

Редакционный совет
Голеньков В.А. д-р техн. наук,
проф., председатель
Пидипенко О.В. д-р техн. наук,
проф., зам. председателя
Радченко С.Ю. д-р техн. наук,
проф., зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.,
секретарь
Астафичев П.А. д-р юрии. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.И. д-р техн. наук, проф.
Позова Л.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редакция
Главный редактор
Степанов Ю.С. д-р техн. наук,
проф., заслуженный деятель науки
Российской Федерации

Заместители главного редактора
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии
Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф.
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф.
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф.,
член-кор. РАН
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф.
Зубарев Ю.М. д-р техн. наук, проф.
Зубачанов 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) 41-98-18, 55-55-24, 41-98-03,
55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_in@ostu.ru

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

Подписный индекс 29504
по объединенному каталогу «Пресса
России»

© Госуниверситет – УНПК, 2013

Содержание

Естественные науки

Поланов Ю.Х. Задача о центральном взрыве газо-воздушной смеси в атмосфере.....	3
Кольцов А.Ю., Корнеев А.Ю. Определение обобщенной функции затора при перекосе ротора в кони- ческих подшипниках жидкостного трения.....	11
Бочков А.В., Козырев Ю.М., Пономарев А.В., Холин Н.Н., Хомяков Е.И., Яблочко С.В., Лавин И.М. Ана- литическое исследование условий неподвижности одной из границ в процессе горячего изостатиче- ского прессования цилиндрического слоя.....	16
Рытов М.Ю., Мегаев К.А. Моделирование технологического процесса обмена данными в среде кор- поративного портала с агрегированным трафиком.....	23
Лиопо В.А., Овчинников Е.В., Струк В.А., Эйсмант Е.И. Динамические свойства наноразмерных частиц.....	29

Моделирование технологических процессов

Ермаков И.Е., Михеев А.В. Анализ закономерностей и зависимостей параметров процесса гидрообра- зительного резания, значимых для технико-экономического анализа, оптимизации и комплексного моделирования.....	34
Чернова О.И., Злобин С.Н., Петров Н.В. Математическая модель работы малогабаритного гидрав- лического предохранителя кривошипного пресса.....	42

Конструирование, расчеты, материалы

Молчанова Е.С., Бычков Н.А., Черняев С.И. Сравнение плазменного, гидроабразивного и лазерного способов резки, и прошивки конструкционных материалов в радиоэлектронной промышленности..	50
Осадчий В.Я., Субботин С.А. Технологические и конструктивные особенности прошивных станов поперечно-винтовой прокатки.....	58

Машиностроительные технологии и инструменты

Воробьев Е.И., Алабакаев А.Ю. Технологические роботы (динамика и управление).....	63
Корнеев А.В., Савин Л.А., Степанов Ю.С. Роль нанотехнологий в развитии гидродинамической гео- рии смазки.....	69
Макалова О.А., Рубин П.С., Качаев А.Н. Выбор варианта черновой обработки цилиндрических кол- лес с арочными зубьями.....	75
Ревенков А.А., Анисимов Р.В. Определение допустимого количества переточек дольчиков для нарезания колес с внутренними зубьями незольдентного профиля.....	80
Татарченко Н.В., Мельникова Ю.С. Экспериментальная гибка трубыю круглому копиру с использо- ванием дорна.....	86

Машины, аппараты, технологии пищевой и легкой промышленности

Черепенько А.А., Черепенько А.П., Жаворонков А.И. Аналитические исследования процесса изгиба рабочей поверхности гладильной подушки.....	89
---	----

Приборостроение и биотехнические системы

Шкатов П.И., Мостяев И.В. Исследование новых возможностей вихревой дефектоскопии при использовании магнитной жидкости.....	100
Васильев А.М., Стетов В.В. Методология передачи и обработки данных в распределенных инфор- мационно-измерительных системах с коммутацией пакетов.....	106
Сувальцев А.И., Сафронова Н.А. Эксперименты с косвенным контролем и управлением уровнем воды в электрическом электродном парогенераторе.....	111

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

Некрасов В.И., Мишин В.В., Жидков А.В. Метод и средство диагностирования эндопротезов суставов с парой трения металл-металл на стадии производства.....	117
Лукин М.В. Способ исследования процесса развития микроорганизмов с контролем параметров питательной среды.....	124
Голеньков В.А., Воробьев С.А., Козлов Д.З. Применение методов биоиндикации для оценки качества окружающей среды.....	130
Воробьев В.И., Тихомиров В.П., Измеров М.А., Волохов С.Г. Влияние электрического тока и магнитного поля на коэффициент сцепления колеса с рельсом.....	137
Тин Чжо, Трояновский В.М. Информационные технологии для обнаружения износа зубчатых колёс... ..	143

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, определенных Высшей аттестацион-
ной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации, для опубликования основных
научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней.



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

№ 6 (302) 2013
November-December

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
Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president
Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president
Borzenko 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., Acad-
emician 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,
Nauorskoe Chossee, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

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

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi» 29504

© State University – ESPC, 2013

Contents

Natural science

<i>Polandov I.U.H.</i> Problems on the central explosion gas-air mixtures in the atmosphere.....	3
<i>Koltsov A.YU., Korneyev A.YU.</i> The generalized clearance function determination in the liquid friction conical bearings.....	11
<i>Bockov A.V., Kozyrev Yu.M., Ponomarev A., Cholin N.N., Chomyakov E.I., Yablochko S.V., Lavit I.M.</i> Analytical study of one border immovability conditions in the process of cylindrical layer hot isostatic pressing.....	16
<i>Rytov M.J., Megaev K.A.</i> Simulation process data exchange among corporate portal with aggregated traffic.....	23
<i>Liopo V.A., Ovchinnikov E.V., Struk V.A., Eismont E.I.</i> Dynamic properties of nanoparticles.....	29

Process modeling

<i>Ermakov I.E., Mikheev A.V.</i> Analysis of factors and parametric laws of hydro-abrasive erosion process, which are significant for tech-economic analysis, optimization and complex modeling....	34
<i>Chernova O.N., Zlobin S.N., Petrov N.V.</i> Mathematical working model of compact hydraulic crank press safety device.....	42

Construction, calculation, material

<i>Molchanova E.S., Bychkov N.A., Chernyaev S.I.</i> Comparison of plasma, water jet and laser cutting methods, and punching of structural materials in the electronics industry.....	50
<i>Osadchy V.Ya., Subbotin S.A.</i> Technological and design features piercing mills produced by cross-helical rolling.....	58

Machine building technology and toolware

<i>Vorobyev T.I., Albagatchiev A.YU.</i> Technological robots (dynamics, control).....	63
<i>Kornaev A.V., Savin L.A., Stepanov Y.S.</i> Nanotechnologies in advancement of hydrodynamic theory of lubrication.....	69
<i>Makalova O.A., Rubin P.S., Kachanov A.N.</i> The choice of rough machining of cylindrical wheels with arched teeth.....	75
<i>Revenkov A.A., Anisimov R.V.</i> Determination of amount allowed regrinding cutter for cutting the internal gear not involute profile.....	80
<i>Tatarchenkov N.V., Melnikova Y.S.</i> Experimental bending pipes a round copier using dorn.....	86

Machine, apparatus, technology light and food industry

<i>Cherepenko A.A., Cherepenko A.P., Zhavoronkov A.I.</i> Analytical research of the process of bending working surface ironing pillows.....	89
--	----

Instrument making and biotechnological system

<i>Shkatov P.N., Mostyaev I.V.</i> Investigation of new possibilities of eddy-current flaw detection using magnetic fluids.....	100
<i>Vasil'ev A.M., Sleptsov V.V.</i> Methodology of data transmission and processing in distributed information measurement systems of packet-switched.....	106
<i>Suzdalceva A.I., Safronova N.A.</i> Parameter definition for water-level indirect control in electric electrode steam generator.....	111

Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Nikrasov V.I., Mishin V.V., Jidkov A.V.</i> Method and means for diagnosis of joints endoprosthesis with a pair of friction metal-on-metal on the stages of production.....	117
<i>Lugin M.V.</i> Method of research development process of microorganisms with control parameters of nutritional environment.....	124
<i>Golenkov V.A., Vorobiev S.A., Kozlov D.Z.</i> Application of methods of bioindication for evaluation environmental quality.....	130
<i>Vorobei V.I., Tikhomirov V.P., Izmerov M.A., Volokhov S.G.</i> Effect of electric current and magnetic field on the coefficient of adhesion wheel and rail.....	137
<i>Ting Zhou, Troyanovskii V.M.</i> Information technologies for the detection of wear on the gear wheels.....	143

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

УДК 536.463

Ю.Х. ПОЛАНДОВ

ЗАДАЧА О ЦЕНТРАЛЬНОМ ВЗРЫВЕ ГАЗО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В АТМОСФЕРЕ

Аналитически решена задача взрыва газо-воздушной смеси в атмосфере, получено, что распространение пламени в отсутствие действия архимедовых сил происходит радиально с одинаковой скоростью, при этом радиус максимальный объем полученного облака продуктов сгорания превышает приблизительно в 2 раза исходный радиус газовой смеси. Действие архимедовых сил сказывается уже через 0,1 с. По степени влияния на форму границ силы давления взрыва и архимедовы силы уравниваются уже через 0,15 с, а через 1 с от начала взрыва доминирующее влияние на форму границ оказывают архимедовы силы. Выяснено, что объем облака зависит от времени горения, а форма границ от архимедовых сил.

Ключевые слова: взрывы газа; центральный взрыв; сила Архимеда.

Варианты решения этой задачи известны достаточно давно [1], но постановка задач там ограничивалась лишь развитием взрыва без учета действия архимедовых сил. В полной мере эта задача решалась численными методами, однако понятно, что громоздкость этих методов затрудняет восприятие влияния основных параметров, под действием которых развивается взрыв, чтобы анализировать их в простых соотношениях [2].

Аналитические методы, напротив, позволяют проводить анализ, ориентируясь на зависимость в явной форме [3]. Однако, понятно и другое, возможности аналитических методов существенно ограничены, а потому полученные с их помощью выводы относятся лишь к начальной стадии развития облака, то есть, когда его форму можно с определенным приближением принять за сферу.

1 Взрыв газо-воздушной смеси в атмосфере без учёта действия архимедовых сил

Распространение пламени и расширение смеси происходит практически при постоянном давлении, в изобарных условиях, когда связь между температурой и занимаемым объёмом описывается законом Гей-Люссака, справедливом при небольших изменениях давления. Применительно к рассматриваемой нами задаче, когда имеем дело с большим изменением температуры, действие этого закона ограничено случаем, когда смесь и продукты сгорания являются идеальными газами, состав которых не меняется в результате горения. Согласимся с этим допущением, потому что в дальнейшем анализ будет проводиться практически на качественном уровне. Тогда можно утверждать, что по окончании горения смесь займёт объём (рис. 1).

$$V_k = \frac{T_k}{T_0} V_0 = \varepsilon V_0,$$

где V_0, V_k – объём, занимаемый исходной смесью и после горения;

$T_0 = 293$ К, $T_k = 2241$ К – температуры исходной смеси и продуктов сгорания для смеси метана с воздухом соответственно;

$$\varepsilon = 2241/293 = 7,65.$$

Перейдём к радиусам исходного и конечного объёмов и обозначим их как r_0 и r_k ,

$$r_k = \sqrt[3]{\varepsilon} r_0,$$

для смеси метана с воздухом $r_k = 1,97 r_0 \approx 2 r_0$.

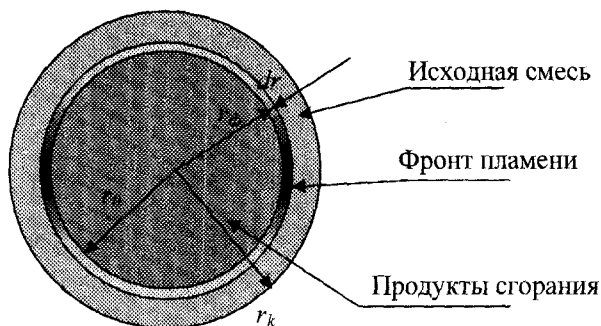


Рисунок 1 – Схема распространения пламени по исходной смеси

Скорость движения фронта пламени линейно зависит от скорости нормального горения,

$$u_{\phi} = \varepsilon u_n,$$

это хоть и не совсем очевидно, но доказывается несложно

$$u_{\phi} = \frac{dr}{dt} = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{4\pi r^2 u_n \varepsilon dt}{dt} = \varepsilon u_n.$$

Для стехиометрической смеси метан-воздух $u_n = 0,29$ м/с и $u_{\phi} = 2,21$ м/с. Отсюда текущее положение фронта пламени рассчитывается просто, если положить начало отсчёта времени с момента начала взрыва, t :

$$r_{\phi} = \varepsilon u_n t,$$

а время выгорания смеси ввиду постоянства скорости можно рассчитать обычно

$$\tau = \frac{r_k}{\varepsilon u_n},$$

для смеси метан-воздух при $r_{\phi} = 1$ м время выгорания смеси составляет $\tau = 0,81$ с.

Можно заметить, что пробег фронтом пламени с нормальной скоростью расстояния, равного длине исходному радиусу сферы возможно за $1/0,29 = 3,45$ с, что намного больше, чем при взрыве с расширением смеси. Объясняется этот эффект тем, что объём, занимаемый несгоревшей смесью, становится тоньше по мере «раздувания» объёма продуктами сгорания.

Судить о давлении внутри продуктов сгорания во время взрыва можно, опираясь на общие рассуждения. Чтобы сообщить исходной смеси, расположенной непосредственно перед фронтом пламени, скорость u_{ϕ} необходимо давление

$$p_v = p - p_a = 0,5 \rho_1 (u_{\phi})^2,$$

где p_a – атмосферное давление, Па;

p_v – избыточное давление взрыва, Паи.

Заметим, что в продуктах сгорания смеси метан-воздух давление взрыва должно составить как минимум 3,05 Паи.

В силу того, что скорость движения фронта пламени неизменна во всё время взрыва, то и давление в облаке с продуктами сгорания всё это время горения должно быть постоянным. С прекращением горения давление в облаке становится равным атмосферному.

2 Учёт архимедовых сил при взрыве газа на открытом воздухе

О том, что гравитационные силы влияют на развитие взрыва, на формы объёма, в котором распространяется пламя, известно. Мольков В.В. [4] выбрал размеры камеры, в которой производил опытные газовые взрывы, зная, что при диаметрах больше 0,16 м влияние гравитационных сил будет заметным, поэтому все опыты он провёл в камере меньшего размера. В свою очередь японские исследователи [5] зафиксировали этот момент с помощью

современной скоростной видеокамеры, (рис. 2). Что касается взрывов объёмов больших размеров, то, как будет показано, роль гравитационных сил в развитие формы облака возрастает с увеличением размера облака и может сильно изменить его сферическую форму ещё до завершения взрыва.

Можно вспомнить печальную картину взрыва дирижабля «Hindenburg», заполненного водородом. На фотографии (рис. 3) видно, что гравитационные силы в формировании облака продуктов сгорания играли едва ли не главную роль.

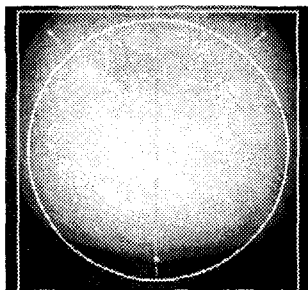


Рисунок 2 – Кадр из видеосъёмки японских исследователей [5]



Рисунок 3 – Фотография взрыва заполненного водородом дирижабля Hindenburg

Задачи о центральных взрывах, как и задачи при других исходных формах объёма в самых общих представлениях со своими особенностями уже решались, правда, с использованием численных методов. Обращение к этим решениям для демонстрации физических аспектов процесса приводит к громоздким построениям, поэтому воспользуемся более простыми средствами.

