в осях связанной системы координат, приборной воздушной скорости $V_{пр}$ – на стоянке, при рулении и маневрировании по земной поверхности, в области малых и околонулевых скоростей полета и на режиме висения, когда неподвижный комбинированный аэрометрический приемник находится в зоне вихревой колонны несущего винта.

Неподвижный комбинированный аэрометрический приемник устанавливается на фюзеляже вертолета в зоне действия вихревой колонны несущего винта. Ось симметрии комбинированного аэрометрического приемника направлена вверх, при этом плоскость, проходящая через отверстия для забора давлений P_1 и P_2 , параллельна плоскости симметрии вертолета, а плоскость проходящая через отверстия для забора давлений P_3 и P_4 , ортогональна плоскости симметрии вертолета.

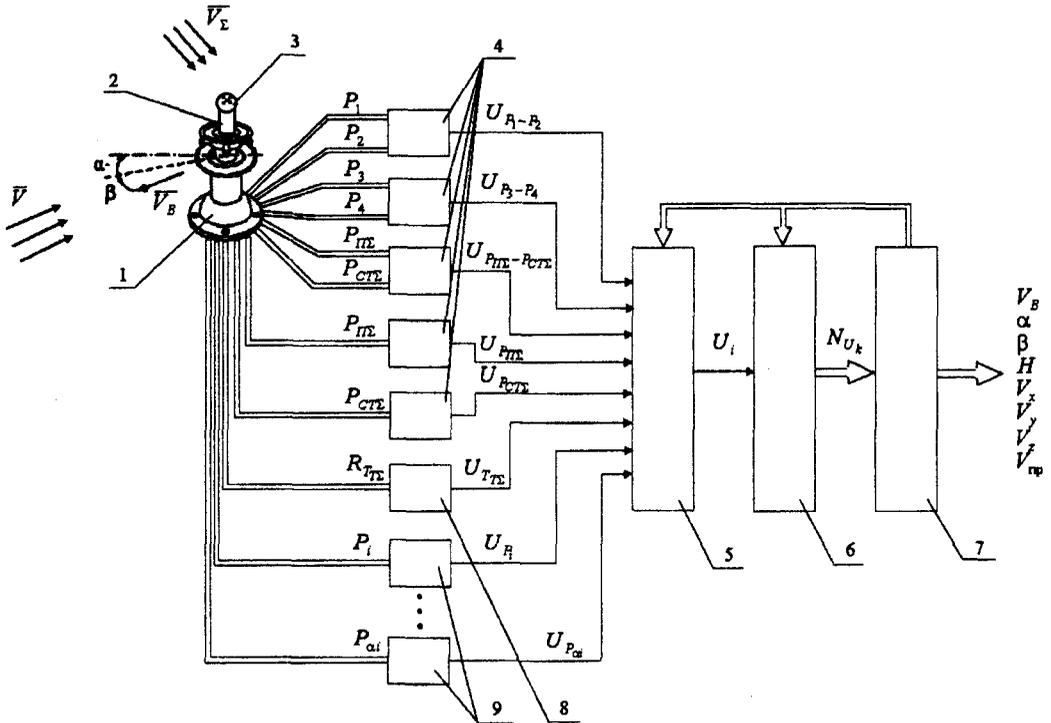


Рисунок 2 – Принципиальная схема стартовой системы измерения малых воздушных скоростей одновинтового вертолета

На стояночном режиме величина W и угол направления ψ , а следовательно, продольная W_x и боковая W_z составляющие вектора скорости ветра W , а также статическое давление P_{H_0} определяются по давлениям P_i и $P_{ст.д.}$, воспринимаемым посредством трубок полного давления и кольцевого приемника дросселированного статического давления.

В основу алгоритмов обработки первичной аэрометрической информации в виде давлений P_i и $P_{ст.д.}$, приведенных в работе [4], положены особенности угловых характеристик трубок полного давления, которые обеспечивают получение информации по величине W и направлению ψ вектора скорости ветра W , по статическому давлению P_{H_0} . По показаниям приемника температуры торможения определяется температура T_{H_0} наружного воздуха.

При работе двигательной установки и раскрутки трансмиссии, при рулении и маневрировании по земной поверхности, на взлетно-посадочных режимах, при снижении и на режиме висения, за меру величин составляющих вектора скорости ветра W и вектора истинной воздушной скорости V_a вертолета принимается угловое положение вектора скорости V_z результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, которое регистрируется ортогонально расположенным приемникам давлений P_1 и P_2, P_3 и P_4 полусферического аэрометрического приемника.

Когда неподвижный комбинированный аэрометрический приемник находится в створе вихревой колонны несущего винта вертолета, вектор скорости V_z результирующего воздушного потока вихревой колонны представим в виде трех составляющих: стационарной составляющей V , обусловленной поступательным движением вертолета относительно окружающей воздушной среды или действием вектора скорости ветра W , стационарной составляющей V_i индуктивного воздушного потока несущего винта и флуктуационной составляющей

шей V_ϕ , обусловленной маховыми движениями лопастей и работой автомата перекося и приводящей к пульсациям скорости V_Σ и углов скоса вихревой колонны в интервале порядка $\pm 2...3^\circ$ [5]. Круговые частоты ω_ϕ флюктуационных составляющих вектора V_ϕ кратны произведению $N_n \omega_n$ числа лопастей N_n и угловой скорости ω_n вращения несущего винта, поэтому вектор V_ϕ флюктуационной составляющей вектора скорости V_Σ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта может быть отфильтрован от двух других составляющих V и V_i .

Тогда в качестве информативного параметра аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта вертолета можно использовать вектор скорости V_Σ в виде геометрической суммы стационарных составляющих вектора скорости V воздушного потока, формируемого движением вертолета относительно окружающей среды или вектором скорости ветра W , и вектора скорости V_i индуктивного воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, то есть

$$V_\Sigma = V + V_i.$$

Для конкретного места установки комбинированного аэрометрического приемника на фюзеляже вертолета составляющие V_{ix}, V_{iy}, V_{iz} вектора V_i в связанной системе координат можно описать уравнениями вида [5]:

$$V_{ix} = K_{ix} \sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}}; \quad V_{iy} = K_{iy} \sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}}; \quad V_{iz} = K_{iz} \sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}},$$

где K_{ix}, K_{iy}, K_{iz} – безразмерные коэффициенты, зависящие от величины (модуля) вектора скорости V невозмущенного воздушного потока, равного по величине $V = V_B$, а также от углов атаки α и скольжения β , других параметров полета вертолета, и которые определяют

ся при летных испытаниях; $\sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}} = V_{i0}$ – модуль вектора \bar{V}_i скорости индуктивного пото-

ка на режиме висения ($V=0$); G – текущий вес вертолета; $n_y = \frac{1}{g} \frac{d^2 H}{dt^2} - 1$ – нормальная пере-

грузка; ρ_H – плотность невозмущенного воздушного потока на данной высоте H ; F – площадь, ометаемая несущим винтом вертолета; χ – коэффициент заполнения (коэффициент потерь) диска несущего винта; $g=9,80665$ – ускорение свободного падения.

Величину V_Σ скорости и плотность ρ_Σ результирующего набегающего воздушного потока можно определить по полному $P_{n\Sigma}$ и статическому $P_{ст\Sigma}$ давлениям и температуре $T_{т\Sigma}$ заторможенного результирующего воздушного потока, воспринимаемой приемником температуры торможения, встроенным в приемник полного давления, используя стандартные зависимости:

$$V_\Sigma = 44,826 \sqrt{\frac{T_{т\Sigma} \left[\left(\frac{P_{n\Sigma}}{P_{ст\Sigma}} \right)^{0,2857143} - 1 \right]}{\left(\frac{P_{n\Sigma}}{P_{ст\Sigma}} \right)^{0,2857143}}}; \tag{1}$$

$$\rho_\Sigma = \frac{P_{ст\Sigma}}{287,05287 T_{т\Sigma}} \left(\frac{P_{n\Sigma}}{P_{ст\Sigma}} \right)^{0,2857143}, \tag{2}$$

где параметры, входящие в формулы (1) и (2), имеют размерности в единицах системы СИ.

Используя соотношение (1), по давлениям $P_{н\Sigma}$, $P_{ст\Sigma}$ и температуре $T_{т\Sigma}$ можно определить модуль V_{Σ} и проекции вектора V_{Σ} результирующего воздушного потока на оси связанной с вертолетом системы координат как

$$V_{\Sigma x} = V_{\Sigma} \cos \alpha_{вк} \cos \beta_{вк} = V_{\Sigma} \cos(90^{\circ} - \varphi_1) \cos(90^{\circ} - \varphi_2);$$

$$V_{\Sigma y} = V_{\Sigma} \sin \alpha_{вк} \cos \beta_{вк} = V_{\Sigma} \sin(90^{\circ} - \varphi_1) \cos(90^{\circ} - \varphi_2);$$

$$V_{\Sigma z} = V_{\Sigma} \sin \beta_{вк} = V_{\Sigma} \sin(90^{\circ} - \varphi_2),$$

где $\varphi_1 = 90^{\circ} - \alpha_{вк}$ и $\varphi_2 = 90^{\circ} - \beta_{вк}$ – углы, определяющие положение вектора V_{Σ} результирующего набегающего потока вихревой колонны относительно осей приемников давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 .

Поскольку комбинированный аэрометрический приемник расположен на фюзеляже на определенном радиусе-векторе R от центра масс вертолета, то при вращении вертолета относительно центра масс имеет место кинематическое искажение вектора скорости V невозмущенного воздушного потока, набегающего на приемник, которое определяется уравнением вида

$$V_k = V + \omega \times R(x, y, z),$$

где V_k – кинематически искаженный вектор скорости набегающего воздушного потока в месте установки аэрометрического приемника; $\omega(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – вектор угловой скорости вращения вертолета относительно центра масс; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости вращения вертолета относительно осей связанной системы координат; x, y, z – координаты места установки аэрометрического приемника в связанной системе координат, центр которой находится в центре масс вертолета.

Проекции вектора скорости V_k на оси связанной системы координат будут определяться системой уравнений вида

$$V_{kx} = V_x + (\omega_y z - \omega_z y); \quad V_{ky} = V_y + (\omega_z x - \omega_x z); \quad V_{kz} = V_z + (\omega_x y - \omega_y x).$$

По давлениям P_1, P_2 и P_3, P_4 , воспринимаемым отверстиями, расположенными на верхней поверхности полусферического приемника (рис. 1), можно определить углы φ_1 и φ_2 , определяющие положение вектора скорости V_{Σ} результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны несущего винта вертолета.

При выполнении дополнительного приемника в виде полусферы, используя соотношения, приведенные в работе [6], связь давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 с углами φ_1 и φ_2 можно представить в виде

$$\frac{P_1 - P_2}{P_{н\Sigma} - P_{ст\Sigma}} = \frac{9}{4} \sin 2\varphi_{01} \sin 2\varphi_1;$$

$$\frac{P_3 - P_4}{P_{н\Sigma} - P_{ст\Sigma}} = \frac{9}{4} \sin 2\varphi_{02} \sin 2\varphi_2.$$

Тогда углы φ_1 и φ_2 , определяющие положение вектора V_{Σ} , будут определяться соотношениями

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{н\Sigma} - P_{ст\Sigma}} \right);$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{н\Sigma} - P_{ст\Sigma}} \right).$$

Тогда по давлениям P_1 и P_2, P_3 и $P_4, P_{н\Sigma}$ и $P_{ст\Sigma}$ и по температуре торможения $T_{т\Sigma}$, воспринимаемыми неподвижным приемником в виде полусферы, после их преобразования в электрические сигналы с помощью пневмоэлектрических преобразователей 4 и 8 и ввода че-

рез мультиплексор 5 и аналого-цифровой преобразователь 6 в микропроцессор 7 (рис. 2), параметры вектора истинной воздушной скорости вертолета в области малых и околонулевых скоростей вычисляются в соответствии с уравнениями вида:

$$V_x = V_\Sigma \cos \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] \times$$

$$\times \cos \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\text{н}\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] - K_{ix} |V_{i0}| - (\omega_y z - \omega_x y);$$

$$V_y = V_\Sigma \sin \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\text{н}\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] \times$$

$$\times \cos \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\text{н}\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] - K_{iy} |V_{i0}| - (\omega_x x - \omega_z z);$$

$$V_z = V_\Sigma \sin \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\text{н}\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] - K_{iz} |V_{i0}| - (\omega_x y - \omega_y x);$$

$$V_B = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2};$$

$$\alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}; \quad \beta = \arcsin \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} = \arcsin \frac{V_z}{V_B};$$

$$V_\Sigma = 44,826 \sqrt{\frac{T_{\tau\Sigma} \left[\left(\frac{P_{\text{н}\Sigma}}{P_{\text{ст}\Sigma}} \right)^{0,2857143} - 1 \right]}{\left(\frac{P_{\text{н}\Sigma}}{P_{\text{ст}\Sigma}} \right)^{0,2857143}}}; \quad \rho_\Sigma = \frac{P_{\text{ст}\Sigma}}{287,05287 T_{\tau\Sigma}} \left(\frac{P_{\text{н}\Sigma}}{P_{\text{ст}\Sigma}} \right)^{0,2857143};$$

$$P_H = P_{\text{ст}\Sigma} - K_P \frac{\rho V_\Sigma^2}{2}; \quad T_H = 288,15 - 0,0065H; \quad H = \frac{9,36629 - P_H^{0,1902631}}{0,000079391};$$

$$\rho_H = 0,03483676 \frac{P_H}{T_H};$$

$$V_{\text{нп}} = \sqrt{\frac{2T_0 kR}{k-1} \left[\left(\frac{P_{\text{н}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} = \sqrt{\frac{2T_0 kR}{k-1} \left[\frac{P_{\text{н}}}{P_0} \left(1 + \frac{(k-1)V_B^2}{2kRT_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} + 1 \right]^{\frac{k-1}{k}} - 1},$$

где K_P – безразмерный коэффициент искажения статического давления P_H , воспринимаемого в аэродинамическом поле вихревой колонны несущего винта, который определяется по результатам летных испытаний; $V_{\text{нп}}$ – приборная скорость.