Прежде всего обратим внимание на то, что динамику взрыва газового облака (как часто называют объём газо-воздушной смеси, готовой ко взрыву на открытом воздухе) можно рассматривать как суперпозицию двух независимых процессов: во-первых, это динамика взрыва без учёта действия гравитационных сил; и, во-вторых, движение облака газа по причине того, что плотность облака меньше плотности окружающего воздуха. Во втором случае часто говорят об архимедовых силах и «всплывании облака».

а) Представим плоский вариант облака в виде окружности с бездиффузионной неразрушимой (примем с оглядкой) границей и расположим начало координат в её центре. Тогда распределение избыточного (выталкивающего) давления по поверхности пламени, если бы это была сфера с жёсткой границей, можно записать в полярных координатах так:

$$\Delta p = u_{\phi} t \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot (1 - \sin \alpha). \quad (1)$$

Глядя на распределение, становится понятным, что ввиду того, что давление осуществляется по нормали к границе, часть избытка давления формирует давление в облаке, а другая – направлена на сдвиг границы по вертикали. Встаёт вопрос, а в какой пропорции «расходуется» избыток давления?

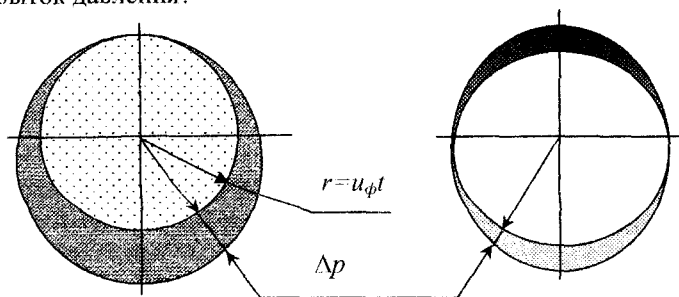


Рисунок 4 – Схема распределения избытка давления по границе облака а) у сферы с жёсткой формой; б) у газообразного облака

Чтобы решить этот вопрос примем для упрощения, что увеличение давления внутри облака не вызывает роста плотности газа внутри него (к слову, увеличение плотности составляет не более доли процента). Что касается перемещения границы, энергии движения массы газа, её кинетической энергии, то эти параметры, безусловно, связаны между собой, поэтому сочтём, что распределение избытка давления по границе соответствует распределению скоростей движения (и смещений тоже) элементов границы. Тогда, в силу условия неразрывности потока площадь (объём), ометаемая элементами нижней границы при смещении, должна быть равновелика площади смещения (объёму смещения) верхней границы, и, что равносильно выполнению равенства интегралов $2\pi \int_L \Delta p dl$ (или по поверхности в 3-мерном случае $2\pi \int_S \Delta p ds$) для нижней и для верхней границ. Пока предположим, что распределение давления на верхней границе, имеет ту же форму (рисунок 4б), что и на нижней. Но для распределений типа (1) это возможно лишь при условии, когда в облаке возрастёт значение давления на величину

$$\Delta p_1 = u_{\phi t} \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g,$$

то есть, в середине облака давление в нём возрастёт до значения давления в воздухе. Тогда в верхней части облака давление в произвольной точке будет равно

$$p_o = u_{\phi t} \rho_1 g - y \rho_2 g,$$

где y – ордината произвольной точки

На этой же высоте в воздухе

$$p_a = u_{\phi t} \rho_1 g - y \rho_1 g.$$

Видно, что давление в этой части облака выше, чем в воздухе (при одинаковых высотах)

$$\Delta p_{верх} = p_o - p_a = (\rho_1 - \rho_2) y g$$

Положительное значение перепада давления в верхней части облака означает, что давление по отношению к границе действует наружу и способствует подъёму верхней части облака. Собственно, это выражение годится и для нижней части облака, так как отрицательное значение перепада означает, что давление направлено вовнутрь облака, на его вытеснение.

$$\Delta p_a = (\rho_1 - \rho_2) y g$$

Вдоль всей границы действует усилие, определяемое давлением

$$\Delta p_{\phi} = (\rho_1 - \rho_2) g u_{\phi t} \cdot \sin \alpha$$

Учитывая, что усилия действуют в одну сторону, вверх, в последнюю формулу можно ввести уточнения

$$\Delta p_{\phi} = (\rho_1 - \rho_2) g u_{\phi t} \cdot |\sin \alpha|$$

Заметим и другое, перепад давления остаётся неизменным вдоль оси абсцисс, следовательно, течения в облаке существует только вверх, вдоль оси ординат.

Этот же результат можно получить более строго: градиент поля давления в верхней части облака равен $\nabla p = -\rho_2 \vec{g}$, не имеет компоненты по оси абсцисс и направлен вниз, откуда, как известно, следует, что поток векторных линий направлен в противоположную сторону – в нашем случае, вверх. Так что, несмотря на то, что давление по границе облака направлено перпендикулярно границе, элементы облака движутся вертикально.

Отметим, наконец, что по центру облака действует наибольший перепад давления, и, если не принимать во внимание вопрос инерционности, части облака, расположенные ближе к центру, движутся с большей скоростью.

3 Расчёт положения границ облака

Для расчёта перемещения фронта пламени принято, что граница облака движется под действием архимедовых сил со скоростью, определяемой согласно формуле (6), то есть

$$u_{apx} = \sqrt{2(\Delta p_{\phi}/\rho_1)} \cdot \sin \alpha \cdot |\sin \alpha|.$$

Здесь значение скорости уточняется умножением на $|\sin \alpha|$ в виду того, что давление направлено перпендикулярно границе, а скорость – как показано ранее, вертикально, в силу чего нужно учитывать только вертикальную компоненту. Тогда перемещение элементов границы под воздействием давления взрыва и архимедовых сил, можно выразить, интегрируя в полярных координатах по времени суммарную скорость $u = u_{\phi} + u_{apx}$ с переменным верхним пределом от 0 до t .

$$r(\alpha) = \int_0^t (u_{\phi} + u_{apx}) dt = \int_0^t \left(u_{\phi} + \sqrt{\frac{2}{\rho_1} u_{\phi} t g (\rho_1 - \rho_2)} \cdot \sin \alpha \cdot |\sin \alpha| \right) dt.$$

В подынтегральной функции первое слагаемое является постоянной, а второе интегрируется просто, так как кроме переменной t , находящейся под знаком радикала, остальные множители суть константы, поэтому

$$r(t, \alpha) = u_{\phi} t + 0,93 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}} u_{\phi} g \cdot \sin \alpha \cdot |\sin \alpha| \cdot t^{1,5}. \quad (2)$$

На рисунке 5 приведён пример расчёта развития взрыва газовой смеси метан-воздух в атмосфере. Для сравнения показаны расчёты с учётом всплытия газового облака и без учёта этого эффекта. Видна большая разница в форме облака. Интересен тот момент, что при одинаковом значении времени от начала взрыва площади (объёмы), омеваемые радиус-векторами, равны между собой. Собственно говоря, это видно из формулы (2), если проинтегрировать правую часть от 0 до 2π по аргументу α . Первое слагаемое даст интеграл, равный $\pi(u_{\phi} t)^2$, то есть площадь круга радиусом $u_{\phi} t$, а интеграл от второго будет равен нулю ввиду периодичности и нечётности функции, представленной этим слагаемым, и особенности интервала интегрирования, равного периоду. Слева у круга, естественно, площадь также будет равна $\pi(u_{\phi} t)^2$. Из этого следует, что действие архимедовых сил только деформирует облако, не изменяя его площади (объёма). Объём меняется лишь в результате распространения пламени. Для времён более 0,1 секунды видно серьёзное отличие формы облака с деформированными под действием архимедовых сил границами от сферы.

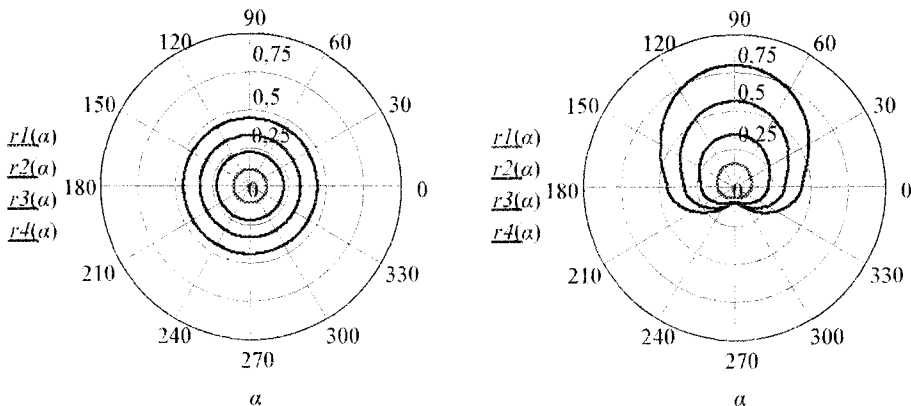


Рисунок 5 – Движение фронта пламени при взрыве на открытом воздухе
 $r1(\alpha)=0,05$ с., $r2(\alpha)=0,1$ с., $r3(\alpha)=0,15$ с., $r4(\alpha)=0,2$ с.
 слева без учёта всплытия, справа - с учётом этого эффекта

Ещё один результат можно отметить, ширина облака справа равна диаметру облака слева при соответствующих временах развития, что можно объяснить тем, под действием только гравитационных сил облако расширяться не может.

Наконец, напомним, проведённый анализ имеет, скорее, качественный характер и полученные выводы относятся только к облакам сферической или околосферической формы (с 10-20% деформацией границы), что характерно для интервала времени от начала взрыва до 0,1 секунды.

4 О критериальной оценке развития облака

Получается так, что равномерно распределённое давление p_c внутри облака складывается из двух компонент: с одной стороны, это $p_1=0,5 \rho_1 u_{\phi}^2$ – давление, сферически раздвигающее фронт горения, и, с другой, $p_2=u_{\phi} t(\rho_1 - \rho_2) g$, обеспечивающее выполнение уравнения неразрывности внутри облака.

Отношение максимального значения давления p_2 к p_1 можно трактовать как некий безразмерный критерий Ex (от слова *explosion* – взрыв)

$$Ex = \frac{(\rho_1 - \rho_2) g \varepsilon u_{\phi} t}{0,5 \rho_1 (\varepsilon u_{\phi})^2 t} = 2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \frac{g t}{u_{\phi}}$$

Можно обойтись и без коэффициента 2, так проще,

$$Ex = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \frac{g t}{u_{\phi}} \tag{3}$$

Понятно, что критерий имеет отношение не ко всякому типу взрывов, а только ко взрывам газо-воздушной смеси на открытом воздухе.

Отметим, что он однозначно отражает развитие взрыва, так как он меняется во времени, поэтому, используя его, можно проследить за этим процессом. Видно, что по мере возрастания времени и, естественно, увеличения размера облака, возрастает значения критерия Ex , и, следовательно, влияние архимедовых сил. При значении $Ex = 0,5$ давление взрыва становится равным архимедову, а потому нижняя граница ниже продвигаться не может, она остановится, а затем начнёт, если взрыв продолжается, двигаться вверх вместе со всем облаком. На рис. 6 приведена динамика критерия для метано-воздушной смеси, там же выделены два возможных пути развития взрыва: первый, достижение фронтом пламени границы смеси и прекращение горения, и второй, продолжение распространения пламени.

При прекращении горения имеет место скачкообразное изменение условий развития облака, дальнейшее развитие происходит только под действием архимедовых сил. Заметим, что скачкообразный вариант изменения условий возможен только при центральном взрыве, когда фронт горения подходит одновременно по всей окружности к границе смеси.

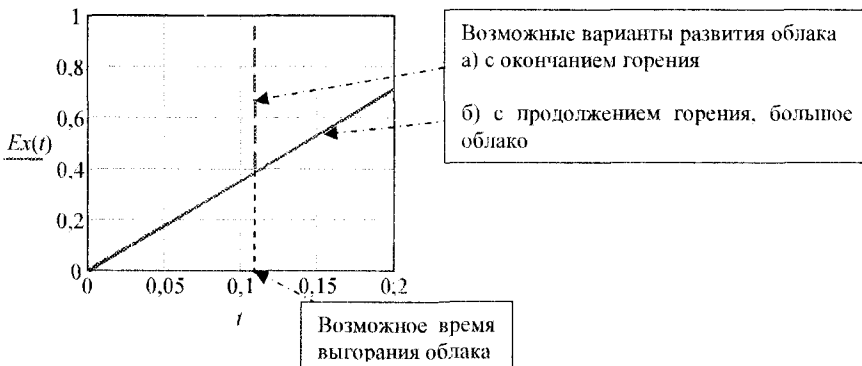


Рисунок 6 – Динамика изменения критерия Ex от времени после начала взрыва

Сравнивая результаты расчёта и приведённого эксперимента в Японии (рисунок 2), видна между ними существенная разница. В проведённых расчётах обнаружено более сильное влияние архимедовых сил, что можно объяснить тем, что при центральном взрыве в замкнутой сфере, при приближении фронта пламени к границе, температура исходной сме-

ски возрастает за счёт сжатия, увеличивается, причём существенно, и скорость горения. При этом значение знаменателя у критерия резко возрастает, сдвигая условие равенства $Ex = 0,5$ в сторону значительно больших размеров облака.

Интересно проанализировать результаты исследования влияния коэффициента избытка воздуха на всплываемость облака (рисунок 7) [5]. Эти результаты демонстрируют известную зависимость скорости нормального горения от коэффициента избытка воздуха, из которого следует, что отклонение от стехиометричности смеси снижает скорость горения. А уменьшение нормальной скорости горения в сочетании с недостатком воздуха влечёт за собой и снижение коэффициента расширения продуктов сгорания ε , что сильно снижает видимую скорость движения фронта пламени, обеспечивая более энергичную всплываемость. Обращение к критерию Ex нам объясняет, чем меньше скорость горения, тем сильнее влияние архимедовых сил, тем быстрее всплывает облако.

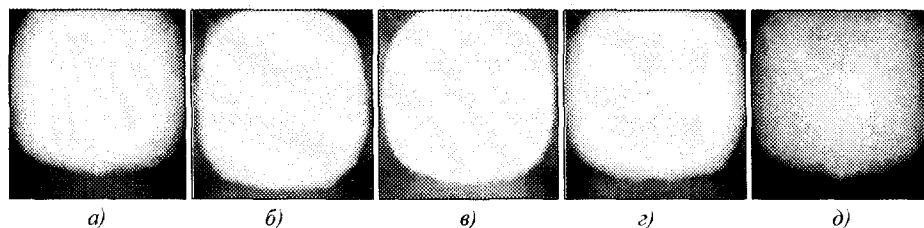


Рисунок 7 – Фотографии всплывания облака в зависимости от коэффициента избытка воздуха[5]
 а) 0,74; б) 0,86; в) 1; г) 1,2; д) 1,4

Возвращаясь к экспериментальным данным отметим, что с обеднением смеси (что соответствует на рисунке 7 увеличению коэффициента избытка воздуха) увеличивается масса воздуха, не участвующего в реакции, а служащего балластом, это приводит к снижению температуры по объему T_2 и увеличению плотности продуктов сгорания ρ_2 , согласно известной зависимости

$$\rho_2 = \rho_1(T_1/T_2).$$

Увеличение плотности продуктов сгорания согласно полученной формуле (3) приводит к увеличению критерия Ex и, следовательно, влиянию архимедовых сил, т.е. всплываемости облака.

Вывод: влияние архимедовых сил на газовый взрыв в атмосфере оказывается заметным уже через 0,1 с от начала взрыва (при радиусе 15 см) и становится доминирующим фактором при формировании границ облака через 1 с. На этой стадии, если говорить упрощенно, отмечены две закономерности: за объем облака отвечает процесс горения, а за форму границ – архимедовы силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Похил, П.Ф. Методы исследования процессов горения и детонации [Текст] / П.Ф. Похил, В.М. Мальцев, В.М. Зайцев // М.: Наука. – 1969. – 301 с.
2. Поладов, Ю.Х. Применение метода крупных частиц при описании взрыва газо-воздушной смеси в незамкнутых объемах [Текст] / Ю.Х. Поладов, М.А. Барг, С.А. Власенко // Вестник ОрелГАУ – 2009. – №1 – С. 33-39.
3. Поладов, Ю.Х. К вопросу о центральном взрыве газо-воздушной смеси в сферическом объёме [Текст] / Ю.Х. Поладов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2012. – № 5. – С. 13-20.
4. Мольков, В.В. Динамика сгорания газа в негерметичном сосуде [Текст]: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Мольков Владимир Валентинович. – М., 1983. – 211с.
5. Ryuzaki, H. An experimental and numerical investigation of premixed flame propagation in confined/semi-confined explosion chamber [Текст] / H. Ryuzaki, R. Tominaga // International Gas Union Research Conference - 2011. – 15 с.

Поландов Юрий Христофорович

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

д-р техн. наук, профессор кафедры «Высшая математика»

г. Орёл, Наугорское ш., 29

E-mail: polandov@yandex.ru

Iu. H. POLANDOV

PROBLEMS ON THE CENTRAL EXPLOSION GAS-AIR MIXTURES IN THE ATMOSPHERE

Analytically solved the problem of explosion of gas-air mixture in the atmosphere, it was found that the spread of flame in the absence of action of buoyancy forces are radially at the same speed, and the radius of the maximum volume of the resulting cloud of products of combustion is greater than about 2 times the radius of the initial gas mixture. The action of buoyancy effect within 0.1 seconds. The degree of influence on the shape of the boundaries of the pressure force of explosion and buoyancy forces are equalized after 0.15 and 1 second from the beginning of the explosion dominant influence on the shape of the boundaries have buoyancy forces. It was found that the volume of the cloud depends on the time of burning, and the shape of the boundaries of the buoyancy forces.

Keywords: gas explosions; the central explosion; the Archimedes force.

BIBLIOGRAPHY

1. Poxil, P.F. Metody issledovaniya processov goreniya i detonacii [Tekst] / P.F. Poxil, V.M. Mal'cev, V.M. Zajcev // M.: Nauka. – 1969. – 301 s.
2. Polandov, Yu.X. Primenenie metoda krupnyx chastic pri opisanii vzryva gazo-vozdushnoj smesi v nezamknutyx ob'emax [Tekst] / Yu.X. Polandov, M.A. Barg, S.A. Vlasenko // Vestnik OreIGAU – 2009. – №1 – S. 33-39.
3. Polandov, Yu.X. K voprosu o central'nom vzryve gazo-vozdushnoj smesi v sfericheskom ob'yome [Tekst] / Yu.X. Polandov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii – 2012. – № 5. – S. 13-20.
4. Mol'kov, V.V. Dinamika sgoraniya gaza v negermetichnom sosude [Tekst]: Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.17 / Mol'kov Vladimir Valentinovich. – M., 1983. – 211s.
5. Ryuzaki, H. An experimental and numerical investigation of premixed flame propagation in con-fined/semi-confined explosion chamber [Tekst] / H. Ryuzaki, R. Tominaga // International Gas Union Research Conference – 2011. – 15 s.

Polandov Iurii Hristoforovich

FSEI HPE «State university – education-science-production complex»

Dr. Tech. Sciences, professor of department of «Higher Mathematics»

Naugorskoe shosse, 29, 302020, Orel, Russian Federation

E-mail: polandov@yandex.ru

А.Ю. КОЛЬЦОВ, А.Ю. КОРНЕЕВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ ФУНКЦИИ ЗАЗОРА ПРИ ПЕРЕКОСЕ РОТОРА В КОНИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКАХ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

Рассмотрен вопрос конструктивного определения функции зазора в конических подшипниках жидкостного трения при произвольном перекосе вала.

Ключевые слова: функция зазора, конический подшипник.

Одной из базовых задач, возникающих в процессе моделирования динамики роторно-опорной системы, является определение функции зазора между подшипником и ротором. Данная функция входит в уравнение Рейнольдса, и ее построение является необходимым условием для расчета полей давлений, возникающих в смазочном слое. Классический подход заключается в том, что оси подшипника и ротора в любой момент времени считаются параллельными, однако такое допущение не является абсолютно корректным, поскольку физически означает отсутствие дополнительных ограничений на перемещение ротора. Необходимость уточнения математической модели требует рассмотрения перекоса ротора в объеме пространства, ограниченного опорной поверхностью подшипника. Целью работы является конструктивное построение функции зазора в коническом подшипнике, допускающее учет дополнительных геометрических изменений, вызванных, например, производственными дефектами.

Определим неподвижную, связанную с опорой декартову систему координат таким образом, что плоскость XOY совпадает с плоскостью, ограничивающей один из торцов подшипника, ось OZ совпадает с осью подшипника. Для конического подшипника будем считать ось OZ направленной в сторону увеличения радиуса подшипника.

Аналитически поверхность вала представляет собой множество точек в трехмерном евклидовом пространстве, удовлетворяющих некоторому соотношению. Перекосу вала вследствие действия на него некоторой силы соответствует воздействие на элементы данного множества некоторого линейного оператора – оператора поворота (линейность в данном случае следует из определения операции поворота, которая требует сохранения расстояния между любыми двумя точками). Поворот в общем случае может характеризоваться тремя классическими углами Эйлера – углом рыскания ψ (в горизонтальной плоскости), углом тангажа θ (в вертикальной плоскости) и углом вращения ϕ (собственное вращение) (рис. 1). Вращение тела относительно каждого угла записывается в виде матриц перехода A_1, A_2, A_3 , которые имеют следующий вид:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрица A , соответствующая искомому оператору вращения, определяется как: $A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$, тогда после преобразования матрица $A(\psi, \theta, \phi)$ имеет вид [2]:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \phi - \sin \psi \cos \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi - \sin \psi \cos \theta \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \phi + \cos \psi \cos \theta \sin \phi & -\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \theta \cos \phi & -\cos \psi \sin \theta \\ \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Форма соотношения, которому должны удовлетворять точки определяющего поверхность вала множества, зависит от выбранной системы координат. В случае конической формы вала удобно использовать каноническое уравнение:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0. \quad (3)$$

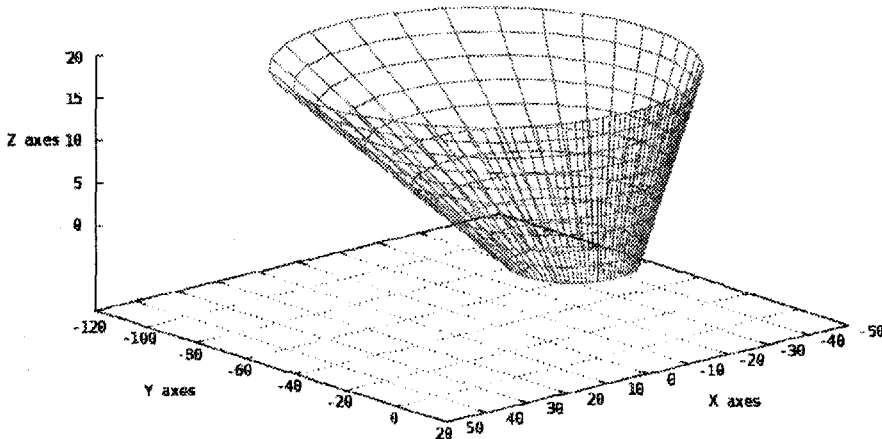


Рисунок 1 – Коническая поверхность, повернутая на углы Эйлера ($\psi = 0, \theta = \pi/6, \phi = 0$) относительно начала связанной с подшипником системы координат

Данное уравнение определяет конус с точкой схода в начале системы координат, ось которого совпадает с осью OZ . Система координат, в которой в соответствии с уравнением (3) определено множество точек, задающих поверхность вала, отличается от системы координат, связанной с подшипником, на вектор $[0, 0, z_0]$, где a, b, c – параметры конуса, $z_0 = R_{\min} / \operatorname{tg}(\alpha/2)$ – смещение системы координат вдоль оси OZ , R_{\min} – меньший радиус конического подшипника, α – угол конусности.

Оператор поворота A имеет единственную неподвижную точку – $[0, 0, 0]^T$, таким образом, применение A соответствует повороту конуса на соответствующие углы против часовой стрелки относительно начала координат, или, что то же самое, относительно вершины конуса. Постановка задачи, с другой стороны, требует, чтобы поворот был осуществлен относительно некоторой точки p . Для этого требуется осуществить дополнительно перенос системы координат на вектор $[p_x, p_y, p_z]^T = Ap - p$, то есть вектор, проведенный от точки p к ее образу Ap – точке, полученной применением оператора A к p .

Аналитически поворот множества точек, определяемых уравнением (3), против часовой стрелки на заданные углы Эйлера в заданной системе координат может быть представлен в эквивалентной форме как поворот самой системы координат на те же углы по часовой стрелке, что повлечет за собой соответствующее преобразование уравнения (3):

$$\frac{(a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z)^2}{a^2} + \frac{(a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z)^2}{b^2} - \frac{(a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z)^2}{c^2} = 0. \quad (4)$$

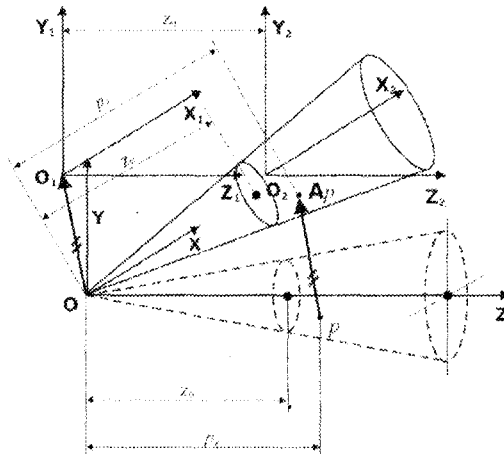


Рисунок 2 – Переход между системами координат после поворота конуса

Здесь a_{ij} – элементы матрицы «отрицательного» поворота $A(-\psi, -\theta, -\phi)$. Раскрыв скобки и приведя подобные, получим следующее уравнение для повернутого относительно вершины конуса:

$$\begin{aligned}
 & x^2 \left(\frac{a_{11}^2}{a^2} + \frac{a_{21}^2}{b^2} - \frac{a_{31}^2}{c^2} \right) + y^2 \left(\frac{a_{12}^2}{a^2} + \frac{a_{22}^2}{b^2} - \frac{a_{32}^2}{c^2} \right) + z^2 \left(\frac{a_{13}^2}{a^2} + \frac{a_{23}^2}{b^2} - \frac{a_{33}^2}{c^2} \right) + \\
 & + xy \left(\frac{2a_{11}a_{12}}{a^2} + \frac{2a_{21}a_{22}}{b^2} - \frac{2a_{31}a_{32}}{c^2} \right) + xz \left(\frac{2a_{11}a_{13}}{a^2} + \frac{2a_{21}a_{23}}{b^2} - \frac{2a_{31}a_{33}}{c^2} \right) + \\
 & + yz \left(\frac{2a_{12}a_{13}}{a^2} + \frac{2a_{22}a_{23}}{b^2} - \frac{2a_{32}a_{33}}{c^2} \right) = 0.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Добавив дополнительно перенос системы координат, сохраняющий неподвижной заданную точку p (переход в систему координат $X_1Y_1Z_1$ посредством линейного переноса на вектор p , рис. 2) и приводящий в систему координат, ассоциированную с подшипником (переход в систему координат $X_2Y_2Z_2$ путем переноса на вектор $[0, 0, z_0]^T$, рис. 2), получаем следующее окончательное уравнение для повернутого конуса в декартовой системе координат:

$$\begin{aligned}
 & (x + p_x)^2 \left(\frac{a_{11}^2}{a^2} + \frac{a_{21}^2}{b^2} - \frac{a_{31}^2}{c^2} \right) + (y + p_y)^2 \left(\frac{a_{12}^2}{a^2} + \frac{a_{22}^2}{b^2} - \frac{a_{32}^2}{c^2} \right) + (z + z_0 + p_z)^2 \left(\frac{a_{13}^2}{a^2} + \frac{a_{23}^2}{b^2} - \frac{a_{33}^2}{c^2} \right) + \\
 & + (x + p_x)(y + p_y) \left(\frac{2a_{11}a_{12}}{a^2} + \frac{2a_{21}a_{22}}{b^2} - \frac{2a_{31}a_{32}}{c^2} \right) + \\
 & + (x + p_x)(z + z_0 + p_z) \left(\frac{2a_{11}a_{13}}{a^2} + \frac{2a_{21}a_{23}}{b^2} - \frac{2a_{31}a_{33}}{c^2} \right) + \\
 & + (y + p_y)(z + z_0 + p_z) \left(\frac{2a_{12}a_{13}}{a^2} + \frac{2a_{22}a_{23}}{b^2} - \frac{2a_{32}a_{33}}{c^2} \right) = 0 \\
 & \text{или } Qx^2 + Ly^2 + Cxz + Dx + Ey + F = 0,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $Q = \frac{a_{11}^2}{a^2} + \frac{a_{21}^2}{b^2} - \frac{a_{31}^2}{c^2}$; $L = \frac{a_{12}^2}{a^2} + \frac{a_{22}^2}{b^2} - \frac{a_{32}^2}{c^2}$; $C = \frac{2a_{11}a_{12}}{a^2} + \frac{2a_{21}a_{22}}{b^2} - \frac{2a_{31}a_{32}}{c^2}$;

$$D = 2p_x \cdot Q + p_y \cdot C + (z + z_0 + p_z) \left(\frac{2a_{11}a_{13}}{a^2} + \frac{2a_{21}a_{23}}{b^2} - \frac{2a_{31}a_{33}}{c^2} \right);$$

$$E = 2p_y \cdot L + p_x \cdot C + (z + z_0 + p_z) \left(\frac{2a_{12}a_{13}}{a^2} + \frac{2a_{22}a_{23}}{b^2} - \frac{2a_{32}a_{33}}{c^2} \right);$$

$$\begin{aligned}
 F = & p_x^2 \cdot Q + p_y^2 \cdot L + (z + z_0 + p_z)^2 \left(\frac{a_{13}^2}{a^2} + \frac{a_{23}^2}{b^2} - \frac{a_{33}^2}{c^2} \right) + p_x p_y \cdot C + p_x (z + z_0 + p_z) \times \\
 & \times \left(\frac{2a_{11}a_{13}}{a^2} + \frac{2a_{21}a_{23}}{b^2} - \frac{2a_{31}a_{33}}{c^2} \right) + p_y (z + z_0 + p_z) \left(\frac{2a_{12}a_{13}}{a^2} + \frac{2a_{22}a_{23}}{b^2} - \frac{2a_{32}a_{33}}{c^2} \right).
 \end{aligned} \tag{7}$$

В цилиндрической системе координат уравнение (6) примет вид:

$$r^2 (Q \cos^2 \varphi + L \sin^2 \varphi + C \sin \varphi \cos \varphi) + r(D \cos \varphi + E \sin \varphi) + F = 0. \tag{8}$$

При $z = \text{const}$ уравнение (8) определяет заданную в полярной системе координат кривую, образованную пересечением повернутого конуса и соответствующей плоскости. Для каждого значения угла φ решением данного уравнения будет выражение:

$$r_{1,2} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha F}}{2\alpha}, \quad (9)$$

где α и β – коэффициенты перед второй и первой степенями переменной r соответственно.

Возможные сочетания корней уравнения соответствуют случаям, когда прямая, составляющая угол φ с осью OX сопряженной декартовой системы, пересекает кривую-сечение конуса в двух точках (подкоренное выражение положительно), в одной точке (подкоренное выражение равно нулю) и ни в одной точке (подкоренное выражение отрицательно, оба корня – мнимые). Применительно к рассматриваемой задаче достаточно ограничиться корнем

$$r_1 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha F}}{2\alpha},$$

в предположении, что корни являются действительными для любого угла φ . Первое допустимо, поскольку $r_2(\varphi) = r_1(\pi + \varphi)$, второе следует из малости зазора между подшипником и ротором, что не позволяет полюсу оказаться вне любого сечения конуса. Решение r_1 уравнения (8) удобно записать как функцию $r_1 = r(z, \varphi)$.