Следует отметить, что по дополнительной информации о величине $V_{\text{н}}$ и угле сноса φ вектора путевой скорости $V_{\text{н}}$, получаемой от доплеровского измерителя скорости и угла сноса или от спутниковой навигационной системы, на режимах маневрирования и взлетно-посадочных (полетных) режимах по полученным параметрам вектора истинной воздушной скорости V_B можно определить и параметры вектора скорости ветра W , используя соотношения, приведенные в работе [7].

Таким образом, предлагаемая стартовая система измерения малых воздушных скоростей одновинтового вертолета позволяет решить задачу информационного обеспечения эки-

пажа вертолета на стоянке, при маневрировании по земной поверхности, на взлетно-посадочных режимах. Использование стартовой системы позволит повысить эффективность применения и безопасность эксплуатации одновинтовых вертолетов различного класса и назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерусалимский, М.А. Экипажам вертолетов – информационную поддержку / М.А. Ерусалимский, В.Н. Егоров // *Авиасоюз*. 2011. №2 (35). – С. 24-25.
2. Патент РФ на изобретение № 2426995, МПК G 01 P 5/00. Система измерения малых воздушных скоростей вертолета [Текст] / В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин, Н.А. Порунов, Н.Н. Макаров, В.П. Белов, Д.А. Истомин. Заявл. 23.11.2009. Оpubл. 20.08.2011. Бюл. №23.
3. Солдаткин, В.В. Методологические основы измерения высотно-скоростных параметров вертолета по аэрометрической информации вихревой колонны несущего винта / В.В. Солдаткин // *Изд. вузов. Авиационная техника*. – 2010. №3. – С. 51-56.
4. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. – 448 с.
5. Браверманн, А.С. Динамика вертолета. Предельные режима полета / А.С. Браверманн, А.П. Вайн-труб. – М.: Машиностроение. – 1988. – 280 с.
6. Петунин, А.Н. Методы и техника измерения параметров газового потока / А.Н. Петунин. – М.: Машиностроение. – 1972. – 332 с.
7. Пomyкаев, И.И. Навигационные приборы и системы / И.И. Пomyкаев, В.П. Селезнев, Л.А. Дмитро-ченко. – М.: Машиностроение, 1983.

Никитин Александр Владимирович

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева
Аспирант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»
Тел.: +7 (843) 236-51-21
E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

Солдаткин Вячеслав Владимирович

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева
Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»
Тел.: +7 (843) 236-51-21
E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

A.V. NIKITIN, V.V. SOLDATKIN

STARTING SYSTEM FOR MEASURING THE PARAMETERS OF WIND AND AIR VELOCITY VECTOR COMPONENTS SINGLE-ROTOR HELICOPTER'S

The features of structure and algorithms for processing the primary information system start measuring the magnitude and direction of wind in the parking lot, while driving and maneuvering on the earth's surface, the components of the vector of the true air speed in the takeoff and landing and hovering.

Keywords: helicopter, small aircraft speed, magnitude and direction of the wind measurement system, parking, taxiing, takeoff and landing modes.

BIBLIOGRAPHY

1. Erusalimskij, M.A. Jekipazham vertoletov – informacionnuju podderzhku / M.A. Erusalimskij, V.N. Egorov // *Aviasojuz*. 2011. №2 (35). – S. 24-25.
2. Patent RF na izobretenie № 2426995, MPK G 01 P 5/00. Sistema izmerenija malyh vozdušnyh sko-rostey vertoleta [Tekst] / V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin, N.A. Porunov, N.N. Makarov, V.P. Belov, D.A. Is-tomin. Zajavl. 23.11.2009. Opubl. 20.08.2011. Bjul. №23.
3. Soldatkin, V.V. Metodologicheskie osnovy izmerenija vysothno-skorostnyh parametrov vertoleta po aerometricheskoj informacii vihrevoj kolonny nesuwego vinta / V.V. Soldatkin // *Izd. vuzov. Aviacionnaja tehnika*. – 2010. №3. – S. 51-56.

4. Soldatkin V.M. Metody i sredstva izmerenija ajerodinamicheskikh uglov letatel'nyh apparatov / V.M. Soldatkin. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta, 2001. – 448 s.
5. Bravermann, A.S. Dinamika verতোleতা. Predel'nye rezhima poleta / A.S. Bravermann, A.P. Vajn-trub. – M.: Mashinostroenie. – 1988. – 280 s.
6. Petunin, A.N. Metody i tehnika izmerenija parametrov gazovogo potoka / A.N. Petunin. – M.: Mashinostroenie. – 1972. – 332 s.
7. Pomykaev, I.I. Navigacionnye pribory i sistemy / I.I. Pomykaev, V.P. Seleznev, L.A. Dmitro-chenko. – M.: Mashinostroenie, 1983.

Nikitin Aleksandr Vladimirovich

Kazan national research technical university named by A.N.Tupolev

Post-graduate student, chair “Equipment and information measuring systems”

Tel.: 843-236-51-21

E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich

Kazan national research technical university named by A.N.Tupolev

Candidate of technical sciences, associated professor, candidate for a doctor's degree, chair “Equipment and information measuring systems”

Tel.: 843-236-51-21

E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

В.А. СМЕРЕК, В.К. ЗОЛЬНИКОВ, А.В. АЧКАСОВ

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ. ПЕРВЫЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ 16-РАЗРЯДНЫЙ МИКРОКОНВЕРТЕР

В статье описывается опыт разработки микроконтроллерной архитектуры, которая легла в основу нового микроконвертера разработки ФГУП «Научно-исследовательский институт электронной техники». Рассказывается о проблемах конструирования данного типа изделий и способах повышения вычислительных возможностей с учетом современных достижений в области САПР и технологий.

Ключевые слова: микроконтроллер; микроконвертер; архитектура; ядро; энергопотребление; аналого-цифровое преобразование; цифроаналоговое преобразование.

I ВВЕДЕНИЕ

Первый контроллер семейства MCS-96 появился в линейке фирмы Intel® в восьмидесятих годах прошлого столетия. Новая и высокопроизводительная для того времени архитектура предназначалась для построения схем, которые могли бы найти свое применение в различных областях: от изделий бытовой техники, периферийных устройств ЭВМ до автомобильной и авиационной электроники. Семейство наполнилось контроллерами, было выпущено порядка 30 разновидностей частотой от 16 до 50 МГц. Все схемы принадлежали одному из классов: с блоком высокоскоростного ввода/вывода или со встроенным процессором событий. К моменту снятия с производства этого семейства в 2007 году, специалисты фирмы Intel® смогли увеличить адресное пространство с 64 Кбайт до 6 Мбайт, увеличить производительность более чем в 4 раза, увеличить объем ОЗУ в 4 раза, выпустить модификации, поддерживающие современные типы памяти и протоколы обмена информацией. Микроконтроллеры 80C196 фактически стали стандартом для встроенных систем управления, обеспечивая сочетание высоких технических показателей и экономической эффективности.

II ВЫБОР БАЗОВОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Когда в 2008 году инженеры ФГУП «НИИЭТ» инициативно приступили к разработке микроконвертера - контроллера, предназначенного для работы с аналоговыми сигналами, первым вопросом стал выбор архитектуры, которая позволила бы сочетать высокую производительность с минимальными помехами, вносимыми в цепи аналоговых блоков. В номенклатуре предприятия уже были два 16-разрядных семейства, которые могли бы подойти для этих целей. Первое базировалось на ядре современной архитектуры C166. Оно хорошо подходило с точки зрения обеспечиваемой производительности, но большая занимаемая площадь, потребление и излишняя функциональность сделали его применение невозможным. Лицензирование стороннего ядра (например, ARM) делало разработку экономически невыгодной, особенно с учетом того, что работы проводились на собственные средства. Так как предприятие успешно выпускает и реализует контроллеры семейства MCS-96, давно нуждающиеся в модернизации, то было принято решение создать новое ядро, которое поддерживало бы систему команд контроллеров серии 1874, и было бы технологически независимым. Это позволило бы заменить старые схемы в современной аппаратуре, а также в последующем создать радиационно-стойкий вариант с расширенными функциональными возможностями (по сравнению с серийно выпускаемой ИС 1874BE05T). В качестве ориентира для всей системы на первом этапе была выбрана структура контроллера разработки ФГУП НИИЭТ 1874BE76T (аналог Intel® 8X196KC [1]).

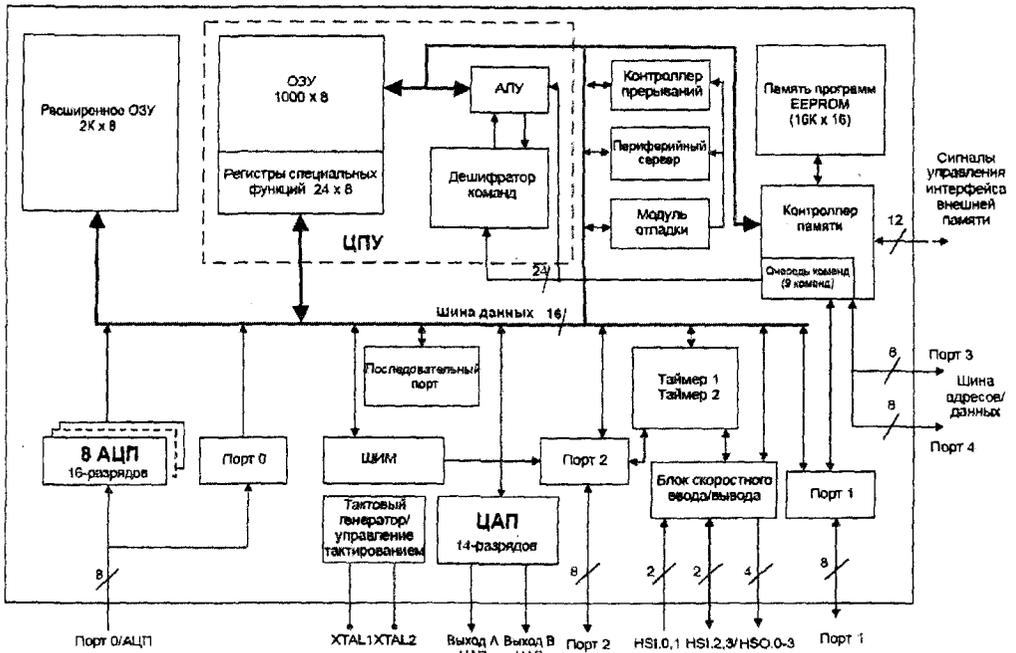


Рисунок 1 – Структурная схема микроконвертера K1874BE76T

III МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Основным требованием к разрабатываемому ядру стало увеличение производительности относительно референсной архитектуры при уменьшении общего энергопотребления цифровыми частями схемы. Последний вопрос предполагалось решить переходом на 0,35 мкм 3,3 В технологию и использованием поддерживаемой современными САПР Low-Power методологии [2]. К сожалению, выбранная кремниевая фабрика не имела полного набора элементов для создания сверхнизкопотребляющей микросхемы. Основными способами уменьшения потребления и, как следствие, минимизации воздействия на работу аналоговых блоков, оставались следующие: введение элементов, блокирующих ветви дерева тактовых сигналов в моменты, когда не осуществляется перезапись, и изоляция операндов, позволяющая исключить излишние переключения комбинационных элементов схемы [3]. Эти способы автоматически поддерживаются современными средствами автоматизированного проектирования, как при синтезе электрической схемы, так и при последующих операциях по разработке топологии. Проведенные расчеты показали, что применение только этих нехитрых для инженера методов, позволяет уменьшить потребление более чем в 3 раза. Так как некоторые функции контроллеров отдельными разработчиками систем не используются, то была введена возможность отключения от тактовых сигналов периферийных блоков полностью (в том числе и аналоговых), позволяющая использовать оптимальную схему энергопотребления в каждый момент функционирования системы. Этому способствует и введенный режим SLOW, позволяющий переводить конвертер в режим медленного внутреннего тактирования.