В общем случае радиус подшипника не является постоянным и задается функцией $R = R(z, \varphi)$. Таким образом, искомая функция зазора подшипника при указанных ранее допущениях может быть представлена в следующем виде:

$$h(z, \varphi) = R(z, \varphi) - r(z, \varphi). \quad (10)$$

Использованные в данной статье построения являются достаточно общими и позволяют помимо конических подшипников строить функции зазоров подшипников с другой геометрией, включая все описанные в работе [3] варианты макронеровностей вала. Также метод учитывает возможность модификации геометрической модели для учета микронеровностей и иных геометрических отклонений формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев, А.Ю. Конические подшипники жидкостного трения: монография / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, О.В. Соломин; под общ. ред. Л.А. Савина. – М: Машиностроение-1, 2008. – 172 с.
2. Беклемишев, Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры / Д.В. Беклемишев. – 5-е изд., перераб. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 320 с.
3. Данчин, И.А. Влияние отклонений формы опорных поверхностей гидростатодинамических подшипников на динамические характеристики роторных систем: дисс... канд. техн. наук: 01.02.06 / Данчин Игорь Анатольевич. – Орел, 2007. – 160 с.

Кольцов Александр Юрьевич

Государственный университет – УНПК, г. Орел
 Аспирант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»
 Тел. (4862) 41-98-85
 E-mail: alexkolzov@gmail.com

Корнеев Андрей Юрьевич

Государственный университет – УНПК, г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»
 Тел. (4862) 41-98-49
 E-mail: korneev_andrey@mail.ru

A.YU. KOLTISOV, A.YU. KORNEYEV

THE GENERALIZED CLEARANCE FUNCTION DETERMINATION IN THE LIQUID FRICTION CONICAL BEARINGS

The subject of 3-D clearance function determination in the liquid friction conical bearings is considered.

Keywords: *clearance function, conical bearing.*

BIBLIOGRAPHY

1. Korneev, A.Ju. Konicheskie podshipniki zhidkostnogo trenija: monografija / A.Ju. Korneev, L.A. Savin, O.V. Solomin; pod obshh. red. L.A. Savina. – M: Mashinostroenie-1, 2008. – 172 s.
2. Beklemishev, D.V. Kurs analiticheskoj geometrii i lineinoj algebry / D.V. Beklemishev. – 5-e izd., pererab. – M.: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1984. – 320 s.
3. Danchin, I.A. Vlijanie odklonenij formy opornyh poverhnostej gidrostatodinamicheskikh podshipnikov na dinamicheskie harakteristiki rotornyh sistem: diss... kand. tehn. nauk: 01.02.06 / Danchin Igor' Anatol'evich. – Orel, 2007. – 160 s.

Koltsov Alexander Yurievich

State University - unpk, Orel

Student of the Department of mechatronics and international engineering»

Phone (4862) 41-98-85

E-mail: alexkoltzov@gmail.com

Korneev Andrey Yurievich

State University - unpk, Orel

Candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department «Dynamics and strength of machines»

Phone (4862) 41-98-49

E-mail: korneev_andrey@mail.ru

А.В. БОЧКОВ, Ю.М. КОЗЫРЕВ, А.В. ПОНОМАРЕВ,
Н.Н. ХОЛИН, Е.И. ХОМЯКОВ, С.В. ЯБЛОЧКО, И.М. ЛАВИТ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ НЕПОДВИЖНОСТИ ОДНОЙ ИЗ ГРАНИЦ В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ

При нанесении порошковых покрытий на одну из поверхностей трубы возникает проблема сохранения неизменным одного из размеров. Исследуется плоская осесимметричная задача прессования цилиндрического слоя. Получены аналитические условия неподвижности одной из границ.

Ключевые слова: пластически сжимаемый материал, условие текучести Грина, плоская задача.

Традиционным процессом производства изделий из порошковых материалов является процесс горячего изостатического прессования (ГИП) – процесс высокотемпературного уплотнения порошковых материалов, помещенных в капсулу, под действием высокого внешнего давления.

Для повышения эксплуатационных характеристик трубы иногда на ее поверхность наносится методом ГИП слой из порошкового материала. При этом важно, что бы после окончания процесса один из размеров трубы остался неизменным. Рассмотрим данную задачу в предположении о плоском характере деформированного состояния. Заметим, что труба, на которую наносится покрытие, может рассматриваться как капсула.

Пусть R_1 – внутренний радиус внутренней капсулы, R_2 – внешний радиус внутренней капсулы, R_3 – внутренний радиус внешней капсулы, R_4 – внешний радиус внутренней капсулы ρ – относительная плотность порошка.

Относительно свойств материала капсул, примем условия несжимаемости и идеальной пластичности с пределами текучести Y_1 для внутренней и Y_3 для внешней капсул.

Общая постановка задачи включает следующие моменты.

Уравнение равновесия:

$$\operatorname{div} \bar{\sigma} = 0 \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ – тензор напряжений.

Для описания механических свойств порошкового материала используется условие текучести Грина [1-2]:

$$\frac{\sigma^2}{f_2^2} + \frac{S^2}{f_1^2} = T^2 \quad (2)$$

где σ – среднее напряжение;

S^2 – интенсивность девиатора тензора напряжений;

f_2 и f_1 – экспериментальные функции относительной плотности ρ ;

T – предел текучести монолита.

Для описания поведения материала капсулы используется условие идеальной пластичности:

$$S^2 = Y^2 \quad (3)$$

где Y – предел текучести.

Также используется условие несжимаемости:

$$\operatorname{div} \bar{u} = 0 \quad (4)$$

где \bar{u} – вектор скорости перемещений.

Связь тензора напряжений σ_{ij} и тензора скоростей деформаций ε_{ij} определяется ассоциированным законом течения:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \psi \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

где $\Phi(\sigma_{ij}, \rho) = 0$ – уравнение поверхности текучести.

Для определения плотности используется уравнение неразрывности.

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \quad (6)$$

На внешней границе капсулы приложено равномерное внешнее давление P .

Соотношения (1-6) определяют математическую постановку задачи.

Уравнение равновесия в плоской осесимметричной задаче имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0 \quad (7)$$

Для плоской осесимметричной задачи уравнение поверхности текучести Грина представляется в виде:

$$\frac{(\sigma_r + \sigma_\varphi)^2}{4A^2} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\varphi)^2}{4B^2} = T^2 \quad (8)$$

где $A^2 = \frac{9f_2^2 + f_1^2}{9}$, $B^2 = \frac{f_1^2}{3}$.

Используя закон течения, для компонент тензора скоростей деформации ε_r , ε_φ имеем:

$$\varepsilon_r = \beta \left[\frac{\sigma_r + \sigma_\varphi}{2A^2} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{2B^2} \right], \quad \varepsilon_\varphi = \beta \left[\frac{\sigma_r + \sigma_\varphi}{2A^2} - \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{2B^2} \right] \quad (9)$$

где ε_r , ε_φ – соответствующие составляющие тензора скоростей деформаций.

Как было показано в [3, 4] при наличии неподвижной границы в порошковом слое возникает неоднородное распределение плотности, которое необходимо учитывать при оценках. Согласно (9):

$$\sigma_r = \frac{A^2(\varepsilon_r + \varepsilon_\varphi) + B^2(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi)}{2\beta}, \quad \sigma_\varphi = \frac{A^2(\varepsilon_r + \varepsilon_\varphi) - B^2(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi)}{2\beta} \quad (10)$$

Используя (8, 10), получаем:

$$\sigma_r = \frac{T}{\sqrt{A^2(\varepsilon_r + \varepsilon_\varphi)^2 + B^2(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi)^2}} \left[A^2(\varepsilon_r + \varepsilon_\varphi) + B^2(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi) \right] \quad (11)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{T}{\sqrt{A^2(\varepsilon_r + \varepsilon_\varphi)^2 + B^2(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi)^2}} \left[A^2(\varepsilon_r + \varepsilon_\varphi) - B^2(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi) \right]$$

Согласно закону сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial r} v + \rho \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\rho v}{r} = 0 \quad (12)$$

Заметим, что:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial v}{\partial r}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{v}{r} \quad (13)$$

Представим:

$$B^2 = \mu^2 B^2, \quad \text{где } \mu = 1 \quad (14)$$

Разложим решение по параметру μ [4]:

Будем искать решение в виде:

$$\sigma_r = \sigma_{r_0} + \mu^2 \sigma_{r_1}, \quad \sigma_\varphi = \sigma_{\varphi_0} + \mu^2 \sigma_{\varphi_1}, \quad \varepsilon_r = \varepsilon_{r_0} + \mu^2 \varepsilon_{r_1}, \quad \varepsilon_\varphi = \varepsilon_{\varphi_0} + \mu^2 \varepsilon_{\varphi_1}$$

$$v = v_0 + \mu^2 v_1, \quad \rho = \rho_0 + \mu^2 \rho_1$$

Заметим, что, согласно (11):

$$\sigma_{r_0} = -\sigma_s A, \quad \sigma_{\varphi_0} = -\sigma_s A \tag{15}$$

Согласно уравнению равновесия (7):

$$\frac{\partial \sigma_{r_0}}{\partial r} = 0$$

Следовательно, $\frac{\partial A}{\partial r} = 0$, а так как A является функцией плотности ρ , то имеем

$$\frac{dA}{d\rho} \frac{\partial \rho_0}{\partial r} = 0. \text{ Тогда получаем:}$$

$$\frac{\partial \rho_0}{\partial r} = 0 \tag{16}$$

Следовательно, $\rho_0(t)$ является функцией только времени и постоянна по радиусу.

Используя (12), получаем $\frac{\partial v_0}{\partial r} + \frac{v_0}{r} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial t}$.

В начале, рассмотрим задачу об определении условий неподвижности внутренней границы порошкового слоя.

Решая это уравнение с граничным условием $V = 0$ при $r = R_2$, получаем:

$$v_0 = \frac{1}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial t} \left(-r + \frac{R_2^2}{r} \right) \tag{17}$$

Тогда:

$$\varepsilon_{r_0} = -\frac{1}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial t} \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right), \quad \varepsilon_{\varphi_0} = -\frac{1}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial t} \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right) \tag{18}$$

Согласно (11):

$$\sigma_{r_1} = -\frac{\sigma_s}{2A} \left[\frac{d(A^2)}{a\rho} \rho_1 \right] - \sigma_s \frac{B^2 (\varepsilon_{r_0} - \varepsilon_{\varphi_0})}{A (\varepsilon_{r_0} + \varepsilon_{\varphi_0})} + \sigma_s \frac{B^2 (\varepsilon_{r_0} - \varepsilon_{\varphi_0})^2}{2A (\varepsilon_{r_0} + \varepsilon_{\varphi_0})^2}$$

Подставляя (18), получаем:

$$\sigma_{r_1} = \sigma_s \left[-\frac{1}{2A} \frac{d(A^2)}{a\rho} \rho_1 - \frac{B^2 R_2^2}{A r^2} + \frac{B^2 R_2^4}{2A r^4} \right] \tag{19}$$

Аналогично:

$$\sigma_{\varphi_1} = -\frac{\sigma_s}{2A} \left[\frac{d(A^2)}{a\rho} \rho_1 \right] + \sigma_s \frac{B^2 (\varepsilon_{r_0} - \varepsilon_{\varphi_0})}{A (\varepsilon_{r_0} + \varepsilon_{\varphi_0})} + \sigma_s \frac{B^2 (\varepsilon_{r_0} - \varepsilon_{\varphi_0})^2}{2A (\varepsilon_{r_0} + \varepsilon_{\varphi_0})^2}$$

С учетом (11), получаем:

$$\sigma_{\varphi_1} = \sigma_s \left[-\frac{1}{2A} \frac{d(A^2)}{a\rho} \rho_1 + \frac{B^2 R_2^2}{A r^2} + \frac{B^2 R_2^4}{2A r^4} \right] \tag{20}$$

Из уравнения равновесия, так как ρ_0 не зависит от радиуса:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial r} = -\frac{4B^2 R_2^4}{\frac{d(A^2)}{d\rho} r^5}$$

Полагая $\rho_1 = 0$ при $r = R_3$, получаем:

$$\rho_1 = \frac{B^2}{d(A^2)} \left(\frac{R_2^4}{r^4} - \frac{R_2^4}{R_3^4} \right) \quad (21)$$

Тогда:

$$\sigma_r(R_2) = \sigma_s \left[-A - \frac{B^2}{A} + \frac{B^2 R_2^4}{2A R_3^4} \right], \quad \sigma_r(R_3) = \sigma_s \left[-A - \frac{B^2 R_2^2}{A R_3^2} + \frac{B^2 R_2^4}{2A R_3^4} \right] \quad (22)$$

Из решения плоской задачи о деформации идеально пластической трубы в плоской постановке известно, что условие перехода в пластическое состояние имеет вид:

$$\Delta P = \frac{2Y}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

где ΔP – перепад давлений, Y – предел текучести, R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы.

Поскольку

$$-P = \sigma_r(R_3) - \frac{2}{\sqrt{3}} Y_3 \ln \frac{R_4}{R_3}$$

а условие неподвижности внутренней стенки

$$|\sigma_r(R_2) + P| < \frac{2Y_1}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

то условие неподвижности внутренней границы имеет вид:

$$\left| \sigma_r(R_2) - \sigma_r(R_3) + \frac{2}{\sqrt{3}} Y_3 \ln \frac{R_4}{R_3} \right| < \frac{2Y_1}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

Согласно (22) получаем окончательно:

$$\left| -T \frac{B^2}{A} \left(1 - \frac{R_2^2}{R_3^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} Y_3 \ln \frac{R_4}{R_3} \right| < \frac{2Y_1}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (23)$$

Далее определим условия, при которых неподвижной будет внешняя граница. Из условия неподвижности внешней границы, имеем следующее поле скоростей:

$$v_0 = \frac{1}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial t} \left(-r + \frac{R_2^2}{r} \right)$$

Тогда:

$$\varepsilon_{r0} = -\frac{1}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial t} \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right), \quad \varepsilon_{\theta 0} = -\frac{1}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial t} \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right)$$

Получаем:

$$\sigma_{r1} = \sigma_s \left[-\frac{1}{2A} \frac{d(A^2)}{a\rho} \rho_1 - \frac{B^2 R_2^2}{A r^2} + \frac{B^2 R_2^4}{2A r^4} \right], \quad \sigma_{\theta 1} = \sigma_s \left[-\frac{1}{2A} \frac{d(A^2)}{a\rho} \rho_1 + \frac{B^2 R_2^2}{A r^2} + \frac{B^2 R_2^4}{2A r^4} \right]$$

Из уравнения равновесия, так как ρ_0 не зависит от радиуса, следует:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial r} = -\frac{4B^2 R_2^4}{d(A^2) r^5} \frac{1}{a\rho}$$

Полагая $\rho_1 = 0$ при $r = R_3$, получаем:

$$\rho_1 = \frac{B^2}{d(A^2)} \left(\frac{R_3^4}{r^4} - 1 \right) \frac{1}{a\rho}$$

Тогда:

$$\sigma_r(R_2) = \sigma_s \left[-A + \frac{B^2}{2A} - \frac{B^2 R_3^2}{A R_2^2} \right], \quad \sigma_r(R_3) = \sigma_s \left[-A - \frac{B^2}{2A} \right]$$

Так как

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} Y_1 \ln \frac{R_2}{R_1} + T \left[A + \frac{B^2}{A} \left(\frac{R_3^2}{R_2^2} - \frac{1}{2} \right) \right]$$

то условие неподвижности наружной стенки примет вид:

$$\frac{2}{\sqrt{3}} Y_1 \ln \frac{R_2}{R_1} + T \frac{B^2}{A} \left(\frac{R_3^2}{R_2^2} - 1 \right) < \frac{2}{\sqrt{3}} \ln Y_3 \frac{R_4}{R_3}$$

Отметим, что полученные результаты носят лишь оценочный характер. В реальном процессе необходимо учитывать осевую деформацию трубы. ООО «Лаборатория новых технологий» имеет опыт нанесения порошкового покрытия на трубу, при отношении радиусов $\frac{R_2}{R_1} = 2,14$, $\frac{R_4}{R_3} = 1,05$, $\frac{R_3}{R_2} = 1,93$. Механические свойства материалов внутренней и внешней капсул совпадали.

В процессе ГИП температурное поле менялось, но было постоянно по объему. Известно соотношение между относительной плотностью и температурой. Значения функций и отношения пределов текучести материала капсулы и монолита порошкового материала τ приведены ниже:

ρ	f_2	f_1	τ
0,7	0,187	0,162	0,073
0,79	0,312	0,501	0,05
0,89	0,758	0,833	0,097
0,95	1,553	0,892	0,14
0,98	2,602	0,98	0,172

Проведенные оценки по указанным формулам, показывают, что внутренний радиус трубы должен уменьшаться по окончании процесса. Однако в реальности этого не произошло. При этом труба имела осевую деформацию (сжимающую). А подобная осевая деформация приводит к росту внутреннего радиуса. Поэтому учет влияния осевой деформации на конечные размеры должно быть предметом отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Друянов, Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел / Б.А. Друянов. – М.:Машиностроение, 1989.
2. Грин Р.Дж. Теория пластичности пористых тел //Сб. переводов, «Механика», 1973, №4.
3. Анохина, А.В. Исследование осесимметричного процесса деформации пластически сжимаемых сред при наличии неподвижной границы / А.В. Анохина, В.А. Головешкин, А.Р. Пирумов, А.В. Пономарев // Вестник машиностроения. 2006. – № 10. – С. 17-22.
4. Головешкин, В.А. Распределение плотности при плоском осесимметричном процессе горячего изостатического прессования с неподвижной внутренней границей / В.А. Головешкин, И.А. Калугин, Ю.М. Козырев, А.В. Пономарев //Механика композиционных материалов и конструкций. 2013. – т. 19. – №2.

Бочков Андрей Валерьевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
Аспирант
Тел. (499) 269-58-10
E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Козырев Юрий Михайлович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
Аспирант
Тел. (499) 269-58-10
E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Пономарев Антон Васильевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
Кандидат физико-математических наук, доцент
Тел. 8-926-162-64-22
E-mail: avpon@yandex.ru

Холин Николай Николаевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
Доктор технических наук, профессор
E-mail: nikshevolog@yandex.ru

Хомяков Евгений Игоревич

ООО «ЛНТ», г. Москва
Кандидат технических наук
Тел. (495) 448-37-42
E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Яблочко Сергей Викторович

ООО "НТЭ", г. Москва
Технический директор
Тел. (499) 269-58-10
E-mail: nikshevolog@yandex.ru

Лавит Игорь Михайлович

Тульский государственный университет
Доктор технических наук, профессор
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92
Тел. (4872) 33-24-10
E-mail: info@tsu.tula.ru

A.V. BOCKOV, Yu.M. KOZYREV, A.V. PONOMAREV, N.N. CHOLIN, E.I. CHOMYAKOV
S.V. YABLOCHKO, I.M. LAVIT

**ANALYTICAL STUDY OF ONE BORDER IMMOVABILITY
CONDITIONS IN THE PROCESS OF CYLINDRICAL LAYER HOT
ISOSTATIC PRESSING**

A problem of one of dimensions sustention emerges at application of powdered coatings on one of the tube's surfaces. A flat axisymmetric problem of pressing cylindrical layer is studied. Analytical conditions for immovability of one of the borders are obtained.

Keywords: *irreversibly compressible material, yield criterion of Green, flat problem.*

BIBLIOGRAPHY

1. Drujanov, B.A. Prikladnaja teorija plastichnosti poristyh tel / B.A. Drujanov. – M.: Mashinostroenie, 1989.
2. Grin R.Dzh. Teorija plastichnosti poristyh tel. //Sb. perevodov, «Mehhanika», 1973, №4.
3. Anohina, A.V. Issledovanie osesimmetrichnogo processa deformacii plasticheski szhimaemyh sred pri naličii nepodvizhnoj granicy / A.V. Anohina, V.A. Goloveshkin, A.R. Pirumov, A.V. Ponomarev // Vestnik mashinostroenija. 2006. – № 10. – S. 17-22.
4. Goloveshkin, V.A. Raspredelenie plotnosti pri ploskom osesimmetrichnom processe gorjachego izostatsicheskogo pressovanija s nepodvizhnoj vnutrennej granicej / V.A. Goloveshkin, I.A. Kalugin, Ju.M. Kozyrev, A.V. Ponomarev //Mehhanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij, 2013. – t.19. – №2.

Bochkov Andrey Valer'evich

Moscow state University of instrument-making and Informatics, Moscow
Postgraduate student
Phone (499) 269-58-10
E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Kozyrev Yuri Mikhailovich

Moscow state University of instrument-making and Informatics, Moscow
Postgraduate student
Phone (499) 269-58-10
E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Ponomarev Anton Vasilyevich

Moscow state University of instrument-making and Informatics, Moscow
Candidate of physical and mathematical Sciences, associate Professor
Phone 8-926-162-64-22
E-mail: avpon@yandex.ru

Cholin Nikolay Nikolaevich

Moscow state University of instrument-making and Informatics, Moscow
Doctor of technical Sciences, Professor
E-mail: nikshevolog@yandex.ru

Chomyakov Evgeniy Igorevich

LLC «LNT», Moscow
Candidate of technical Sciences
Phone (495) 448-37-42
E-mail: it1-mgapi@yandex.ru

Yablochko Sergey Viktorovich

LLC "HTЭ", Moscow
Technical Director
Phone (499) 269-58-10
E-mail: nikshevolog@yandex.ru

Lavit Igor Mikhailovich

Tula state University
Doctor of technical science, professor
300012, Tula, Lenin Ave, 92
Phone (4872) 33-24-10
E-mail: info@tsu.tula.ru

М.Ю. РЫЦОВ, К.А. МЕГАЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБМЕНА ДАННЫМИ В СРЕДЕ КОРПОРАТИВНОГО ПОРТАЛА С АГРЕГИРОВАННЫМ ТРАФИКОМ

В статье предложена параметризованная имитационная модель обмена данными в среде корпоративного портала, базирующаяся на событийном методе, воспроизводящая логику ее функционирования и системные параметры и отличающаяся возможностью анализа агрегированного трафика, включающего голосовой трафик и TCP-нагрузку (web- и ftp-трафик). Осуществлена калибровка модели на основе выбранных выходных метрик: задержка пакетов, джиттер и процент потери пакетов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, задержка, джиттер, голосовой трафик, агрегация.

В последнее время наблюдается явная устойчивая тенденция в широком привлечении методов компьютерного имитационного моделирования в процесс проектирования телекоммуникационных сетей. Инструмент моделей передается из области академических научных исследований в сферу практической деятельности сетевых интеграторов и интернет-провайдеров.

Цель имитационного эксперимента состоит в построении модели агрегированного трафика в среде корпоративного портала с существенной долей голосового трафика в типовой конфигурационной топологии с условием ее относительно простой реализации и дальнейшего использования при проектировании.

В настоящее время широкое применение среди open source симуляторов нашел network simulator-2 (ns-2). Объектно-ориентированная архитектура ядра симулятора не зависит от используемой платформы и строится на языке C++, поэтому симулятор может собираться в среде практически любой операционной системы. Базовый язык программирования для создания новых модулей и написания сценариев имитационного моделирования - OTCL/TCL.

В модели в качестве основных топологических объектов рассматриваются узлы и межузловые соединительные линии. К узлам присоединяются агенты сетевых транспортных протоколов (TCP, UDP, RTP и др.), которые организуют между собой протокольные соединения. Поддержка в симуляторе транспортного протокола реального времени позволяет моделировать с помощью ns-2 структуру пакетов для передачи голосового трафика IP-телефонии. В свою очередь, к транспортным агентам присоединяются агенты приложений и генераторов трафика с возможностью формирования многопоточного трафика.

Симулятор имитирует большинство известных алгоритмов управления очередями в маршрутизаторах: WFQ, CBQ, RED, FIFO с механизмом drop-tail (DP) и др. Для проведения сеанса моделирования, от пользователя пакета требуется разработка сценария - имитационной модели и программы, написанной на языке TCL.

Сценарий состоит из описания топологии сети, используемых протоколов, объема работ (некоторого количества событий, которые должны произойти в процессе моделирования) и параметров контроля. В качестве результирующих данных, ns-2 выдает количество пакетов, посланных каждым источником, а также количество доставленных, потерянных и ретранслированных пакетов. Эти данные обычно записываются в трассировочный файл. В состав пакета ns-2 входит программа анимации - network animator (nam), работающая на дампе этого выходного трассировочного файла. Программа nam позволяет в динамике наблюдать на мониторе весь процесс эксперимента имитационного моделирования.

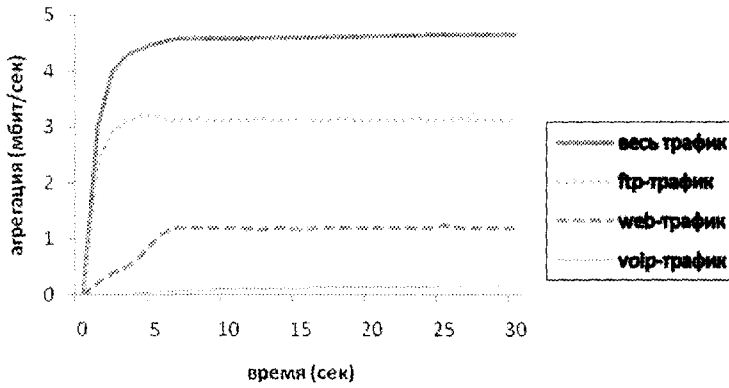


Рисунок 1 – Агрегация трафика для полосы пропускания 5 мбит/сек

Предложена параметризованная имитационная модель для исследования трафика в среде корпоративного портала. Входные параметры модели определены по следующим группам: параметры сетевой нагрузки - модель W (для трафика различных типов); параметры задания топологии сети - модель T (два класса топологий - A и B); конфигурирование узлов нагрузки - модель C (группа C); конфигурирование маршрутизатора - модель C (группа R); задание сессии моделирования - модель C (группа S); выбор метрик и выходных данных моделирования - модель C (группа E).

Сценарий моделирования состоит из описания топологии сети, используемых протоколов, объема работ (некоторого количества событий, которые должны произойти в процессе моделирования) и параметров контроля. В качестве результирующих данных имитационная модель формирует данные о количестве пакетов, посланных каждым источником, количестве доставленных, потерянных и ретранслированных пакетов, которые записываются в трассировочный файл.

Математическая модель для нагрузки голосового трафика (VoIP). Голосовой трафик относится к классу неадаптивного UDP-трафика и его поведение описывается ON/OFF Марковским случайным процессом. Для формализации ON/OFF Марковского процесса $x(t)$ с экспоненциально распределенными ON/OFF периодами может быть использовано Пуассоновское стохастическое дифференциальное уравнение:

$$dx(t) = (1 - x(t))dN_1(t) - x(t)dN_2(t), \quad x(0) \in \{0,1\}$$

где $N_1(t)$ и $N_2(t)$ - так называемые Пуассоновские счетчики с интенсивностью соответственно λ и μ . По определению Пуассоновский счетчик процесса N для потока пакетов равен:

$$dN = \begin{cases} 1, & \text{при поступлении пакета} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$E[dN] = \lambda dt,$$

где λ - интенсивность потока пакетов Пуассоновского процесса.

Рассмотренная математическая модель описывает только поведение генератора голосового трафика и может служить для исследования формирования пакетов различных кодеков (например, при изменении параметров интенсивности ON/OFF-периодов).

Для более полного исследования голосового трафика IP-телефонии, агрегированного в трафик среды корпоративного портала (КП), построим имитационную модель.

В качестве первого компонента сетевой нагрузки рассмотрим модель голосовой нагрузки. Представим, что узел нагрузки V , который поддерживает число num_voip активных голосовых сеансов IP-телефонии. Такой узел будет имитировать типовой шлюз IP-телефонии (например, производства Cisco) с num_voip голосовыми каналами. Источники голосового трафика в терминах симулятора ns-2 можно также задать типовые узлы $Vx...Vnum_voip$, имеющие гиперссылки на определенные ресурсы. Параметры голосовых сеансов задаются типом используемого кодека и определяются из структурной модели генератора голосового трафика.

Второй тип нагрузки в имитационной модели задается, как ТСП-нагрузка. Для описания прохождения ТСП-трафика использована динамическая потоковая модель протокола ТСП. В несколько упрощенном виде (без учета механизма тайм-аутов) модель описывается парой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$W'(t) = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t-R(t))} p(t-R(t))$$

$$q'(t) = \frac{W(t)}{R(t)} N(t) - C$$

где $x'(t)$ обозначает производную по времени от x . Другие переменные уравнений соответствуют следующим параметрам протокола:

W – размер ТСП-окна в пакетах;

q – длина очереди в пакетах;

R – RTT (round-trip time) = $\frac{q}{C} + T_p$ в сек;

C – пропускная способность канала в пак/сек;

T_p – задержка распространения в сек;

N – показатель загрузки (количество ТСП-сеансов);

P – вероятность сброса пакета из очереди.

Длина очереди q и размер окна W имеют положительные значения в интервалах:

$q \in [0, \bar{q}]$, где \bar{q} – предельный размер очереди,

$W \in [0, \bar{W}]$, где \bar{W} – предельный размер окна.

Вероятность сброса пакетов находится в интервале $[0, 1]$. Данная модель хорошо описывает динамику изменения длины очереди и схему управления ТСП-окном. Однако, при возникновении сложных процессов, которые обязательно проявляются при сильном перемещении трафика разных типов, лучше использовать имитационную модель.

В имитационной модели определен узел W , который обеспечивает интерактивную ТСП-нагрузку на маршрутизатор в составе его агрегированного трафика. Нагрузку, которая направлена от web-сервера к web-клиентам, формируют *num_web* клиентов. Трафик для W принимается соответственно в узлах $Wx \dots Wnum\ web$.

Калибровка модели осуществлялась на основе выбранных выходных метрик: задержка пакетов, джиттер и процент потери пакетов. В исследовании рассмотрены: агрегация каналов и поведение средней длины очереди в маршрутизаторе при использовании алгоритмов отбрасывания конца очереди типа RED. В топологической модели B в промежуточных узлах маршрутизаторов формируется ТСП-нагрузка, т.е. web- и ftp-трафик.

При фиксации параметры, связанные с топологией сети и конфигурацией каналов, разработанная имитационная модель, обеспечивает отображение некоторого пространства сетевой нагрузки в пространство выходных метрик качества обслуживания. Произведена формализация модели в виде трехмерного дискретного целочисленного пространства нагрузки $L = \{v_b, w_b, f_m\}$, каждый вектор которого принимает неотрицательные целые значения для каждой составляющей. Первая составляющая вектора нагрузки означает число источников голосового трафика для имитационной модели, вторая – число web-клиентов, третья – число ftp-источников. Если значение равно нулю, то – это будет означать отсутствие данного типа нагрузки. При проведении сеанса имитационного моделирования для каждого из типов трафика на выходе получаются три числа, которые будут характеризовать соответственно усредненную задержку из конца в конец, джиттер и процент потерь пакетов для этого трафика в сценарии данного проведенного сеанса.