Основой для увеличения производительности нового ядра должен был стать полностью переработанный механизм выборки команд. Архитектура MCS-96 имеет потенциально высокую скорость работы с внутренней, а особенно с внешней памятью команд, при выборке из которой протокол предполагает всего 2 такта внутреннего синхросигнала на весь цикл обращения. Слабым местом оригинальных схем разработки фирмы Intel® являлось наличие относительно большого времени простоя как шины обращения к памяти команд, так и самого CPU. Причина этого видится в локальном рассогласовании между временем выборки и временем выполнения инструкций. Реализованная в оригинальных контроллерах очередь команд в 4 байта не всегда позволяет компенсировать эту разницу, а у разработчиков микро-

конвертера были идеи оптимизировать последовательность микрокоманд в каждой инструкции, по возможности уменьшив их время выполнения в циклах. Это привело бы к еще большему рассогласованию. Очередь команд была увеличена до 9 команд по 7 байт каждая. Непрерывность выборки и выполнения команд была обеспечена реализованной независимостью этих процессов на уровне блоков ядра. Механизм выборки извлекает программу из внутренней или внешней памяти, определяет начало и конец команд и выстраивает необходимую последовательность из инструкций.

Процесс прерывается только на обращения к данным из внешней памяти или в момент переполнения. CPU выбирает команды одну за другой из очереди, приостанавливая свою работу только тогда, когда полностью ее опустошит. Исследования показали, что для данной архитектуры такой подход позволяет почти полностью избежать простоев, увеличив тем самым эффективность использования, как ресурсов ядра, так и памяти.

Следующим шагом было увеличение вычислительных возможностей будущей схемы. В последнее время идут процессы по стиранию грани между микроконтроллерами и цифровыми сигнальными процессорами – современные МК обычно имеют в своем составе специальные математические блоки, позволяющие существенно расширить их область применения. Входящие в пакет Cadence® ChipWare компоненты реализуют все наиболее востребованные математические операции, причем большинство из них на современных библиотеках стандартных элементов удается выполнять за 1 такт [4]. С помощью данных блоков было построено арифметико-логическое устройство микроконвертера, содержащее 1-тактные сдвигатели, 1-тактный умножитель (16×16), 2-тактный делитель (32×16) и другие блоки. Реализация быстрых умножения и деления, именно в рамках основного АЛУ, а не дополнительного вычислительного блока, было обусловлено желанием сделать доступными новые вычислительные возможности и для программ, использующих стандартные команды MCS-96 архитектуры.

Увеличившиеся вычислительные мощности обнажили другую проблему оригинальных контроллеров, а именно, недостаточный объем оперативного запоминающего устройства. Разработчиками была выбрана схема, достаточно распространенная в контроллерных архитектурах. Основным объемом ОЗУ был установлен максимально возможным с учетом обеспечения программной совместимости с другими изделиями MCS-96 архитектуры (1000 байт). В дополнение к этому было введено отключаемое расширенное ОЗУ объемом 2 Кбайт. К этому ОЗУ возможно адресоваться только косвенными методами адресации, что немного дольше по времени, чем к основному ОЗУ, но намного быстрее, чем если использовать внешние запоминающие устройства.

Еще одним способом повышения эффективности использования внутренних ресурсов является использование специального блока для пересылки данных без прерывания работы основной программы. Для этого в архитектуре MCS-96 присутствует сервер периферийных транзакций (PTS). Блок оригинальных микроконтроллеров фирмы Intel® позволяет осуществлять транзакции по прерываниям периферийных устройств. Разработанный для микроконвертера блок позволяет осуществлять пересылку слов или байтов исключительно в момент простоя внутренней шины адресов и данных, тем самым не приводя к изменению времени выполнения основного кода, доводя эффективность использования внутренних шин до 90-95 %. Это особенно актуально с учетом возросшего объема ОЗУ.

Проведенные тесты показали, что новое ядро выполняет тестовые программы на 30-40 % быстрее по сравнению с оригинальной архитектурой при одинаковой частоте. При этом использование новых объемов памяти и функций позволит еще увеличить общую производительность системы. В принципе, можно говорить о появлении новой архитектуры, только базирующейся на системе команд MCS-96, так как структура блоков, входящих в состав ядра, их функционирование и характеристики полностью изменились.

IV ОСОБЕННОСТИ ПЕРИФЕРИИ МИКРОКОНВЕРТЕРА

Так как основное назначение микроконвертера – это работа с аналоговыми сигналами, то особое внимание уделялось разработке высокоточных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей. В схему встроены блок из восьми 16-разрядных АЦП, представляющий собой IP блок собственной разработки ФГУП НИИЭТ. Аналого-цифровые преобразователи построены на основе методики сигма-дельта преобразования, реализующей алгоритм сверхвыборки, когда норма осуществления выборки во много раз превышает требуемую частоту. Такая реализация позволяет значительно уменьшить шумы и гарантирует стабильно высокие динамические параметры преобразователя. Особое внимание при интеграции блока уделялось обеспечению программной совместимости с предыдущими контроллерами разработки института, что потребовало введение резервных сигналов управления. Блок 14-разрядного цифроаналогового преобразователя реализован в виде IP и отличается малым временем установки токовых выходов (11 нс). Аналоговые блоки были проверены в кремнии как отдельные устройства, что позволяет оценить степень влияния цифровой части схемы на качество и точность преобразований. При проектировании топологии микроконвертера особое внимание уделялось разводке аналоговых сигналов и шин аналогового питания. Они проложены вдалеке от сильношумящих, часто переключающихся сигналов, и имеют минимально возможную длину. Для этого использовались ручные методы трассировки, позволяющие хорошо контролировать весь процесс.

Оптимизации подверглись и периферийные устройства микроконвертера. Блок высокоскоростного ввода-вывода лишился ряда ограничений по скорости ввода и вывода цифровых сигналов, связанных с использованием ассоциативной памяти, уменьшилось время реакции на прерывания. Этот модуль предназначен для фиксации времени происхождения событий и генераций событий по времени, и теперь разрешающая способность его стала равной одному машинному циклу. Для отладочных целей и контроля выполнения программ был введен модуль отладки, вырабатывающий новый тип прерывания. Использование этого блока позволяет реализовать режим защищенного микроконтроллера, запретив исполнение команд из внешней памяти. Все периферийные блоки подключаются к ядру по AMBA-подобной шине, протокол работы которой модифицировался специально для данной архитектуры. Это впоследствии может обеспечить легкое подключение других периферийных IP блоков, ускорив разработку новых модификаций схемы.

V ВНУТРИКРИСТАЛЬНАЯ ПАМЯТЬ

Микроконвертер имеет в своем составе три типа памяти, предназначенных как для хранения данных в ходе выполнения программы, так и команд. Общий объем блоков составляет 35 Кбайт. Он делится между двумя типами ОЗУ (1000 байт и 2048 байт), доступ к которым осуществляется как пословно, так и побайтно, и памятью типа EEPROM (16K×16). Хотя архитектура MCS-96 и является фон-неймановской, но выполнение команд из оперативных областей памяти запрещено. Память EEPROM может содержать как инструкции, так и данные, и может быть защищена установкой специальных битов, считывающихся каждый раз после перезагрузки микросхемы.

VI ТЕКУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СЕМЕЙСТВА

В первом квартале 2010 года были получены первые образцы микроконвертеров. Это схемы, созданные по 0,35 мкм технологии фирмы X-FAB, и функционирующие на частотах до 33 МГц. Особенностью их является отсутствие аналого-цифровых преобразователей и расширенного ОЗУ. Они предназначены для первоначального ознакомления заинтересованными предприятиями и оценки возможности использования ИС в аппаратуре. Исследования показали, что разработчикам удалось добиться требуемых характеристик – максимальной частоты работы, величины потребляемого тока цифровой частью схемы и функциональности. Цифровая часть ИС потребляет менее 10 мА на частоте 33 МГц и работает при напряжении от 2 до 5 В.

По результатам измерений была проведена коррекция схемы и появились опытные образцы микроконвертеров в конце 2010 года. На основе этого можно утверждать, что ФГУП

НИИЭТ может начать новую линейку высокопроизводительных 16-разрядных контроллеров. Возможно появление изделий и с увеличенной тактовой частотой, объемом ОЗУ и ПЗУ, с новыми периферийными блоками, реализующими самые современные интерфейсы, многовыводных версий с расширенным адресным пространством и других. Основной принцип, положенный в разработку – технологическая независимость, позволит выпускать изделия на любой подходящей кремниевой фабрике, в том числе и отечественной. Проблема в том, что «контроллерные» технологии, отличаются от «процессорных», активно развивающихся в последнее время в России. Субмикронные технологии не пригодны к использованию там, где нужны повышенные напряжения питания (до 5 В), широкие диапазоны функционирования, в том числе и периферийных блоков. Кремниевые фабрики должны предлагать не только библиотеки стандартных элементов (нескольких типов по потреблению и быстродействию), но и различные типы памяти, стандартные аналоговые блоки. Для современных изделий это доступно только на зарубежных производствах. Вся контроллерная тематика в России уходит на задний план, а между тем, это и есть самый потребляемый класс изделий, который и определяет технологическую развитость, как промышленности, так и жизни конкретного человека. О микроконтроллерах не любят вспоминать, так как здесь нет заоблачных частот, громадных объемов памяти и огромных производительностей. Между тем, даже западные производители электроники не боятся использовать простые 8-ми разрядные решения, встраивая их в самые современные и продаваемые системы. При этом сократить техническое отставание в этой области гораздо легче, чем в любой другой, а результаты могут быть куда заметней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Logi, R. 8XC196KC/8XC196KD User's Manual [Text] / R. Logi and other. – New York, 1992. – 512 p.
2. Si, K. Low Power in Encounter RTL Compiler [Text] / K. Si and other. – New York, 2006. – 112 p.
3. Рабаи, Жан М. Цифровые интегральные схемы: Пер. с англ. [Текст] / Рабаи, Жан М. и др. – М. : ООО "И.Д. ВИЛЬЯМС", 2007. – 912 с.
4. Алперин, Е.Д. Арифметико-логические устройства и их синтез [Текст] / Е.Д. Алперин, В.П. Крюков, В.А. Смерек // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – №4. – С. 24-26.
5. Смерек, В.А. Микроконтроллер 1830BE32У – 8-разрядная архитектура MCS-51 в радиационно-стойком исполнении [Текст] / В.А. Смерек, А.И.Яньков, А.В.Крюков // Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)". Сборник трудов, 2010. - № 1. - С. 211-214.

Смерек Владимир Андреевич

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж
Аспирант кафедры «Вычислительной техники и информационных систем»
E-mail: smerek@niiet.ru

Зольников Владимир Константинович

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж
Профессор, д-р техн. наук, зав. кафедрой «Вычислительной техники и информационных систем»
E-mail: wkz@rambler.ru

Ачкасов Александр Владимирович

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж
Соискатель кафедры «Вычислительной техники и информационных систем»
Тел 8-(4732) – 53-70-88
E-mail: aav_vtis@rambler.ru

V.A. SMEREK, V.K. ZOLNIKOV, A.V. ACHKASOV

METHODS OF INCREASE OF PRODUCTIVITY OF OPERATION OF MICROCONTROLLERS. FIRST DOMESTIC 16-DIGIT MICROCONVERTER

The experience of the development of new microconverter architecture that is the basis of new microconverter by Scientific Research Institute of Electronic Engineering is described. Problems of construction of such design types and ways to increase computational power with the use of new CAD features are declared.

Keywords: microcontroller; microconverter; architecture; core; power consumption; analog-to-digital conversation; digital-to-analog conversation.