Усредненная задержка вычисляется, как среднее значение от суммы всех задержек между узлом-источником и узлом-приемником на количество переданных пакетов. Например, для voip-трафика усредненная задержка:

$$d = \sum_{k=1}^{pkt_voip} D_k / pkt_voip$$

где pkt_voip - количество отправленных voip-пакетов в течении данного сеанса. Значение сглаженного джиттера равно [7]:

$$j = J(pkt_voip - 1) + \frac{(D(pkt_voip - 1, pkt_voip) - J(pkt_voip - 1))}{16}$$

а процент количества недоставленных пакетов вычисляется по формуле:

$$l = \frac{pkt_voip - m_voip}{pkt_voip} * 100$$

где m_voip – количество принятых пакетов.

Таким образом, для каждой "тройки" пространства нагрузки $L = \{v, w, f\}$ имитационная модель ставит в соответствии "тройку" из пространства метрик качества обслуживания $QoS = \{d, l, j\}$ (для каждого типа трафика). Существенное значение для IP-телефонии имеет попадание в ту область пространства качества обслуживания QoS , которая гарантирует качественное прохождение ее трафика. При этом для оценки качества обслуживания voip использовалась не шкала классической модели MOS, а зоны качества, которые характеризуются процентами потерянных пакетов и односторонней задержкой в мсек.

Так как неприемлемое для качества голосового трафика значение джиттера появляется уже при неприемлемых для качества значениях задержки и процента потерь голосовых пакетов, то интерес представляет попадание функции отображения на проекцию плоскости {задержка, потери} в пространстве QoS .

Установлено, что попадание результатов проведенного имитационного моделирования в зону 1 ($d < 100$ мс, $l < 5\%$) означает, что нагрузка на сеть при заданной топологии сети и конфигурационных параметрах каналов и механизмов управления трафиком не влияет на качество голосовых сеансов. Зона 2 при ($d < 150$ мс, $l < 10\%$) также является хорошим результатом. Показатели сеанса имитационного моделирования, попавшие в зону 3 ($d < 400$ мс, $l < 20\%$), говорят о серьезной нагрузке на сеть. Нагрузка, приводящая к вектору качества обслуживания в зоне 4 ($d < 100$ мс, $l < 20\%$), неприемлема для гарантии качества голоса в исследуемой сети.

Программное обеспечение имитатора среды корпоративного портала построено, как набор "клиент-серверных" взаимодействующих компонентов. Имитационный сервер получает все необходимые параметры для проведения сценария моделирования по протоколу http с помощью штатного linux web-сервера (типа apache). Сервер возвращает результаты моделирования вместе с построенными графиками обратно клиентскому компьютеру.

Установлено, что для алгоритмов активного управления очередями очень важным параметром является средняя длина очереди – сглаживаемое значение реального заполнения буфера обмена. Уменьшение этого значения согласно формуле классического RED-алгоритма приводит к уменьшению вероятности сброса пакетов.

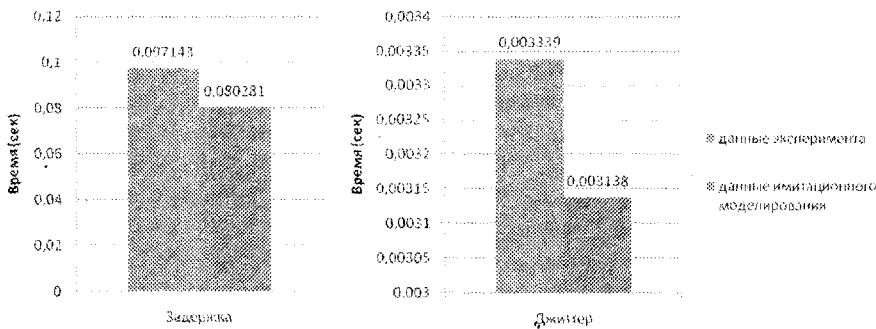


Рисунок 2 – Время средних значений задержки и джиттера для голосового трафика, полученных экспериментально и с помощью имитационной модели

Оценка качества имитационного моделирования для вектора нагрузки, учитывающего: число источников голосового трафика, число web-клиентов, число ftp-источников осуществлялась на основе попадания его результатов в определенную зону, что позволяет оценить нагрузку на среду корпоративного портала при заданной топологии, конфигурационных параметрах каналов и механизмов управления трафиком. При этом, для оценки голосового трафика применялись зоны качества, которые характеризуются процентами потерянных пакетов и односторонней задержкой.

Проверка точности имитационной модели осуществлялась на основе сравнения выходов модели и реальной системы при одинаковых входах. Использовался критерий оценки двух выборок и была проверена статистическая гипотеза и сделан вывод о принадлежности выборки выходов системы и модели одной совокупности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корпоративные порталы: современная концепция и ее воплощение в продуктах [Электронный ресурс] URL: <http://www.klubok.net/article432.html>
2. Корпоративные порталы: определение, история развития, цели и средства [Электронный ресурс] URL: <http://otherreferats.allbest.ru/marketing/c00175610.html>
3. Шибанов, А.И. Нахождение плотности распределения времени исполнения GERT-сети на основе эквивалентных упрощающих преобразований // Автоматика и телемеханика. 2003. № 2. С. 117-126.
4. Еременко, В.Т. Математическое моделирование процессов информационного обмена в распределенных управляющих системах : Монография / Под общей редакцией Константинова И.С. – м.: Машиностроение, 2004. 224 с.
5. Еременко, В.Т. Основное содержание теории функциональной стандартизации протоколов безопасности и принципы ее разработки // Телекоммуникации. 2003. № 6. С. 34–38.
6. Еременко, В.Т. Концепция обнаружения и коррекции логических ошибок в реализациях профилей протоколов безопасности // Телекоммуникации. 2003. № 8. С. 30–35.
7. Еременко, В.Т. Моделирование информационных потоков в сетях передачи данных интегрированных АСУ / С.И. Афонин, В. Т. Еременко, Т. М. Парамохина, Л.В. Кузьмина, Д. А. Плащенков // Информационные системы и технологии. 2011. №6. С. 35–42.
8. Еременко, В.Т. Методы решения задач распределения информационных потоков в сетях передачи данных предприятия на основе резервирования ресурсов / С.И. Афонин, В. Т. Еременко, Л.В. Кузьмина, и др. // Информационные системы и технологии. 2012. №1. С.78–84.
9. Еременко, В.Т. Создание теоретических основ автоматизации и построения технологической составляющей АСУ территориально распределенных предприятий / С.И. Афонин, В. Т. Еременко. // Информационные системы и технологии. 2012. №2. С. 99–105.
10. Еременко, В.Т. Метод проектирования сетей передачи данных совместимых с неблокируемой маршрутизацией / В. Т. Еременко, А.И. Офицеров, С. А. Черепков // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. №4. С. 38–46.
11. Еременко, В.Т. Анализ моделей управления трафиком в сетях АСУП на основе технологии MPLS / В.Т. Еременко, С.В. Еременко, Д.В. Анисимов, С.А. Черепков, А.А. Лякишев // Информационные системы и технологии. 2013. №1. С. 106-112.

Рыгов Михаил Юрьевич

ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет,
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Системы информационной безопасности»
+7(910)330-02-37, +7(4832)58-83-89
E-mail: rmy@tu-bryansk.ru

Мегаев Кирилл Андреевич

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс,
аспирант кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»
+7(953)619-71-15
E-mail: megaev@mail.ru

SIMULATION PROCESS DATA EXCHANGE AMONG CORPORATE PORTAL WITH AGGREGATED TRAFFIC

The paper proposes a simulation model of a parameterized communication among corporate portal, based on event-driven method of reproducing the logic of its operation and system parameters, and characterized to analyze aggregated traffic, including voice traffic and TCP-load (web-and ftp-traffic). Performed calibration model based on the selected output metrics: packet delay, jitter and packet loss percentage.

Keywords: simulation, delay, jitter, voice traffic aggregation.

BIBLIOGRAPHY

1. Korporativnye portaly: sovremennaja koncepcija i ee voploshhenie v produktah [Elektronnyj re-surs] URL: <http://www.klubok.net/article432.html>
2. Korporativnye portaly: opredelenie, istorija razvitiya, celi i sredstva [Elektronnyj resurs] URL: <http://otherreferats.allbest.ru/marketing/c00175610.html>
3. Shibanov, A.P. Nahozhdenie plotnosti raspredelenija vremeni ispolnenija GERT-seti na osnove jekvivalentnyh uprosnjajushhh preobrazovanij // Avtomatika i telemekhanika. 2003. № 2. S. 117-126.
4. Eremenko, V.T. Matematicheskoe modelirovanie processov informacionnogo obmena v raspredelennyh upravljajushhh sistemah : Monografija / Pod obshej redakcij Konstantinova I.S. – m.: Mashinostroenie, 2004. 224 s.
5. Eremenko, V.T. Osnovnoe sodержanie teorii funkcional'noj standartizacii protokolov bezopasnosti i principy ee razrabotki // Telekommunikacii. 2003. № 6. S. 34–38.
6. Eremenko, V.T. Koncepcija obnaruzhenija i korrekcii logicheskikh oshibok v realizacijah profilej protokolov bezopasnosti // Telekommunikacii. 2003. № 8. S. 30–35.
7. Eremenko, V.T. Modelirovanie informacionnyh potokov v setjah peredachi dannyh integritovannyh ASU / S.I. Afonin, V.T. Eremenko, T.M. Paramohina, L.V. Kuz'mina, D.A. Plashhenkov // Informacionnye sistemy i tehnologii. 2011. №6. S. 35–42.
8. Eremenko, V.T. Metody reshenija zadach raspredelenija informacionnyh potokov v setjah peredachi dannyh predpriyatija na osnove rezervirovanija resursov / S.I. Afonin, V.T. Eremenko, L.V. Kuz'mina, i dr. // Informacionnye sistemy i tehnologii. 2012. №1. S.78–84.
9. Eremenko, V.T. Sozdanie teoreticheskikh osnov avtomatizacii i postroenija tehnologicheskoy sostavljajushhej ASU territorial'no raspredelennyh predpriyatij / S.I. Afonin, V.T. Eremenko. // Informacionnye sistemy i tehnologii. 2012. №2. S. 99–105.
10. Eremenko, V.T. Metod proektirovanija setej peredachi dannyh sovmestimyh s neblokiruemoj marshrutizaciej / V.T. Eremenko. A.I. Oficerov, S.A. Cherepkov // Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij. 2012. №4. S. 38–46.
11. Eremenko, V.T. Analiz modelej upravlenija trafikom v setjah ASUP na osnove tehnologii MPLS / V.T. Eremenko, S.V. Eremenko, D.V. Anisimov, S.A. Cherepkov, A.A. Ljakishev // Informacionnye sistemy i tehnologii. 2013. №1. S. 106-112.

Rytov Mihail Jur'evich

Bryansk State Technical University.

Candidate of technical Sciences, docent. head of the Department of « Information Security Systems»

+7(910)330-02-37, +7(4832)58-83-89

E-mail: rmy@tu-bryansk.ru

Megaev Kirill Andreevich

State University - ESPC.

Post-graduate student of the Department «Electronics, Computer Sciences and Information Security»

+7(953)619-71-15

E-mail: megaev@mail.ru

В.А. ЛЮПО, Е.В. ОВЧИННИКОВ, В.А. СТРУК, Е.И. ЭЙСЫМОНТ

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ

Рассмотрены особенности динамических свойств наноразмерных частиц. Решеточные свойства обусловлены волнами механических возбуждений, а их квантами являются фононы. Простейший пример описания фононов можно привести для моноатомной периодической одномерной решетки. Связи между атомами моделируются пружинами с известным коэффициентом упругости. Спектр колебаний соответствующих фононов формирует акустическую волну, а их энергия описывается в приведении к первой зоне Бриллюэна. Анализ энергетических параметров динамических возбуждений, как правило, рассматривают в одномерной решетке кристалла. Для изучения протекания динамических процессов в частицах малого радиуса проанализировано отличие их обратных пространств от тех, которые соответствуют их объемным аналогам. Получена формула Шеррера выведенная на базе кинематической теории рассеяния рентгеновского излучения на объектах с произвольной структурой.

Ключевые слова: наноразмерные частицы, свойства, формула Шеррера, рентгеновские лучи, дифракция.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство экспертов считают, что текущий век станет веком нанотехнологий, наноинженерии и нанонауки. Во многих отраслях уже широко применяются результаты достижений в этих областях [1]. Однако создание новых наноматериалов и нанотехнологий ожидает нас впереди. Базой для этого являются фундаментальные исследования, в том числе и динамических свойств наноразмерных частиц.

Физические свойства всех веществ условно делятся на две группы. Первая группа свойств носит название электронных. К ним относят свойства веществ, их количественные параметры, обусловленных движением, взаимодействием электрических зарядов. Носителями электрических зарядов являются электроны, положительные (катионы) и отрицательные (анионы) ионы, различные молекулярные радикалы.

Если в каких-либо процессах электрические заряды в явной форме не проявляются, то есть основное влияние на параметры свойств оказывают атомы, молекулы или другие отдельные группы атомов, то говорят о решеточных свойствах веществ.

В электрических свойствах передатчиками энергии являются электромагнитные волны или потоки квантов электромагнитного поля. Решеточные свойства обусловлены волнами механических возбуждений, а их квантами являются квазичастицы, называемые фононами. Простейший пример описания фононов можно привести для моноатомной, периодической одномерной решетки, в которой связи между атомами моделируют пружинами с известным коэффициентом упругости. Спектр колебаний таких фононов формирует волну, а их энергия описывается в приведении к первой зоне Бриллюэна. Описание энергетических параметров динамических возбуждений, как правило, рассматривают в одномерной решетке кристалла. Первая зона Бриллюэна соответствует ячейке Вигнера-Зейтца относительно начала координат обратной решетки. Последняя является частным случаем полиэдра Вороного, который для узлов обратной решетки относительно начал координат строят следующим образом. Из начала координат проводят радиус-вектор r^* в ближайшие узлы обратной решетки. Через середины этих радиус-векторов проводят плоскости, которые формируют закрытый полиэдр. Этот полиэдр и носит название первой зоны Бриллюэна. В идеальном кристалле узел обратной решетки - это точка. Границы зоны Бриллюэна определяют граничные условия для колебательных кристаллических мод. Границы этих зон бесконечно тонкие и фиксированные в обратном пространстве. Следовательно, для изучения протекания динамических процессов в частицах малого радиуса необходимо проанализировать отличие их обратных пространств от тех, которые соответствуют их объемным аналогам.

Динамические процессы в частицах малого радиуса. Эта проблема может быть проанализирована в рамках общей теории рассеяния рентгеновских лучей на кристаллах.

Рассеивающую способность любого объекта (f) определяют отношением амплитуды рассеяния на нем рентгеновского излучения к амплитуде луча, рассеянного на свободном электроде. Интенсивности падающих лучей и направление рассеяния должны быть одинаковыми для рассеивающего центра и свободного электрона.

Условие дифракции рентгеновских лучей на кристалле описывают уравнением Вульфа-Брэггов [2]:

$$2d \sin \vartheta = n\lambda, \quad (1)$$

где d - межплоскостное расстояние, λ - длина волны рентгеновского излучения, ϑ - брэгговский угол, равный половине угла дифракции, то есть угла между прошедшим и рассеянными лучами.

Вектор обратной решетки \vec{s} и вектор \vec{d} параллельны, но относятся к разным пространствам: обратного и прямого соответственно.

Для кристаллов выполняется условие:

$$s = 1/d. \quad (2)$$

При рассеянии рентгеновских лучей на объекте с произвольной структурой амплитуда рассеянного луча $A(s)$ равна

$$A(s) = \sum_{j=1}^N f_j \exp 2\pi i s r_j, \quad (3)$$

где f_j - атомная амплитуда рассеяния j -го атома, N - число атомов.

Рассмотрим кристаллит, полученный из кристалла, у которого имеется плоскость (hkl) с межплоскостным расстоянием $d(hkl)$. Пусть эта плоскость является плоскостью поверхности кристаллита, толщина которого вдоль \vec{d} равна L , то есть

$$L = Nd, \quad (4)$$

где N - число плоскостей.

Рассеивающая способность одной плоскости равна $F(hkl)$. Именно такую плоскость выберем в качестве рассеивающего центра. Тогда (3) примет вид

$$A(s) = \sum_{n=0}^{N-1} F_n(s) \exp 2\pi i s n d. \quad (5)$$

Так как $F_n(s) = F(s)$ (все плоскости одинаковые), то выражение (5) записывается

$$A(s) = F(s) \sum_{n=0}^{N-1} \exp 2\pi i s n d. \quad (6)$$

В этой формуле под знаком суммы стоит геометрическая прогрессия, знаменатель которой равен $\exp 2\pi i s d$ [3]. Сумма членов этой прогрессии равна

$$C_N = \frac{1 - \exp 2\pi i N d s}{1 - \exp 2\pi i s d}. \quad (7)$$

Так как экспериментально определяемым параметром является интенсивность $I(s)$, которая связана с амплитудой $A(s)$ условием

$$I(s) = A(s) \cdot A^*(s), \quad (8)$$

то выражение (7) с учетом условия (8) примет вид:

$$I(s) = A(s)A^*(s) = \frac{(1 - \exp 2\pi i s Nd)(1 - \exp(-2\pi i Nsd))}{(1 - \exp 2\pi i s d)(1 - \exp(-2\pi i s d))} = \frac{1 - \cos 2\pi ds}{1 - \cos 2\pi ds} = \frac{\sin^2 \pi s Nd}{\sin^2 \pi s d}. \quad (9)$$

Рентгеновский рефлекс имеет форму вытянутого треугольника. Узел обратной решетки «размывается» от угла дифракции идеального бесконечного кристалла в треугольник (рис. 1). Ширина узла равна $2\Delta s$, то есть Δs - полуширина «размытого» узла обратной решетки.

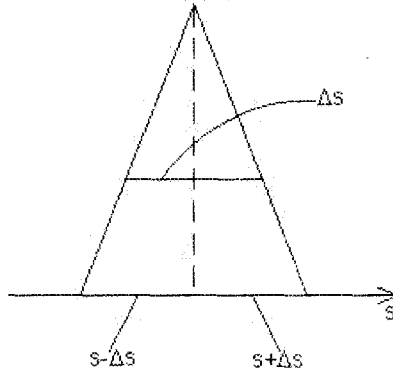


Рисунок 1 – Форма сечения «рефлекса» узла обратной решетки
 s -узел обратной решетки

Запишем условие (9) для точек $s \pm \Delta s$. В этих точках $I(s) = 0$. Следовательно, из условия (9) $I(s \pm \Delta s) = 0$ получим:

$$\frac{\sin^2 Nd(s \pm \Delta s)}{\sin^2 \pi d(s \pm \Delta s)} = \frac{\sin^2 \pi Nd \Delta s}{\sin^2 \pi d \Delta s}. \quad (10)$$

Так как аргумент синуса в числителе растет быстрее аргумента в знаменателе, то из условия (10) вытекает

$$\sin^2 \pi Nd \Delta s = 0,$$

то есть

$$\pi Nd \Delta s = \pi \quad (11)$$

или

$$Nd \Delta s = 1. \quad (12)$$

Вследствие того, что $Nd = L$, где L линейный размер кристаллита по направлению вектора \vec{d} , получаем

$$L \Delta s = 1. \quad (13)$$

Из этой формулы следует ряд выводов:

- при больших L (макроталл) Δs имеет малое значение, то есть представление о точечном узле обратной решетки справедливы.
- при $L \rightarrow 0$, $\Delta s \rightarrow \infty$, то есть для газа Δs настолько велики, что рефлексы перекрываются.
- зона Бриллюэна при малых L имеют не тонкие границы, а слои толщиной Δs . Динамические процессы в кристаллах с малыми значениями L отличаются от аналогичных в объеме.
- величина Δs всех узлов по направлению вдоль одного и того же вектора \vec{s} одинакова.
- при анизотропии размера нанокристалла Δs будет различна для разных направлений в обратной решетке;

- профиль «размытого» узла обратной решетки не соответствует полуширине рефлекса так как

$$\Delta s / \Delta 2\vartheta \neq const,$$

где $\Delta 2\vartheta$ - полуширина рефлекса.

Величина $\Delta s = \cos \vartheta (\Delta 2\vartheta) / \lambda$, то есть

$$L = \frac{\lambda}{\cos \vartheta (\Delta 2\vartheta)}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная формула Шеррера, выведенная на базе общей теории рассеяния рентгеновского излучения на объектах с произвольной структурой, путем анализа амплитуд (и интенсивностей) рентгеновских рефлексов. Традиционные выводы уравнений Шеррера и Вульфа-Брэггов ни амплитуды, ни к интенсивности не учитывают. Именно поэтому значения коэффициента трения Шеррера зависят от выбора геометрической модели рассеяния. Учет интенсивностей рефлексов показывает, что этот коэффициент равен единице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, Е.Ю. Высокие технологии в инновационной экономике // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* / Е.Ю. Степанова, Л.И. Поландова. – 2007. - № 3/267 (533). – С. 156 – 167.
2. Гийе, А. Рентгенография кристаллов / А. Гийе. - М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. - 604 с.
3. Лиопо, В.А. Температурный «эквивалент» наноразмерности / В.А. Лиопо, В.А. Струк // *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы*. Сер 2. - 2009. - № 2 (82). - С. 84-89.

Лиопо Валерий Александрович

УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купаль»

Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики

Тел. (152) 771092

E-mail: liopo@grsu.by

Овчинников Евгений Витальевич

УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купаль»

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и методов управления

Тел. (152) 484421

E-mail: ovchin_1967@mail.ru

Струк Василий Александрович

УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купаль»

Доктор технических наук, профессор, декан факультета инновационных технологий машиностроения

Тел. (152) 484411

E-mail: struk@grsu.by.

Эйсымонт Евгения Ивановна

УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купаль»

Преподаватель кафедры логистики и методов управления

Тел. (152) 484421

E-mail: gfih@mail.ru

V.A. LIPO, E.V. OVCHINNIKOV, V.A. STRUK, E.I. EISYMONT

DYNAMIC PROPERTIES OF NANOPARTICLES

The features of the dynamic properties of nanosize particles were considered. Lattice properties caused by waves of mechanical excitations and their quanta are phonons. The simplest example is the description of the phonons can lead to a monatomic a one-dimensional periodic lattice. Bonds between the atoms are modeled by springs with known coefficient of elasticity. The oscillation spectrum of respective phonons creates a wave and their energy is described in a reduction to the first Brillouin

zone. Analysis of the energy parameters dynamic excitations are usually treated in a one-dimensional crystal lattice. To study the occurrence of dynamic processes in the particles of small radius was analyzed the difference of their reciprocal space from those that correspond to their bulk counterparts. A Scherrer formula was derived on the kinematic theory based of X-ray scattering on objects with arbitrary structure.

Keywords: *nanosize particles, properties, Scherrer formula, X-ray waves, diffraction.*

BIBLIOGRAPHY

1. Stepanova, E.Ju. Vysokie tehnologii v innovacionnoj jekonomike // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii /E.Ju. Stepanova, L.I. Polandova. – 2007. - № 3/267 (533). – S. 156 – 167.
2. Gin'e, A. Retgenografija kristallov / A. Gin'e. - M. : Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 1961.- 604 s.
3. Liopo, V.A. Temperaturnyj «jektivivalent» nanorazmernosti / V.A. Liopo, V.A. Struk // Vesnik GrDU imja Janki Kupaly. Ser 2. - 2009.- № 2 (82). - S. 84-89.

Liopo Valery Aleksandrovich

Yanka Kupala State University of Grodno

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor. Professor of Department of Theoretical Physics,

Tel. (152) 771092

E-mail: liopo@grsu.by.

Auchynnikaŭ Yauheni Vitalievich

Yanka Kupala State University of Grodno

Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of department of logistics and management methods

Tel. (152) 484421

E-mail: ovchin_1967@mail.ru

Struk Vasil Aleksandrovich

Yanka Kupala State University of Grodno

Doctor of Sciences (Engineering), Professor. Dean of Faculty of Innovative Mechanic Engineering,

Tel. (152) 484411

E-mail: struk@grsu.by.

Eisymont Evgeniya Ivanovna

Yanka Kupala State University of Grodno

Lecturer of department of logistics and management methods

Tel. (152) 484421

E-mail: g11h@mail.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.94.93

И.Е. ЕРМАКОВ, А.В. МИХЕЕВ

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ, ЗНАЧИМЫХ ДЛЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА, ОПТИМИЗАЦИИ И КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье собраны и представлены в обобщённом виде закономерности и зависимости параметров процесса гидроабразивного резания (ГАР), их конфликтующие взаимовлияния, имеющие значение при технико-экономическом анализе. Рассмотрен вопрос введения в практику удельных технико-экономических показателей процесса ГАР. Рассмотрен вопрос использования абразивных смесей. Предложены удельные технико-экономические показатели для использования в задачах нахождения оптимального состава и пропорций абразивных смесей. Сформулирована задача создания комплексной программной системы технико-экономического моделирования процесса ГАР и основные требования к такой системе.

***Ключевые слова:** гидроабразивное резание, технико-экономический анализ, удельные технико-экономические показатели, абразивные смеси, технико-экономическое моделирование.*

Введение

В данной статье представлена попытка собрать воедино и обобщить информацию о качественном и количественном характере зависимостей, связывающих макропараметры процесса гидроабразивного резания (ГАР), сделать очевидными все их основные конфликтующие взаимовлияния. На базе такого анализа возможен переход от частного к комплексному технико-экономическому анализу и оптимизации, а также разработка программного обеспечения для комплексного технико-экономического моделирования технологического процесса ГАР.

В качестве теоретической основы для анализа зависимостей параметров использованы результаты работ [1, 2, 3].

В первой части работы рассмотрены по очереди параметры, принятые нами (условно) за независимые, и раскрыт характер их влияния на остальные параметры. В конце первой части приведена сводная таблица, обобщающая информацию о рассмотренных зависимостях.

При рассмотрении данных пунктов следует обратить внимание, что производительность и удельная себестоимость ГАР могут быть как конфликтующими, так и неконфликтующими зависимыми параметрами. Понимание этого факта имеет большую важность для технолога-практика.

Во второй части работы рассмотрен вопрос введения и использования удельных технико-экономических показателей процесса ГАР. В третьей части работы рассмотрен вопрос использования абразивных смесей, их оптимального составления, на основе вводимых удельных показателей, характеризующих абразивные материалы.

В заключении работы сформулирована задача разработки программного обеспечения для комплексного технико-экономического моделирования процесса ГАР и основные требования к нему.

Параметры, принятые в качестве независимых, и их влияние.

Мощность гидроабразивной установки.

Мощность гидроабразивной установки является параметром, значение которого должно быть выбрано на самом раннем этапе проектирования технологического процесса ГАР — при выборе модели оборудования. Как отмечается в исследовании [5], «ценовая эф-

эффективность использования 1кВт·ч электроэнергии менее мощного оборудования ($N=45$ кВт) примерно на 30% выше, чем более мощного ($N=92$ кВт). Поэтому, если не требуется решения специфических технологических задач по раскрою толстолистовых заготовок, то рекомендуется применение насосных станций относительно невысокой энергоёмкости ($N=35-50$ кВт)». Таким образом, конфликтующими целевыми параметрами для параметра мощности гидроабразивной установки, является номенклатура обрабатываемых материалов и удельная себестоимость обработки (в составляющей энергоэффективности).

Диаметр фокусирующего сопла.

Увеличение диаметра фокусирующего сопла увеличивает массовый выход из сопла гидроабразивной смеси в единицу времени, т. е. возрастает массовый фактор кинетической энергии струи, однако убывает скорость истечения и возрастает гашение скорости струи, т. е. убывает скоростной фактор кинетической энергии. Также возрастает площадь зоны эрозии материала. Очевидно, что увеличение диаметра возможно в тех пределах, в которых насосная станция способна увеличивать расход жидкости до необходимого уровня, после чего происходит аварийная остановка насоса.

При изменении диаметра сопла в левой части возможного диапазона диаметров оборудование работает в режиме недоиспользования мощности — при увеличении диаметра в этой части диапазона скорость истечения может поддерживаться на одном уровне за счёт повышения расхода жидкости. В этом интервале увеличение диаметра сопла ведёт к увеличению кинетической энергии струи, а следовательно — производительности резания, однако также увеличивается расход абразива, как в единицу времени, так и на единицу длины резания (из-за увеличения ширины линии реза), что ведёт к увеличению себестоимости резания. Вместе с ростом площади зоны реза ухудшается качество поверхности обработки. Все конфликтующие параметры должны быть уравновешены при выборе диаметра сопла для решения конкретной технологической задачи на конкретной гидроабразивной установке.

Угол падения струи.

Максимально интенсивное воздействие струи на обрабатываемый материал достигается при некотором угле падения из диапазона от 0° до 90° (при направленности струи по направлению подачи). При малых углах падения происходит скольжение струи вдоль поверхности практически без её разрушения, при перпендикулярном падении идёт недостаточное эффективное использование энергии струи в эрозионном процессе (гашение с отторжением от поверхности). Вследствие этих физических закономерностей, уменьшение угла падения струи (только до определённого оптимального значения) ведёт к увеличению производительности обработки при сохранении постоянным всех остальных параметров функционирования оборудования, а следовательно — при уменьшении удельной себестоимости обработки. Однако неперпендикулярность падения струи ведёт на криволинейных участках траектории резания к резкому увеличению отклонения точки выхода струи от точки её входа (которое неизбежно присутствует в какой-то степени даже при перпендикулярности падения).

Таким образом, использование неперпендикулярного падения струи практически представляет интерес только в задачах прямолинейного резания либо в специфических задачах, подобных утилизационному раскрою. Возможным путём использования эффекта от неперпендикулярного падения струи может быть применение адаптивного управления углом падения в зависимости от кривизны траектории резания.

Скорость подачи.

Существует максимально возможная скорость подачи сопла относительно обрабатываемой поверхности, при которой обеспечивается сквозное прорезание материала. Однако при этом качество поверхности обработки может быть достаточно грубым. Изменение скорости подачи возможно в меньшую сторону, с целью увеличения качества обработки. При максимально возможной скорости подачи имеем относительно этого параметра максимальную производительность обработки и минимальную её себестоимость (поскольку параметр

скорости подачи не влияет на другие параметры функционирования оборудования). Кроме того, из-за физически закономерного отклонения струи от направления первоначального её падения имеется неизбежное смещение точки её выхода из материала от точки падения. При прямолинейной траектории резания этот эффект не является критичным, однако на криволинейных участках он приводит к неизбежной неперпендикулярности среза, снижению точности резания.

Таким образом, относительно параметра скорости подачи имеются конфликтующие параметры: производительность совокупно с себестоимостью против качества поверхности совокупно с точностью резания. Некоторый компромисс относительно точности резания может быть обеспечен составлением программы ЧПУ с переменной скоростью в зависимости от кривизны траектории.

Эрозионная способность абразивного вещества.

Выбрав абразивное вещество (здесь мы не рассматриваем зернистость, которая также влияет на эрозионную способность абразивного порошка, поэтому ведём речь о выборе не самого абразивного порошка, а только вещества) с большей эрозионной способностью, мы можем значительно увеличить производительность резания при прочих равных параметрах. Однако стоимость единицы массы абразивного порошка большей эрозионной способности будет выше. Кроме того, значительно возрастает интенсивность эрозии фокусирующего сопла, что влечёт рост расходов на обслуживание оборудования. Несмотря на то, что удельный расход массы абразива на единицу полезного эффекта будет меньше, удельная себестоимость обработки значительно возрастает.

Выбор в пользу более и эффективного дорогого абразивного материала приходится делать в случаях, если требуется значительно повысить производительность технологического процесса ГАР, либо сохранить достаточно высокую производительность при уменьшенной скорости подачи, для увеличения качества поверхности и точности резания.

Зернистость абразива.