BIBLIOGRAPHY

1. Logi, R. 8XC196KC/8XC196KD User's Manual [Text] / R. Logi and other. – New York, 1992. – 512 p.
2. Si, K. Low Power in Encounter RTL Compiler [Text] / K. Si and other. – New York, 2006. – 112 p.
3. Rabai, Zhan M. Cifrovye integral'nye shemy: Per. s angl. [Tekst] / Rabai, Zhan M. i dr. – M. : OOO "I.D. VIL"JaMS", 2007. – 912 s.
4. Alperin, E.D. Arifmetiko-logicheskie ustrojstva i ih sintez [Tekst] / E.D. Alperin, V.P. Krjukov, V.A. Smerek // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2009. – T. 5. – №4. – S. 24-26.
5. Smerek, V.A. Mikrokontroller 1830VE32U – 8-razrjadnaja arhitektura MCS-51 v radiacionno-stojkom ispolnenii [Tekst] / V.A. Smerek, A.I.Jan'kov, A.V.Krjukov // Vserossijskaja nauchno-tehničeskaja konferencija "Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanojelektronnyh sistem (MJeS)". Sbornik trudov, 2010. - № 1. - S. 211-214.

Smerek Vladimir Andreevich

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh
Graduate student at Computer Science and Information Systems
E-mail: smerek@nijet.ru

Zolnikov Vladimir Konstantinovich

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh
Professor, Ph.D., Head. Department of Computer Science and Information Systems
E-mail: wkz@rambler.ru

Achkasov Alexander Vladimirovich

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh
Applicant Department of Computer Science and Information Systems
Phone: 8-(4732) - 53-70-88
E-mail: aav_vtis@rambler.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОМОНИТОРИНГА ПРИ ДИАЛИЗНОЙ ТЕРАПИИ И ОЦЕНКЕ АДЕКВАТНОСТИ ДИАЛИЗА

В статье рассматриваются вопросы оценки адекватности диализного лечения, и оценивается возможность использования биомониторинга ряда параметров для увеличения эффективности диализной терапии и для повышения достоверности оценки адекватности диализа.

Ключевые слова: диализ; адекватность диализа; биотехническая система; биомониторинг.

На сегодняшний день общепризнанным является тот факт, что гемодиализ никогда не будет полностью удовлетворять всем потребностям организма человека, которые обеспечиваются здоровыми нормально функционирующими почками. Однако сделать гемодиализ адекватным его возможностям замещения ряда важнейших функций почек возможно. Совершенно очевидно, что в связи с совершенствованием аппаратуры и массообменных устройств, а также с интенсификацией гемодиализа меняется уровень биохимических и других показателей крови, которые определяют адекватность гемодиализа и являются основанием для коррекции протокола диализной терапии, выбора диализатора, пересмотра спектра назначаемых лекарственных препаратов и инфузионно-трансфузионных сред при проведении гемодиализа.

Перечисленные факторы адекватного гемодиализа позволяют поэтапно добиться медицинской, социальной и в большей части случаев трудовой реабилитации пациентов, и продлить жизнь больных с терминальной почечной недостаточностью на срок до 10-25 лет. При неадекватном гемодиализе растет вероятность развития уремических и "диализных" осложнений, значительно уменьшается число больных, достигающих высоких ступеней реабилитации, снижается продолжительность жизни и, соответственно, возрастает летальность больных на гемодиализе.

Несмотря на то, что в последние годы именно в технологии диализа достигнут значительный прогресс, ни одна из фундаментальных проблем этого направления не была решена, и он все еще нуждается в дальнейшем совершенствовании. А такие возможности далеко не исчерпаны.

К сожалению, на сегодняшний день понятие адекватности гемодиализа не поддается строгому определению, так как слишком разнообразны подходы и параметры, используемые в качестве критериев оценки адекватности гемодиализа, слишком многообразны и не схожи мнения специалистов, занимающихся этим кругом проблем. Адекватным считают гемодиализ, обеспечивающий максимальную выживаемость больных, при этом при оценке адекватности гемодиализа учитывают выживаемость, частоту развития осложнений и качество жизни больных. Поэтому адекватным диализным лечением можно назвать такое, которое ликвидирует все признаки и симптомы уремии и полностью реабилитирует больного. При этом многие стороны этой проблемы, такие как доза диализа, белково-энергетическая недостаточность, податливость пациента, биосовместимость, водный баланс, повторное использование диализаторов и другие могут иметь большую или меньшую значимость [1].

Признаками адекватного лечения являются относительно низкий уровень азотемии, близкая к стандартной масса тела, междиализная задержка жидкости не свыше 2,5-3 кг, нормальное или слегка повышенное артериальное давление, удовлетворительные показатели работы и размеров левого желудочка сердца, полная реверсия перикардита, уровень гемоглобина свыше 120 г/л, отсутствие признаков невропатии и энцефалопатии. Таким образом, можно определить область параметров, которые могут адекватно регулироваться диализом, и, следовательно, можно выделить круг параметров и характеристик, по которым можно оценивать степень изменения жизненно важных параметров организма, то есть адекватность

гемодиализа. Причем разнообразие выделенных признаков предполагает введение не одного, а нескольких параметров, мониторингирование которых позволит отслеживать изменения, происходящие во время гемодиализа относительно исходного уровня, зафиксированного до начала процедуры, а возможности современной цифровой техники позволяют найти практическое решение такой задачи.

Анализ исторических аспектов рассматриваемого вопроса показывает, что первой по своей важности характеристикой адекватности диализа, которая ранее других привлекла к себе внимание исследователей, является адекватность удаления продуктов азотистого обмена, которые являясь по своей природе разнообразными и многочисленными, удаляются или перерабатываются почками. При почечной недостаточности они задерживаются в организме, распределяясь более или менее равномерно не только в крови, но и во всех жидкостях организма. Выведение азотистых метаболитов может оцениваться по выведению их маркера, т.е. представителя этого класса веществ. Однако за четыре десятилетия активного развития хронического диализа идеального маркера найдено не было. Перечисленным выше требованиям наилучшим образом удовлетворяет мочевины. Исследования, базирующиеся на материалах наблюдений многих тысяч диализных пациентов, однозначно указывают на то, что показатели, рассчитанные на основе удаления из организма мочевины, наилучшим образом согласуются с результатами лечения и предсказывают их [1].

До сих пор общепринятым индексом диализной дозы является индекс адекватности диализа по мочевины, который представляет собой отношение объема очищения крови за одну процедуру, рассчитываемого как произведение клиренса диализатора по мочевины K (мл/мин) и диализного времени t (мин) к объему распределения мочевины V (мл) в организме Kt/V , где V равняется 58 % массы тела (г). Подобный подход теоретически представляет собой наиболее точный способ расчета Kt/V , и именно так вычисляется назначенная (prescribed, что означает предписанная) доза диализа.

Практически же нет ничего более далекого от реальности, чем расчеты таким способом. Проблема в том, что неизвестен точный клиренс диализатора у данного больного при данной скорости кровотока, кроме этого в ходе диализа клиренс меняется, и скорость кровотока также непостоянна. Время диализа, проведенного при эффективном кровотоке, нередко отличается от назначенного, а объем распределения мочевины в ходе диализа меняется в связи с ультрафильтрацией. Все сказанное в полной мере относится и к получившим широкое распространение в нашей стране диализным индексам, в которых мочевины заменена на креатинин, а объем распределения мочевины – на массу тела [1].

Адекватным считается диализ, при котором Kt/V находится в пределах 1,0-1,4. Иначе говоря, за одну процедуру должен очищаться весь объем распределения мочевины. По данным, основанным на многочисленных наблюдениях заметное снижение летальности (до 4 %) отмечено при повышении Kt/V до 1,5. Однако при более высоких значениях этого показателя дальнейшего падения летальности не отмечено. Аналогично, при удлинении сеанса диализа более чем 5 часов улучшения результатов лечения достигнуть не удалось.

В действительности как теми авторами, кто предложил этот показатель в 80-х годах, так и современными исследователями математическая запись Kt/V рассматривается как выражение, характеризующее от чего и в какой мере, зависит доза диализа. Однако при этом следует иметь в виду, что по упомянутым выше причинам сложно рассчитывать на линейный характер зависимости дозы от клиренса, времени и объема.

Дозу же диализа, которую удалось обеспечить данным сеансом, рассчитывают по изменению концентрации мочевины до и после процедуры диализа, учитывая также при более точных расчетах длительность процедуры и объем ультрафильтрации. При правильном выполнении анализов этот метод определения полученного значения Kt/V отличается хорошей воспроизводимостью, точностью расчета и отсутствием трудностей, связанных с вычислением K или V . Сравнение прописанного и полученного значения Kt/V позволяет математически определить неадекватность диализного лечения и выявить любые ошибки значений K или V , которые нелегко точно измерить. Полученная информация может использоваться для диаг-

ностики и поиска неисправностей в обеспечении адекватности диализного лечения, и позволяет провести точную регулировку прописи диализа, гарантируя выполнение целевой адекватности.

Но подобный результат достижим только при правильном проведении анализов, стоит отметить, что методики, применяемые при взятии крови с целью расчета полученной дозы гемодиализа, нуждаются в уточнении и сильно варьируют [2], поэтому не дают сопоставимых результатов оценки адекватности диализа. Однако, до последнего времени, не предпринималось никаких серьезных усилий по стандартизации диализной терапии и разработке конкретных программ, которые способствовали бы улучшению качества жизни диализных больных.

Одним из немногих значимых событий стала организация в марте 1995 г. специальной экспертной комиссии, названной Инициатива по Качеству Исходов лечения Диализом Национального Почечного Фонда США (National Kidney Foundation – Dialysis Outcomes Quality Initiative, NKF-DOQI). Ее изначальная и основная цель – дать клинической практике рекомендации, которые помогли бы улучшить результаты лечения, повысить выживаемость диализных пациентов и, тем самым, эффективность этого вида медицинской помощи.

Ее рабочие группы, распределенные по 4 разделам (один из которых адекватность гемодиализа), создали 114 практических рекомендаций с подробными комментариями и обоснованиями, и остаются наиболее полным, авторитетным и цитируемым руководством в мире, по крайней мере, в отношении адекватности гемо- и перитонеального диализа. Стоит отметить, что Европейское нефрологическое сообщество начало работу по созданию собственного Руководства по улучшению диализной практики.

Однако это один из немногих методических подходов решения проблемы. До настоящего времени проблема принципиального повышения качества гемодиализа не могла быть решена по причине отсутствия инструментов для фактического контроля за важнейшими параметрами гемодиализа, такими как доза гемодиализа, время, скорость перфузии крови, ультрафильтрация. Все эти задачи пытались безуспешно решить путем косвенных расчетов и профилирования, основанного более на предположениях, нежели на реальных фактах. Комплекс диализного мониторинга исключительно состоял из наблюдения за чисто физическими параметрами. Причем мнение о том, что нужно создавать программное обеспечение, которое будет считать назначенный и полученный Kt/V автоматически у специалистов присутствует уже достаточно давно, но до последнего момента не разделялось производителями.

В настоящее время проблему адекватности гемодиализа, позволяет решать гемодиализный биомониторинг, который делает возможным осуществлять именно мониторинг такого фундаментального показателя гемодиализа, как Kt/V . Это событие заставило многие гемодиализные компании декларировать инкорпорацию биомониторинга в основные блоки диализной аппаратуры. Таким образом, в настоящее время происходит качественный прогресс в почечной технологии, причем вывод информации о параметрах состояния пациента в цифровом и графическом виде позволит управлять работой аппарата искусственная почка по принципу обратной связи, а число параметров, которые контролируются, будет увеличиваться.

Кроме оценки индекса Kt/V для увеличения эффективности диализной терапии и для повышения достоверности оценки адекватности диализа необходимо учитывать такие неотъемлемые показатели как клиренс, скорость кровотока, значение pH, уровень креатинина и альбумина, артериальное давление и проводимость.

Исследование клиренса ряда веществ, или клиренс-тесты, применяют в диагностической практике для оценки выделительной и метаболической функции почек. В зависимости от целей исследования определяют либо так называемый тотальный плазменный клиренс, характеризующий скорость очищения плазмы от изучаемого вещества (тест-вещество) без информации о природе этого очищения, либо так называемый органнй почечный клиренс, отражающий вклад данного органа в очищение плазмы.

Скорость кровотока – очень важный показатель гемодиализа. Если кровь через диализатор протекает с большей скоростью, то за время диализа большее количество ее очистится

от уремиических токсинов и степень очистки возрастет. Но в тоже время при большой скорости можно повредить кровеносные сосуды, поэтому необходимо поддерживать оптимальную скорость и постоянно ее контролировать. Современные аппараты дают возможность видеть два показателя – установленную скорость кровотока и эффективную скорость кровотока.

Большим хронической почечной недостаточностью диализ проводится растворами с рН 7,3–7,5, т.е. нейтральными относительно крови. Ввиду взаимодействия рН крови и рН перитонеальной жидкости в ходе диализа должен осуществляться постоянный контроль за кислотно-щелочным равновесием. Гипертоничность стандартных диализирующих растворов создается путем введения в их состав глюкозы до 25–50 г и гидрокарбоната натрия до 10–20 г/л. Проведение диализа гиперосмотическими растворами приводит к более интенсивному выходу токсичных веществ в перитонеальную жидкость, а в условиях нарушенного водного баланса способствует значительной дегидратации. Также большим хронической почечной недостаточностью необходимо следить за нагрузками, т.к. физические нагрузки влияют на изменение рН.

Концентрацию креатинина в плазме крови считают одним из лучших косвенных индикаторов функции почек. Чем выше преддиализный уровень креатинина или степень генерации креатинина, тем ниже заболеваемость. К сожалению, в сознании наших специалистов укоренилось мнение о том, что мочевины и креатинин – это уремиические токсины, концентрация которых чем меньше, тем лучше. Напротив, при адекватном гемодиализе и хорошем питании высокий преддиализный уровень мочевины и креатинина является благоприятным признаком. А к высокому клиренсу этих метаболитов стремятся потому, что их клиренс – отличный показатель диализной дозы.

Кроме концентрации креатинина качество диализной терапии необходимо контролировать по уровню концентрации сывороточного альбумина крови. Считают, что оптимальным является достижение уровня концентрации сывороточного альбумина 40 г/л и более, концентрация ниже 35 г/л свидетельствует о плохом качестве диализной терапии, в первую очередь дисметаболических нарушениях и уремиической интоксикации. Достоверно известно, что при более низких концентрациях альбумина увеличивается риск "диализных осложнений" и смертности больных [3].

Безусловно, при проведении процедуры диализа необходимо контролировать артериальное давление, так как оно является одной из важнейших функций почек. Почки влияют на артериальное давление двумя основными способами: изменяя количество жидкости в организме и продуцируя ряд активных веществ. Опасность артериальной гипертонии определяется как тяжестью потенциальных осложнений, так и частотой распространения. Доказано, что повышенное артериальное давление дает отрицательный эффект на общее состояние пациента, проходящего процедуру диализа, а также влияет на выживаемость гемодиализных больных. Тщательный контроль артериального давления позволяет избегать опасных осложнений, либо заметно сгладить их неприятные последствия.

Электропроводность зависит от физико-химических свойств крови – концентрации и подвижности находящихся в растворе ионов, заряда ионов, температуры и многих других факторов. Таким образом, при постоянном наблюдении за электропроводимостью крови, можно судить об адекватном проведении процедуры диализа.

Все перечисленные выше параметры легко поддаются программированию, что позволяет объединить их в единую информационно-измерительную биотехническую систему оценки адекватности диализа, алгоритм работы которой включает три этапа: подготовка к процедуре диализа, реализация диализа и оценка адекватности проведения процедуры.

На первом этапе происходит подготовка пациента к процедуре диализа, в ходе которой оценивается его почечная недостаточность и происходит преддиализная оценка состояния, включающая в себя взятие пробы крови для определения креатинина, альбумина, рН и проводимости, измеряется артериальное давление и определяется междиализная прибавка. При необходимости корректировки нужных параметров применяют лекарственную терапию.

Затем врач выбирает целевое значение Kt/V , прописывает процедуру диализа и настраивает параметры оборудования, после чего начинается непосредственно реализация диализа.

В разрабатываемой системе происходит измерение в режиме реального времени необходимых показателей для оценки адекватности процедуры, таких как Kt/V , длительность процедуры, клиренс, проводимость, значение pH и скорость кровотока. В зависимости от их значений система может корректировать параметры процедуры, реализуя работу в режиме обратной связи. Также автоматически устанавливается максимальное время процедуры диализа, которое постоянно корректируется, в зависимости от изменения системой параметров. К тому же на этом этапе контролируется наличие крови в диализате, при ее попадании в диализат система включает звуковую сигнализацию и останавливает процедуру диализа. Также контролируется артериальное давление, и если его значение существенно выше нормы, то система включает звуковую сигнализацию и останавливает процедуру, если же нет, то пациенту проводят лекарственную терапию.

После завершения диализа все результаты автоматически записываются. Затем измеряют массу пациента и берут пробу крови для определения креатинина и альбумина, результаты также записываются. Заключаящим этапом работы биотехнической системы является оценка адекватности проведенной процедуры диализа, в результате чего врач делает выводы о проведении и прописывании следующего сеанса процедуры для больного хронической почечной недостаточностью.

Таким образом, особенностью представленной биотехнической системы является то, что она позволяет проводить оценку адекватности процедуры диализа в режиме реального времени, а также корректировать параметры, определяющие течение диализного лечения, непосредственно во время процедуры с использованием обратных связей, а не после нее, так как это происходит в настоящее время в существующих аппаратах. Поэтому работа данной системы направлена на улучшение состояния больного хронической почечной недостаточностью как в междиализное время, так и непосредственно во время проведения процедуры диализной терапии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земченков, А.Ю. Адекватность гемодиализа. Классический подход. – "Нефрология и диализ" – №1. – 2001. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nephro.ru>.
2. Общие Положения Практических Рекомендаций NKF-DOQI (Executive Summaries NKF-DOQI). – National Kidney Foundation, Inc. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kidney.org>.
3. Пат. 2152041 Российская Федерация, МПК 7 G 01 N 33/68. Способ контроля адекватности гемодиализа/ Ямпольский А.Ф.; Федоровский Н.М.; Еремеева Л.Ф.; заявитель и патентообладатель Ямпольский А.Ф.; Федоровский Н.М.; Еремеева Л.Ф. (RU). – № 99114382/14; заявл. 30.06.1999; опубл. 27.06.2000. – 3 с.

Бондарева Людмила Александровна

Государственный университет-УНПК, г. Орёл

доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», к.т.н., доцент

телефон (4862)41-98-76;

E-mail: 270174@mail.ru

Шошина Людмила Алексеевна

Государственный университет-УНПК, г. Орёл

магистр кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

телефон (4862)41-98-76;

E-mail: ijibyf@yandex.ru

L.A. BONDAREVA, L.A. SHOSHINA

THE USE OF BIOMONITORING IN DIALYSIS THERAPY AND EVALUATION OF THE ADEQUACY OF DIALYSIS

In article are considered questions of assessing the adequacy of dialysis treatment, and assessed the possibility of the use biomonitoring of some number parameters to increase the efficiency of dialysis therapy and to improve the reliability of assessment of the adequacy of dialysis.

Keywords: dialysis; the adequacy of dialysis; biotechnical system; biomonitoring.

1. Zemchenkov, A.Ju. Adekvatnost' gemodializa. Klassicheskiy podhod. "Nefrologija i dializ" №1. 2001. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.nephro.ru>.

2. Obwie Polozhenija Prakticheskikh Rekomendacij NKF-DOQI (Executive Summaries NKF-DOQI). National Kidney Foundation, Inc. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.kidney.org>.

3. Pat. 2152041 Rossijskaja Federacija, MPK 7 G 01 N 33/68. Sposob kontrolja adekvatnosti gemodializa/ Jampol'skij A.F.; Fedorovskij N.M.; Eremeeva L.F; zajavitel' i patentoobladatel' Jampol'skij A.F.; Fedorovskij N.M.; Eremeeva L.F (RU). – № 99114382/14; zajavl. 30.06.1999; opubl. 27.06.2000. – 3 s.

Bondareva Lyudmila Alexandrovna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor, associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Tel: (4862)41-98-76;

E-mail: 270174@mail.ru

Shoshina Lyudmila Alexeevna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Magistrand

Tel: (4862)41-98-76;

E-mail: ijbyf@yandex.ru

ОЦЕНКА УРОВНЯ СИГНАЛА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ ДИАГНОСТИКЕ БИОТКАНИ

В данной работе рассмотрен численный метод Монте-Карло для решения задачи распространения света в биоткани. Предложена модель кожи человека, созданная в программной среде TracePro. Проведен анализ зависимости интенсивности флуоресценции биоткани от концентрации флуоресцирующего вещества.

Ключевые слова: оптическая неинвазивная диагностика, лазерная флуоресцентная диагностика, моделирование, метод Монте-Карло.

С каждым годом все более широко обсуждаются вопросы применения в практической медицине методов оптической неинвазивной диагностики, основанной на принципах спектрофотометрии и лазерного спектрального анализа. Особые перспективы связываются сегодня с методами неинвазивной лазерной флуоресцентной диагностики (ЛФД), которая базируется на регистрации эндогенной флуоресценции (ЭФ) живых биологических тканей, возбуждаемой низкоинтенсивным лазерным излучением. Практически во всех крупных областях медицины – хирургии, онкологии и радиологии, эндоскопии, ангиологии и гастроэнтерологии, сегодня ведутся интенсивные клинико-экспериментальные исследования, направленные на изучение информативности ЛФД в различных практических ситуациях. Поврежденные опухолевыми, гнойными или какими-либо иными деструктивными процессами живые биоткани, часто обладают значительно повышенной или значительно пониженной ЭФ по сравнению со здоровыми (интактными) тканями в зависимости от выбранных длин волн возбуждения и регистрации ЭФ, что открывает новые возможности по дифференцировке здоровых и патологически измененных биотканей.

Биоткань содержит большое число различных природных флуорофоров, которые имеют различные спектральные области поглощения и флуоресценции, различные квантовые выходы флуоресценции, различные времена затухания флуоресценции (рис. 1).

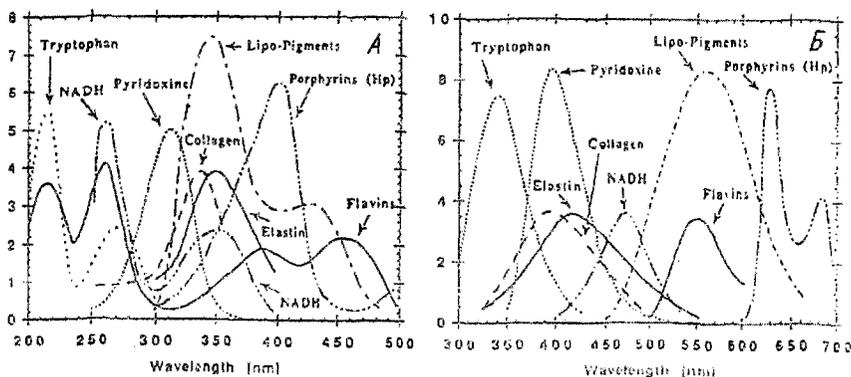


Рисунок 1 – Спектры поглощения (А) и флуоресценции (Б) основных флуорофоров биоткани

Некоторые флуорофоры имеют близкие и перекрывающиеся области поглощения и флуоресценции, в результате чего выходящее из ткани излучение флуоресценции имеет сложный спектральный состав.

Одной из основных задач, решение которой позволит увеличить возможности метода ЛФД, является разделение компонентных вкладов во флуоресцентный сигнал от многокомпонентной смеси сложных многоатомных молекул. Для ее приемлемого решения необходимо создание адекватной математической модели. Модель должна связывать регистрируемый уровень сигнала флуоресценции с соответствующей концентрацией эндогенного флуорофо-

ра. При этом необходимо учитывать, что регистрация проводится в условиях сильного рассеяния и поглощения мутной среды биоткани. Создание аналитической модели сильно затруднено из-за сложности решения задачи даже для простых случаев. Один из известных подходов построения аналитической модели основан на уравнении теории переноса излучения (ТПИ), а также методах его решения (теория Кубелки-Мунка, метод сферических гармоник, диффузное приближение). Таким образом, для решения задач распространения света в биоткани часто используют численные методы, к которым относится вероятностный метод Монте-Карло.

С точки зрения решения уравнения переноса излучения, метод Монте-Карло базируется на численном моделировании транспорта фотонов в рассеивающей среде. Случайное блуждание фотонов внутри образца биоткани прослеживается от точки влета в образец до его поглощения или выхода из образца. Метод включает в себя пять основных шагов: генерация источника фотона, генерация траектории, поглощение, ликвидация, регистрация. Соответствующий математический алгоритм можно реализовать, прибегнув к программированию, однако имеется также возможность использовать специализированный пакет прикладных программ. Результаты, представленные в данной статье получены в программной среде TracPro, предназначенной для светотехнического анализа.

Созданная в программной среде TracPro трехмерная модель кожи человека представлена на рисунке 2.

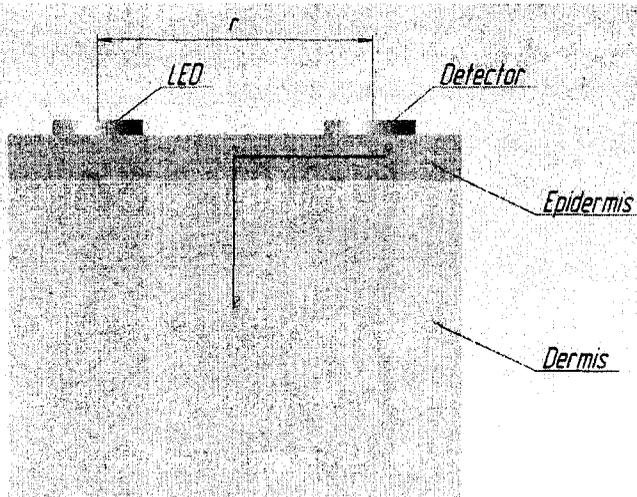


Рисунок 2 – Модель кожи человека

Модель состоит из двух основных слоев – эпидермиса и дермы. Средняя толщина эпидермиса, который относительно мало изменяется по толщине, составляет примерно 100 мкм. Дерма составляет основную массу и объем кожи. В модели выбраны следующие размеры слоев для эпидермиса и дермы соответственно: 1x1x0,1мм и 1x1x0,7мм. Расстояние между источником и приемником (база измерений) $r=0,6$ мм.

Первоначально рассматривалась аналитическая модель, в которой интенсивность флуоресценции I_F в зависимости от концентрации флуорофора подчинялась следующему закону [1]:

$$I_F(\lambda) = I_0 \ln 10 \varepsilon(\lambda) c d \eta \frac{\Omega}{4\pi}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность падающего света;

$\varepsilon(\lambda)$ – молярный коэффициент экстинкции;

c – концентрация поглощающих молекул;

d – толщина слоя;

η – квантовый выход флуоресценции;

Ω – телесный угол регистрации изотропного излучения регистрации.

Формула (1) означает, что флуоресценция пропорциональна концентрации и квантовому выходу поглощающих молекул. Однако, как было сказано выше, в мутных средах, к которым относится и кожа, наблюдается рассеяние и поглощение фотонов, что делает данное выражение неприменимым. Для описания параметров распространения света для эпидермиса и дермы заданы следующие параметры [2, 3]: коэффициент поглощения $\mu_{a3}=50 \text{ см}^{-1}$, $\mu_{a1}=2,6 \text{ см}^{-1}$; коэффициент рассеяния $\mu_{s3}=600 \text{ см}^{-1}$, $\mu_{s1}=250 \text{ см}^{-1}$; фактор анизотропии $g_3=0,76$, $g_1=0,76$, т.е. средний косинус угла, на который происходит отклонение направления движения фотона от первоначального направления распространения при акте рассеяния. В качестве фазовой функции рассеяния использовалась функция Хени-Гринштейна.

В качестве модельного флуоресцирующего вещества использовался искусственный флуорофор *Alexa Fluor 488*. Выбор данного вещества обусловлен наличием хорошо документированных параметров флуоресценции и качественно не меняет применимости модели для другого флуорофора (в том числе эндогенного). Флуорофором «насыщен» слой дермы, так как именно в дерме находится основное количество эндогенных флуорофоров. Длина волны возбуждения для выбранного флуорофора составляет 499 нм, мощность источника зондирования – 30 мВт.

На рисунке 3 приведена полученная картина распространения флуоресцирующих лучей внутри ткани при 30000 модельных фотонах.

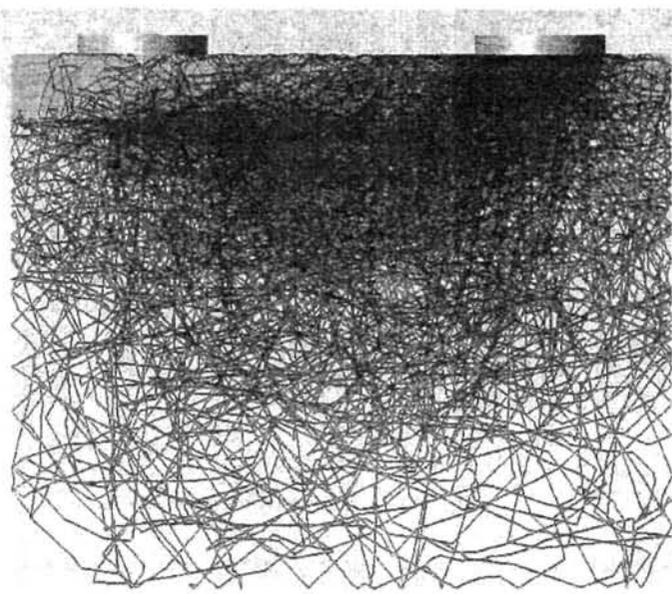


Рисунок 3 – Распространение флуоресцирующих лучей внутри ткани

Проведенное моделирование позволило оценить интенсивность излучения, в данном случае флуоресцентного, приходящего на фотоприемник. На рисунке 4 представлена диаграмма распределения излучения флуоресценции по поверхности приемника.

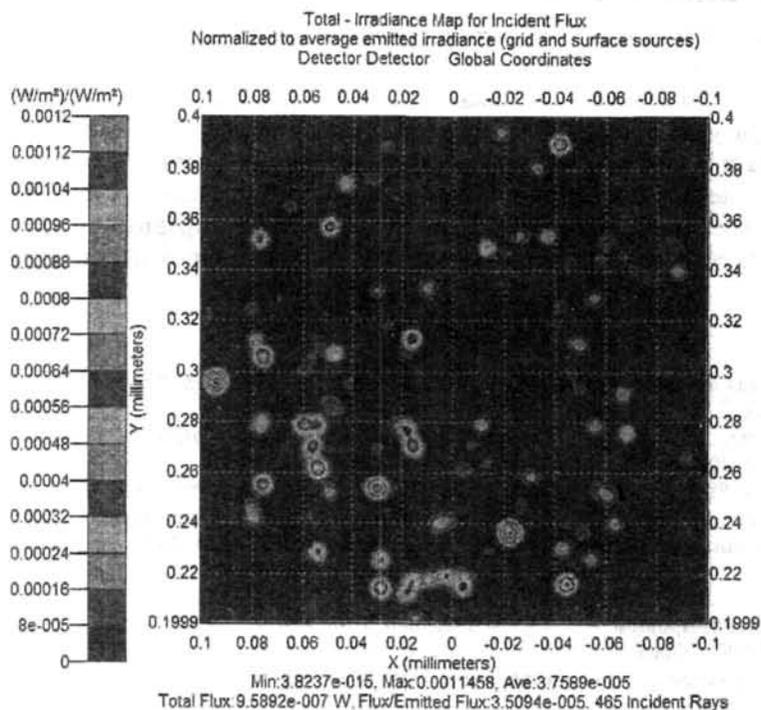


Рисунок 4 – Диаграмма интенсивности падающего на фотоприемник потока лучей

Увеличивая концентрацию флуорофора, регистрировали изменение мощности интенсивности излучения, приходящего на фотоприемник. Полученная зависимость представлена на рисунке 5.

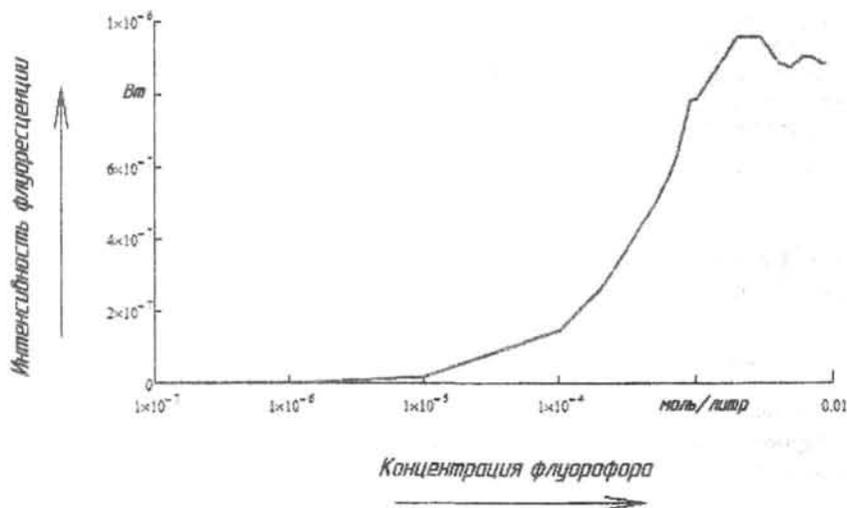


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности флуоресценции от концентрации флуорофора Alexa Fluor 488

Анализ полученных данных показывает, что зависимость интенсивности флуоресценции от оптических свойств биотканей является не только нелинейной, но и немонотонной, т.е. при некоторой концентрации флуорофора можно наблюдать максимум амплитуды флуоресценции. При концентрациях выше или ниже этого значения интенсивность флуоресценции

ции будет меньше. Стоит отметить, что подобные результаты соотносятся с данными, полученными аналитическим методом [4].

Флуоресценция тканей – сложный механизм, зависящий кроме указанных параметров также от температуры, топологической неоднородности, различия свойств каждого исследуемого образца и т.д. Метод Монте-Карло характеризует достаточная точность и универсальность. Развитие аппаратных и программных средств вычислительной техники уменьшает роль фактора времени при расчетах. Таким образом, рассмотренный метод является одним из наиболее перспективных при решении задач, связанных с оптикой биоткани.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптическая биомедицинская диагностика. В 2 т. Т. 2 / Пер. с англ. под ред. В.В.Тучина. – М., Физматлит, 2007. – 368 с.
2. Пушкарева, А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 103 с.
3. Biomedical Photonics Handbook / Edited by Tuan Vo-Dinh. – CRC Press 2003.
4. Smirnova O. D., Rogatkin D. A., Mathematical simulations of registered signals in laser noninvasive medical fluorescent diagnostics // 15th International Conference «Laser Optics 2012» (25-29 June 2012, St.Petersburg, Russia), 2012.

Дрёмин Виктор Владимирович

Государственный университет-УНПК, г. Орёл

Студент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

г. Орёл, Наугорское шоссе, 29

E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Жеребцов Евгений Андреевич

Государственный университет-УНПК, г. Орёл

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

г. Орёл, Наугорское шоссе, 29

E-mail: zherebzow@gmail.com

Дунаев Андрей Валерьевич

Государственный университет-УНПК, г. Орёл

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»,

г. Орёл, Наугорское шоссе, 29

E-mail: a.v.dunaev@dundee.ac.uk

V.V. DREMIN, E.A. ZHEREBTSOV, A.V. DUNAEV

ASSESSMENT OF THE SIGNAL LEVEL DURING LASER FLUORESCENT DIAGNOSTICS BY THE MONTE-CARLO METHOD

This paper considers a numerical Monte-Carlo method for solving the problem of light propagation in biological tissue. It suggested a model of human skin and analysis of fluorescence intensity on the fluorescence matter concentration in the biological tissue.

Keywords: *optical noninvasive diagnostics, laser fluorescence diagnostics, modeling, the Monte-Carlo method.*

1. Opticheskaja biomedicinskaja diagnostika. V 2 t. T. 2 / Per. s angl. pod red. V.V.Tuchina. – М., Fiz-matlit, 2007. – 368 s.
2. Pushkareva, A.E. Metody matematicheskogo modelirovanija v optike biotkani. Uchebnoe posobie. SPb: SPbGU ITMO, 2008. – 103 s.
3. Biomedical Photonics Handbook / Edited by Tuan Vo-Dinh. – CRC Press 2003.
4. Smirnova O. D., Rogatkin D. A., Mathematical simulations of registered signals in laser noninvasive medical fluorescent diagnostics // 15th International Conference «Laser Optics 2012» (25-29 June 2012, St.Petersburg, Russia), 2012.

Dremin Viktor Vladimirovich

State University ESPC

Student, chair "Instrument engineering, metrology and certification"

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Zherebзов Eugeny Andreevich

State University ESPC

Post-graduate student, chair "Instrument engineering, metrology and certification"

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

E-mail: zherebзов@gmail.com

Dunaev Andrey Valerievich

State University ESPC

Candidate of technical sciences, associated professor, chair "Instrument engineering, metrology and certification"

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

E-mail: a.v.dunaev@dundee.ac.uk

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 620.179.16

Н.Н. КОНОВАЛОВ, Н.В. МЕЛЕШКО

ПРИМЕРЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НЕСПЛОШНОСТЕЙ В ОДНОСТОРОННИХ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ДЕФЕКТОСКОПОМ С АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

Получены результаты контроля ультразвуковым дефектоскопом с антенной решеткой образцов стыковых сварных соединений с последующим вскрытием. Приведены акустические изображения различных типов несплошностей в сварных соединениях. Предложены информационные признаки для определения характера выявленных несплошностей. Рассмотрен способ измерения высоты непроваров в стыковых сварных соединениях по расстоянию между сигналами (фокусными пятнами).

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, эхометод, фазированная антенная решетка, сварное соединение, дефектоскоп с антенной решеткой.

При ультразвуковом контроле (УЗК) сварных соединений небольшой толщины (от 6 до 20 мм) применяется эхо-метод, оценивающий выявленную несплошность по амплитуде эхо-сигнала. Существенно повышающий информативность УЗК основанный на приеме волн, рассеянных на концах плоскостного дефекта, дифракционно-временной метод (time of flight diffraction – TOFD) для изделий такой толщины практически не применяется. Рассеяния поперечных волн, возбуждаемые и принимаемые наклонными преобразователями (ПЭП), исследованы теоретически и экспериментально [1].

Одним из результатов исследований возможностей контроля сварных соединений дефектоскопами, работающими с антенными решетками (АР), может стать создание «атласа дефектов». В статье представлены некоторые выявленные на реальных образцах сварных соединений (рис. 1) акустические изображения несплошностей, а также результаты срезов и вскрытий образцов.

В представленной статье оценивалась возможность определения дефектоскопами с АР реальной высоты плоскостных несплошностей на основе приема волн, рассеянных на концах непроваров в сварных соединениях небольшой толщины.

АР представляет собой набор пьезоэлектрических элементов, расположенных на одной подложке. Самые распространенные типы АР – линейные. Дефектоскопы с АР формируют изо-



Рисунок 1 – Образец объектов контроля

бражение в виде двумерного сечения из набора эхо-сигналов когерентными (синфазными) способами. В статье представлены результаты, полученные на дефектоскопе с АР, который реализует алгоритм фокусируемой синтезируемой апертуры (SAFT – Synthetic Aperture Focusing Technique). Используются данные об амплитуде эхо-сигналов и времени их прихода в каждую точку приемной апертуры решетки. Подробно этот метод описан в [2, 3, 4] и реализован в ультразвуковом приборе «A1550 IntroVisor» (ООО «АКС»).

В настоящее время внедрение в практику неразрушающего контроля дефектоскопов с АР ограничивает отсутствие соответствующей нормативно-методической документации. Кроме того, мало акустических изображений несплошностей, получаемых на экране дефектоскопа (с фокусными пятнами) на реальных образцах. Фокусные пятна – это не реальные размеры дефектов, а некая проекция, образ дефекта или его части, характеризующей способность отражать или рассеивать ультразвуковые (УЗ) волны. Однако в ряде случаев изображение несплошности позволяет определить её реальные размеры. Например, можно довольно точно определить высоту такого распространенного плоскостного дефекта как непровар. При выявлении непровара в корне одностороннего сварного соединения на экране присутствуют два фокусных пятна, одно из которых является сигналом от углового отражателя, образованного двугранным углом пластины соединения, а другое – сигналом от дифракционного рассеяния на конце непровара. По расстоянию между фокусными пятнами можно определить размер (высоту) непровара, а не получаемый при работе с классическими УЗ дефектоскопами и ПЭП условный размер дефекта.

Возможности измерения и идентификации несплошностей оценивались на специально сваренных образцах (рис. 1) односторонних со скосом одной кромки стыковых сварных соединений (тип С8 по ГОСТ 5760-80) из стали 09Г2С толщиной 10 мм (дополнительно 8 мм). Измерения высоты непровара (рис. 2) выполнялись с двух сторон сварного соединения.

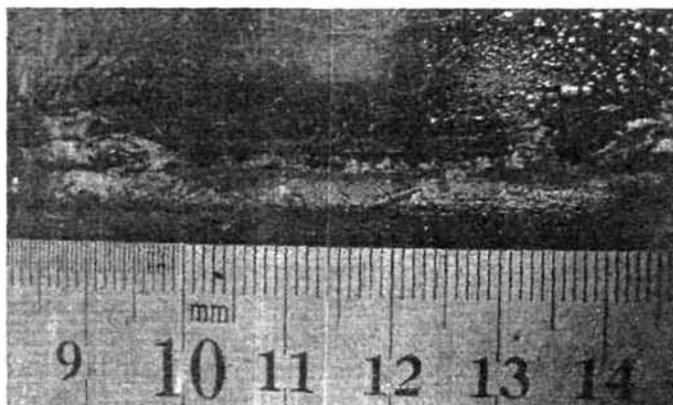


Рисунок 2 – Непровар в сварном соединении (вид на часть образца снизу)

Особенности выявления плоскостных несплошностей предварительно оценивались при выявлении прорезей, которые хорошо моделируют непровары в корне односторонних сварных соединений. На образце толщиной 10 мм были выполнены прорезы высотой 1, 2, 3 и 4 мм. Изображения экранов прибора A1550 IntroVisor от вышеуказанных прорезей приведены на рисунках 3-6. На рисунке слева показана амплитуда и координаты сигнала от угла, на правом – амплитуда и координаты сигнала от дифракционного рассеяния на вершине прорези.

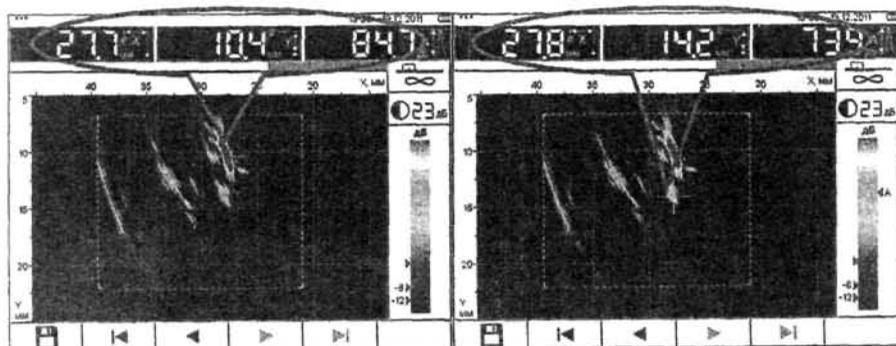


Рисунок 3 – Изображение прорези высотой 4 мм

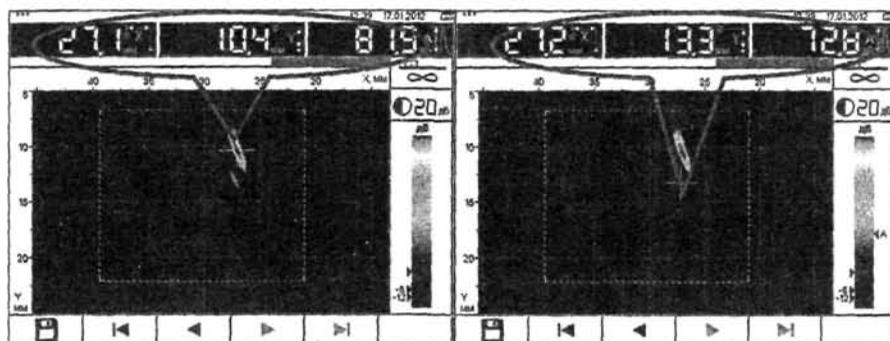


Рисунок 4 – Изображение прорези высотой 3 мм

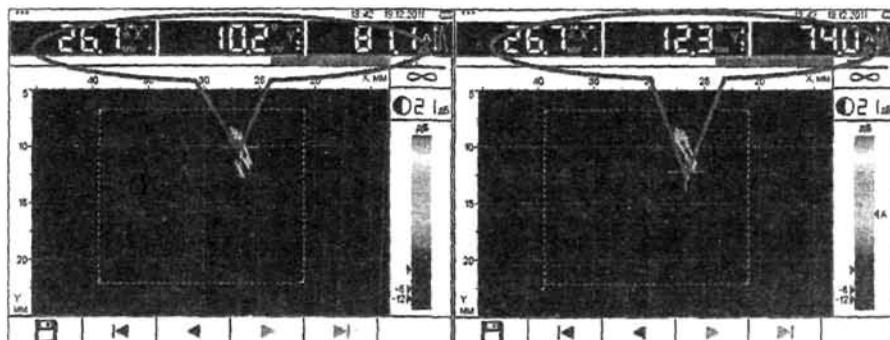


Рисунок 5 – Изображение прорези высотой 2 мм

Прорезь высотой 1 мм (рис. 6) можно оценить только по амплитуде углового сигнала, т.к. не вполне корректно различать несплошности, размеры которых и/или расстояние между ними порядка длины волны ультразвука и менее.



Рисунок 6 – Изображение прорези высотой 1 мм

Погрешность измерения высоты прорези по расстоянию между амплитудами фокусных пятен, составляет не более 5%. При небольшой высоте прорези (до 5 мм) можно сказать, что чем больше высота прорези, тем больше амплитуда сигнала от начала прорези. Разница амплитуд между сигналами от начала и вершины прорези составляет более 6 дБ.

После среза (рис. 7) и последующего вскрытия (рис. 8, 9) образцов были измерены высоты непроворов в записанных при контроле дефектоскопом с АР точках.



Рисунок 7 – Срез на расстоянии 41 мм от начала точки сканирования

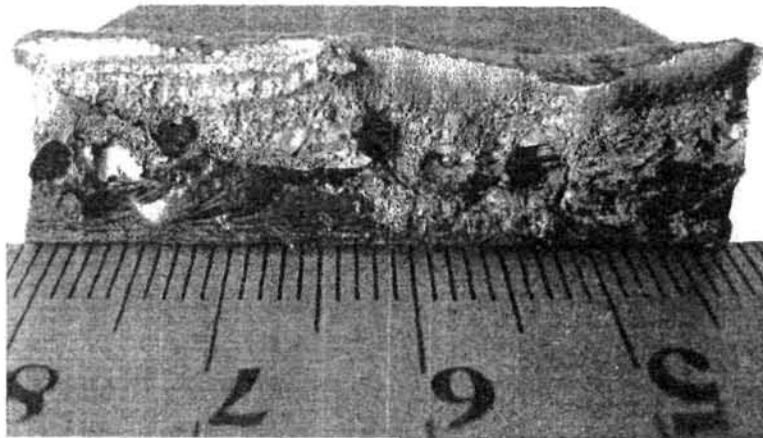


Рисунок 8 – Вскрытие части образца (вид на скос кромки)

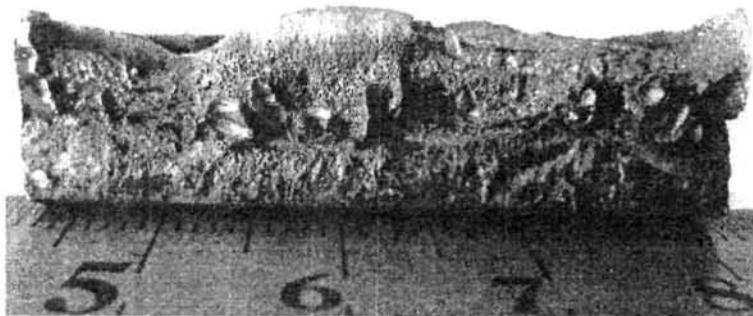


Рисунок 9 – Вскрытие части образца (вид на кромку без скоса)

Результаты при контроле со стороны без скоса кромок достаточно легко интерпретируются. Например, результат на расстоянии 41 мм (рис. 7) со стороны без скоса кромки показан на рисунке 10.

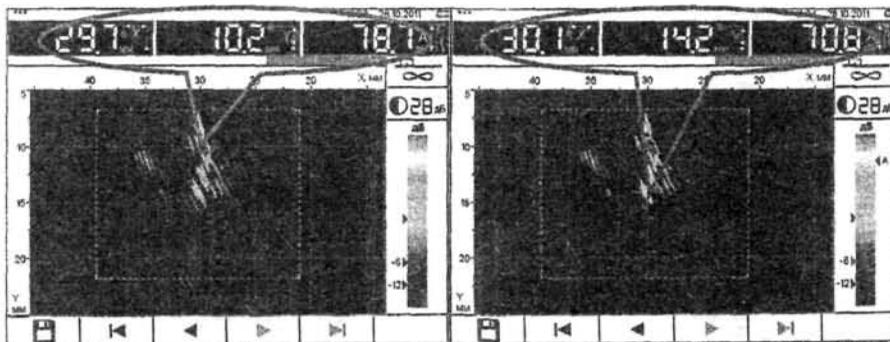


Рисунок 10 – Изображение на расстоянии 41 мм со стороны без скоса

По координатам можно довольно точно определить высоту непровара как расстояние между фокусными пятнами. Амплитуда сигнала от начала непровара более чем на 6 дБ больше амплитуды сигнала от конца непровара.

Погрешность измерения высоты непровара составляет не более 20 % (рис. 11).

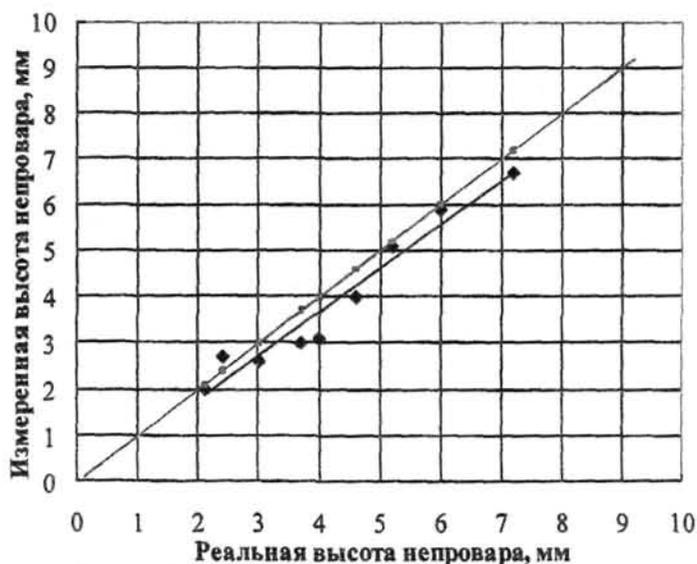


Рисунок 11 – Реальная и измеренная высота непровара

Корреляции между амплитудами начала непровара или конца с реальной высотой прорези получить не удалось. Разница амплитуд между началом и концом непровара вне зависимости от высоты непровара всегда больше 6 дБ (рис. 12).

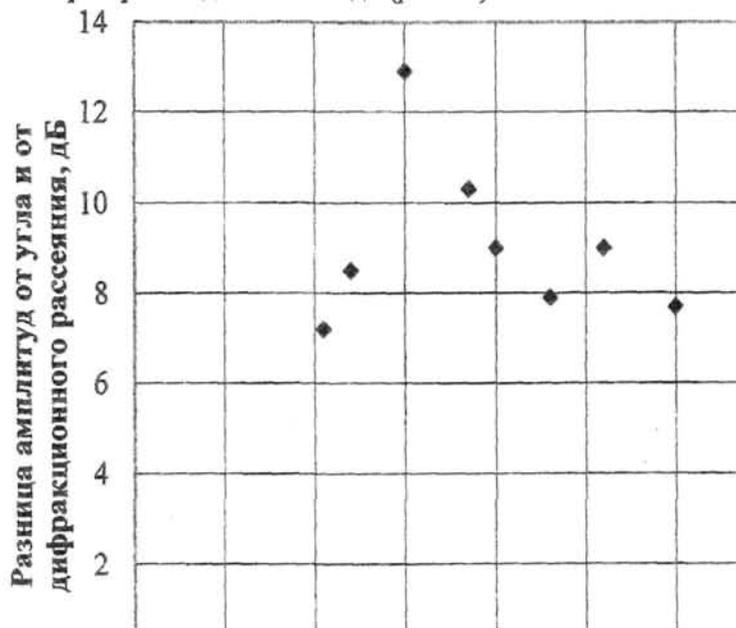


Рисунок 12 – Разница амплитуд (от начала и конца непровара) от высоты непровара

При контроле со стороны скоса кромки на экране может появиться сигнал не только от дифракционного рассеяния на конце, но и полученный зеркальным отражением от скоса (рис. 13, 14). В этом случае амплитуда сигнала от угла может быть меньше амплитуды сигнала от скоса кромки.



Рисунок 13 – Срез на расстоянии 83 мм от начала точки сканирования

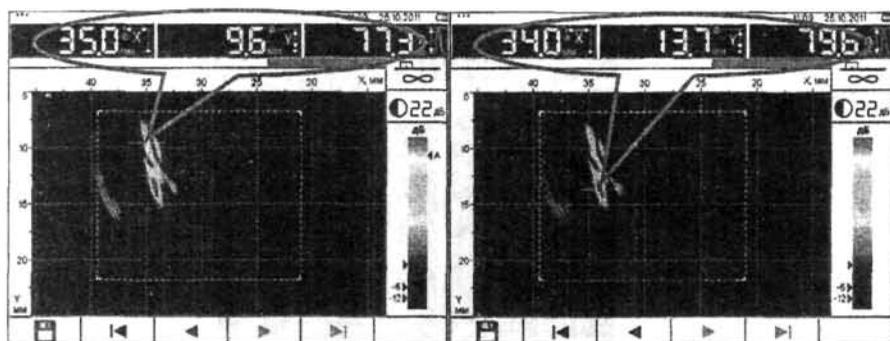


Рисунок 14 – Изображение на расстоянии 83 мм со стороны скоса кромки

После вскрытия образцов были выявлены не только непровары, то также поры, шлаковые включения, свищи (рис. 15).



Рисунок 15 – Срез на расстоянии 196 мм от начала точки сканирования

На рисунке 16 присутствует несколько фокусных пятен от:

- сигнала от начала непровара (рис. 16а);
- сигнала от поры (рис. 16б);
- зеркально отраженного от скоса сигнала (рис. 16в);
- сигнала от конца непровара.

УЗК и последующее вскрытие сварных соединений показали, что при контроле со стороны без скоса кромок возможно довольно точно (погрешность менее 20 %) определить высоту непровара. Высота непровара определяется по разнице координат двух фокусных пятен разной амплитуды – сигналов от начала и конца непровара (составляет более 6 дБ). При контроле со стороны скоса не всегда удается получить сигнал от конца непровара, т.к. его экранирует довольно большой сигнал, получаемый от скоса кромки. Дополнительный информационный признак, по которому можно судить об отражателе, – это разница амплитуд. Если разница сигналов от начала и конца предполагаемого непровара положительная и составляет более 6 дБ, то сигнал получен от дифракционного рассеяния на конце непровара, и можно определять высоту с погрешностью не более 20 %; если отрицательная, то сигнал получен от скоса.

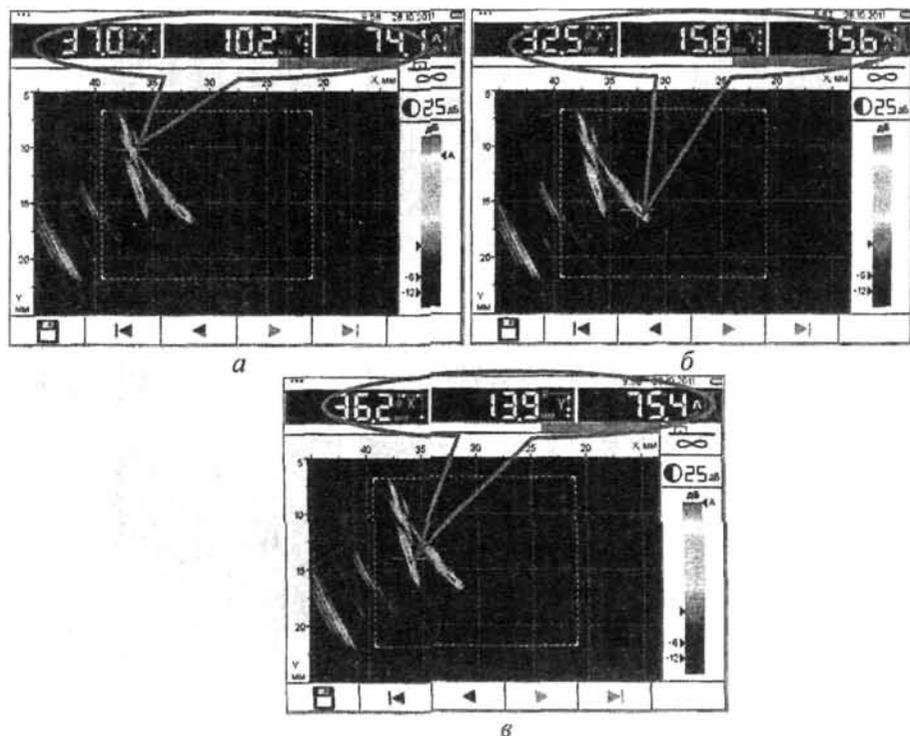


Рисунок 16 – Изображение на расстоянии 196 мм со стороны скола кромок

Выводы

1. Использование ультразвуковых дефектоскопов с антенными решетками позволяет в ряде случаев на основе измерений расстояний между фокусными пятнами на акустических изображениях перейти от дефектоскопии к дефектометрии.

2. Анализ акустических изображений, получаемых при контроле АР, дает дополнительные информационные признаки, позволяющие идентифицировать характер выявленных дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов, В.Н. Исследование рассеяния поперечных волн на трещине [Текст] / В.Н. Данилов, И.Н. Ермолов, С.В. Ушаков // Дефектоскопия. – 2001. – №5. – С. 42-49.
2. Самокрутов, А.А. Сканирование в ультразвуковой томографии [Текст] / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // В мире НК. – 2010. – №3(49). – С. 7-10.
3. Воронков, В.А. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектах [Текст] / В.А. Воронков, И.В. Воронков, В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // В мире НК. – 2011. – №1(51). – С. 64-70.
4. Бадалян, В.Г. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов [Текст] / В.Г. Бадалян, Е.Г. Базулин, А.Х. Вопилкин [и др.]; под ред. А.Х. Вопилкина. – М.: Машиностроение, 2008.-368 с.

Коновалов Николай Николаевич

ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность»

Заместитель генерального директора, д.т.н., г. Москва, ул Таганская, д. 334А

Тел. +7 (495) 5005198

E-mail: KonovalovNN@oaontc.ru

Мелешко Наталья Владимировна

НУЦ «КАСКАД» МГУПИ

Начальник научно-исследовательского отдела, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20

Тел. 8-916-120-54-15;

E-mail: meleshkonatalia@gmail.com

N.N. KONOVALOV, N.V. MELESHKO

DEFECTS VISUALIZATION EXAMPLES IN UNILATERAL BUTT WELDED AT FLAW DETECTION WITH ANTENNA ARRAY ULTRASONIC TESTING

Ultrasonic testing results of butt welded by flaw detection with antenna array are received with the subsequent distraction of samples. Acoustic images of various types of defects in welded connections are shown. Information signs for determination of character of the revealed defects are offered. The way of measurement of height lack of root fusion in butt welded connections on distance between signals (focal spots) is considered.

Keywords: *ultrasonic testing, echo method, phased antenna array, welding, flaw detector with the antenna array.*

1. Danilov, V.N. Issledovanie rassejaniya poperechnyh voln na trevine [Tekst] / V.N. Danilov, I.N. Ermolov, S.V. Ushakov // Defektoskopija. – 2001. – №5. – S. 42-49.

2. Samokrutov, A.A. Skanirovanie v ul'trazvukovoj tomografii [Tekst] / A.A. Samokrutov, V.G. Shevaldykin // V mire NK. – 2010. – №3(49). – S. 7-10.

3. Voronkov, V.A. O primenimosti tehnologii antennyh reshetok v reshenii zadach UZK opasnyh proizvodstvennyh ob#ektah [Tekst] / V.A. Voronkov, I.V. Voronkov, V.N. Kozlov, A.A. Samokrutov, V.G. Shevaldykin // V mire NK. – 2011. – №1(51). – S. 64-70.

4. Badaljan, V.G. Ul'trazvukovaja defektometrija metallov s primeneniem golograficheskikh metodov [Tekst] / V.G. Badaljan, E.G. Bazulin, A.H. Vopilkin [i dr.] ; pod red. A.H. Vopilkina. – M.: Mashinostroenie, 2008.-368 s.

Konovalev Nikolay Nikolaevich

JSC "NTC "Industrial safety"

Deputy General Director, Dr., Moscow, St. Taganskaya 334A

Tel. +7 (495) 5005198

E-mail: KonovalevNN@oaontc.ru

Meleshko N.V.

NCA "CASCADE" MGUPI

Head of Research Department, Moscow, St. Stromynka, 20

Tel. 8-916-120-54-15

E-mail: meleshkonatalia@gmail.com

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, 43-48-90
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 28.04.2012 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,3.

Тираж 600 экз.
Заказ № 191/12 П1

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.