Абразивный порошок с большим параметром зерна обладает большей эрозионной способностью и в то же время имеет меньшую стоимость. На практике обычно подразумевается некоторая «нормальная» зернистость абразива, уход в меньшую сторону от которой должен быть обоснован. Уменьшение зернистости абразивного порошка положительно влияет на чистоту поверхности резания, однако уменьшает производительность обработки. Это также в силу постоянства расхода абразива в единицу времени увеличивает его расход на единицу полезного эффекта — и вкуче с большей стоимостью менее зернистого порошка даёт значительное увеличение себестоимости обработки.

Кроме названных зависимостей, следует брать в рассмотрение эффекты сыпучести и слипаемости порошка (что может играть отрицательную роль в тракте подачи абразива к сопловому тракту, вплоть до невозможности обеспечить на некотором оборудовании номинальный расход абразива), большей или меньшей смачиваемости абразивного зерна в струе (большая смачиваемость абразива ведёт к повышению эрозионной способности струи).

Концентрация абразива в струе.

В работе [5] исследован вопрос об оптимальной концентрации абразива в струе. Показано, что оптимальная по себестоимости резания концентрация меньше оптимальной по производительности. Это связано с ростом интенсивности эрозии фокусирующего сопла при повышении концентрации абразива. Таким образом, конфликтующие относительно концентрации абразива в струе параметры — интенсивность эрозии обрабатываемого материала и интенсивность износа деталей оборудования. Увеличение концентрации абразива ведёт к некоторому снижению скорости абразивной струи. Кроме того, как было ранее сказано, концентрация абразива может оказаться ограниченной из-за проблем с подачей его к соплу из-за недостаточной сыпучести, слипания в бункере.

Сводная таблица параметров процесса ГАР и их конфликтных зависимостей

В таблице знаком «+» обозначена зависимость параметров монотонно возрастающего вида, знаком «-» — зависимость параметров монотонно убывающего вида, сочетаниями «+, -», «-, +» — немонотонные зависимости параметров соответствующего вида, имеющие точку экстремума, const — отсутствие зависимости параметров, ~const — пренебрежимо малая зависимость.

Таблица 1 — Конфликтные зависимости параметров процесса ГАР

№ пп	Параметр, принятый в качестве независимого	Вид зависимости	Параметры, рассматриваемые в качестве зависимых
1	Мощность установки гидроабразивной	+	Номенклатура обрабатываемых материалов
		-	Удельная себестоимость резания
2	Диаметр фокусирующего сопла минимально ограничен зернистостью абразива, максимально ограничен предельным расходом жидкости, обеспечиваемым насосной станцией	+	Массовый выход гидроабразивной смеси из сопла (массовая состав-ляющая кинетической энергии струи)
		-	Скорость истечения струи из сопла
		+	Гашение скорости струи на пути к рабочей зоне
		-	Скорость соударения струи с материалом
		+, -	Производительность резания
		+	Площадь зоны эрозии
		-	Качество поверхности реза
		+	Расход абразива в единицу времени
		+	Расход абразива на единицу длины траектории резания
		+	Удельная себестоимость резания
3	Угол падения струи рассматривается в интервале от α_{opt} до 90° , где α_{opt} — угол из диапазона ($0^\circ..90^\circ$), при котором достигается наибольшая интенсивность эрозии материала	-	Интенсивность эрозии материала в единицу времени
		const	Расход абразива в единицу времени
		const	Интенсивность эрозии фокусирующего сопла в единицу времени
		+	Время резания
		-	Производительность резания
		+	Удельная себестоимость резания
		-	Отклонение точки выхода струи из материала относительно точки входа
+	Точность резания		
4	Скорость подачи сопла относительно обрабатываемой поверхности ограничена сверху максимальной скоростью, при которой будет обеспечено сквозное прорезание материала	const	Расход абразива в единицу времени
		const	Интенсивность эрозии фокусирующего сопла в единицу времени
		-	Время резания
		+	Производительность резания
		-	Удельная себестоимость резания
		-	Качество поверхности реза
		-	Точность резания на криволинейных участках траектории

5	Эрозионная способность абразивного вещества	+	Интенсивность эрозии материала в единицу времени
		-	Время резания
		+	Производительность резания
		+	Стоимость единицы массы абразивного материала
		+	Интенсивность эрозии фокусирующего сопла в единицу времени
		+	Себестоимость резания
		+	Максимально возможная производительность резания на данном оборудовании
		+	Номенклатура обрабатываемых материалов
		+	Качество резания при сохранении производительности (за счёт уменьшения скорости подачи без потери производительности)
6	Зернистость абразива (диаметр абразивного зерна)	+	Эрозионная способность абразивного порошка
		-	Стоимость единицы массы абразивного порошка
		+	Интенсивность эрозии обрабатываемого материала в единицу времени
		-	Интенсивность эрозии фокусирующего сопла в единицу времени
		-	Время резания
		+	Производительность резания
		-	Себестоимость резания
-	Качество поверхности реза		
7	Концентрация абразива в струе ограничена максимальным потоком через сопло	+	Массовая составляющая кинетической энергии струи
		-	Скоростная составляющая кинетической энергии струи
		+	Расход абразива в единицу времени
		+	Интенсивность эрозии обрабатываемого материала в единицу времени
		~const, +	Интенсивность эрозии фокусирующего сопла в единицу времени
		-	Время резания
		-, +	Удельная себестоимость резания
+	Производительность резания		

Необходимость перехода к удельным технико-экономическим показателям.

На протяжении долгого в работах, посвящённых выбору оптимальных режимов гидроабразивной обработки, не использовался переход к удельным технико-экономическим показателям. Необходимость этого отмечается, в частности, в работе [5]: «Однако до настоящего времени не проводились исследования с целью структурного анализа и оптимизации технологических параметров процесса ГАР по критерию удельной технологической себестоимости (удельных оперативных затрат средств на отделение единицы объёма обрабатываемого материала), как важнейшей характеристикой технико-экономической эффективности. Это объясняется, в первую очередь, достаточно сложным функциональным характером зависимости оперативных затрат средств на ГАР от технологических условий обработки: рабочего давления струи, расходов воды и абразива и т.д.» Авторами процитированной работы вводится модель удельной технологической себестоимости, с использованием следующих характеристик технологического процесса:

J_{OM} — интенсивность гидроструйной эрозии, т. е. величина съёма обрабатываемого материала в единицу времени. Авторы приводят в качестве вариантов единиц измерения как удельные массовые (кг/с, кг/мин), так и удельные объёмные единицы (мм³/с). Очевидно, что ближе к задаче технико-экономической оценки являются удельные объёмные единицы.

C_t — удельная технологическая себестоимость процесса гидроабразивного резания — интегральный технико-экономический показатель, представляющий собой стоимостное выражение затрат на обработку (удаление, съём) единицы массы либо объёма обрабатываемого материала.

В следующем пункте мы обобщаем введение в дополнение к предложенным и другим удельных характеристик.

Использование абразивных смесей.

Перспективным направлением технико-экономического совершенствования технологии ГАР является использование абразивных смесей [4].

При использовании абразивных смесей играют роль два типа эффектов: качественные и количественные.

Качественные эффекты обусловлены различными функциями, которые могут выполнять различные абразивные частицы. Как показано в работах [1, 2], эрозия материала происходит под воздействием трёх основных механизмов: микрорезания, хрупкого разрушения и усталостного разрушения. Соответственно, различные абразивные частицы могут давать свой вклад в тот или иной механизм, действуя взаимодополняюще. Однако для изучения данного типа эффекта требуются серьёзные дополнительные исследования в области физики гидроабразивного разрушения. Дополнительно свои эффекты приносит использование жидких присадок, способных модифицировать свойства струи, свойства смачивания абразивного зерна в ней.

Количественные эффекты использования абразивных смесей, очевидно, заключаются в возможности гибкой балансировки эрозионной способности смеси и её стоимости, за счёт смешивания более дешёвого и более дорогого и твёрдого абразивного материала [4].

С точки зрения количественной можно показать, что имеет смысл применение смесей не более чем из двух компонентов.

Для постановки и решения оптимизационных задач относительно вещественного и пропорционального состава смесей целесообразно ввести две удельные характеристики для различных абразивных материалов:

1. удельная эрозионная эффективность, показывающая полезный эффект от единицы массы абразива, в виде единицы массы либо объёма обработанного (снятого) материала. Разумеется, этот показатель необходимо рассматривать относительно некоторой эталонной зернистости абразива, эталонного обрабатываемого материала и эталонной его толщины (ввиду того, что при увеличении толщины преграды удельная эрозионная эффективность будет падать из-за неизбежного гашения кинетической энергии струи). Также

из-за нелинейности зависимости интенсивности эрозии различных материалов от их твёрдости и параметров, зафиксированных нами в качестве эталонных, необходимо введение таблиц корректирующих коэффициентов для различного типа обрабатываемых материалов. Тем не менее, для задачи технико-экономической оптимизации состава смеси, такой удельный показатель, несмотря на его грубость, является, видимо, наиболее практичным.

2. удельная эффективная себестоимость абразивного материала, показывающая стоимостное выражение затрат на достижение интенсивности эрозии J_{OM} за счёт использования данного абразивного вещества, взятое для некоторой эталонной зернистости абрава;

3. удельная относительная эффективная себестоимость абразивного материала — отношение значения предыдущего параметра для данного абразивного материала к значению его для некоторого эталонного абразивного материала.

Решение оптимизационных задач по нахождению составов абразивных смесей производится из следующих соображений:

1. для данной абразивной установки и режима её работы ограниченный ресурс — пропускная способность сопла в единицу времени;

2. соответственно, при выбранном типе абразива ограничена максимально достижимая производительность резания;

3. использование в качестве составляющей более твёрдого и дорогого типа абразива целесообразно, в частности, тогда, когда достигнута максимально достижимая производительность резания с однокомпонентным порошком, либо необходимо увеличивать качество резания без уменьшения производительности;

4. в идеальной схеме, при переходе от однокомпонентного порошка к двухкомпонентной смеси целесообразно выбирать второй компонент по критерию его наименьшей удельной эффективной себестоимости, далее наращивать его присутствие в смеси, вплоть до перехода вновь к однокомпонентному порошку из которого абразива, далее при необходимости выбирается очередной минимальный по удельной эффективной себестоимости материал, и т.д.

Задача построения системы технико-экономического моделирования.

Как для исследовательских, так и для производственных нужд, представляется необходимым создание программной системы технико-экономического моделирования процесса ГАР. Модель должна отражать все рассмотренные нами закономерности и зависимости, позволять выбор любого множества параметров (как находящихся в начале причинно-следственной цепи, так и в её конце) в качестве независимых и анализ, в том числе оптимизационный, остальных параметров в качестве зависимых, допускать как точную фиксацию параметров, так и интервальное ограничение, обеспечивать эффективное визуальное представление.

На макроуровне рассмотрения, необходимым для технико-экономического анализа, процесс ГАР носит стационарный во времени и локализованный пространственно характер, что упрощает используемые вычислительные методы и делает возможным создание такой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов, Ю.С. Математическое моделирование процессов сверхзвукового удара и проникания тел в металлические преграды / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев – Орел: «Издательский дом «Орлик», 2012. – 160 с.
2. Степанов, Ю.С. Разрушение преграды сверхзвуковым потоком свободных абразивных частиц. / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев – Москва: «Издательский дом «Спектр», 2010. – 152 с.
3. Ермаков, И.Е. Изучение процесса гидроабразивного резания путём моделирования на основе сеточно-характеристических численных методов / И.Е. Ермаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. №2-6 (292) 2012. - С. 87-95.
4. Барсуков, Г.В. Определение компонентного состава масс абразивной смеси для резания материалов

сверхзвуковой гидроабразивной струей / Г.В. Барсуков, А.А. Александров // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – № 2-3, - 2012. – С. 74 – 81.

5. Елфимов, В.М. Разработка методики выбора технологических режимов гидроабразивной резки материалов и конструкций по технико-экономическому критерию: диссертация кандидата технических наук: 05.02.08, защищена 13.03.13 [Место защиты: МГТУ им. Н. Э. Баумана] — М. - 2013.

Ермаков Илья Евгеньевич

Технологический институт им. Н.Н. Поликарпова ФГОУ ВПО «Государственный университет — УНПК», г. Орёл

НПО «Тесла», г. Орёл

E-mail: ilya@ermakov.net.ru

Михеев Александр Васильевич

Государственный университет - УНПК, г. Орёл

Научный сотрудник

Тел. (4862) 54-14-51

E-mail: awj@list.ru

I.E. ERMAKOV, A.V. MIKHEEV

ANALYSIS OF FACTORS AND PARAMETRIC LAWS OF HYDRO-ABRASIVE EROSION PROCESS, WHICH ARE SIGNIFICANT FOR TECH-ECONOMIC ANALYSIS, OPTIMIZATION AND COMPLEX MODELING

There are adduced a lot of factors and parametric laws of hydro-abrasive erosion process, which are significant for tech-economic analysis. Observed utility of specific tech-economic characteristics. Using of abrasive mixes is observed too. Introduced specific tech-economic characteristics for using in optimization problems of abrasive mixing. There is set a challenge of creating software for tech-economic modelling of hydro-abrasive erosion and basic requirements for such software.

Keywords: *hydro-abrasive erosion, tech-economic analysis, specific tech-economic characteristics, abrasive mixes, tech-economic modelling.*

BIBLIOGRAPHY

1. Stepanov, Ju.S. Matematicheskoe modelirovanie processov sverhzvukovogo udara i pronikaniya tel v metallicheskie pregrady / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev – Орёл: «Издательский дом «Орлик», 2012. – 160 с.

2. Stepanov, Ju.S. Razrushenie pregrady sverhzvukovym potokom svobodnyh abrazivnykh chastic. / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev – Москва: «Издательский дом «Спектр», 2010. – 152 с.

3. Ermakov, I.E. Izuchenie processa gidroabrazivnogo rezaniya putjom modelirovaniya na osnove setochno-kharakteristicheskikh chislennykh metodov / I.E. Ermakov // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii.* №2-6 (292) 2012. - S. 87-95.

4. Barsukov, G.V. Opredelenie komponentnogo sostava mass abrazivnoy smesi dlja rezaniya materialov sverhzvukovoj gidroabrazivnoj struej / G.V. Barsukov, A.A. Aleksandrov // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii.* – № 2-3, - 2012. – S. 74 – 81.

5. Elfimov, V.M. Razrabotka metodiki vybora tehnologicheskikh rezhimov gidroabrazivnoj rezki materialov i konstrukcij po tekhniko-jekonomicheskomu kriteriju: dissertacija kandidata tehniceskikh nauk: 05.02.08, zashchishhena 13.03.13 [Mesto zashhity: MG TU im. N. Je. Baumana] — М. - 2013.

Ermakov Ilya Evgenievich

Polykarpov Institute of Technology at State University – UNPK, Russia. Orel

NPO “Tesla”

E-mail: ilya@ermakov.net.ru

Mikheev Alexander Vasilyevich

State University - ESPC, Orel

research associate

Tel. (4862) 54-14-51

E-mail: awj@list.ru

О.Н. ЧЕРНОВА, С.Н. ЗЛОБИН, Н.В. ПЕТРОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ МАЛОГАБАРИТНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ КРИВОШИПНОГО ПРЕССА

Разработана математическая модель процессов в кривошипном прессе с малогабаритным гидравлическим предохранителем, позволяющая исследовать влияние основных параметров предохранителя на коэффициент перегрузки и определить оптимальные параметры предохранителя.

Ключевые слова: кривошипный пресс, предохранитель, математическая модель.

Кривошипные прессы малой силы (до 1 МН) составляют значительную долю из всего парка кривошипных прессов. Эта группа машин менее всего обеспечена надежной защитой от аварий и перегрузок. Они оснащаются разрушающимися предохранителями [1], которые имеют ряд существенных недостатков: низкая усталостная прочность, остаточные деформации, необходимость замены такого предохранителя после каждого срабатывания и др. Известны более эффективные предохранители – гидравлические самовосстанавливающиеся. Однако они требуют наличия отдельной гидросистемы, и, в ряде случаев, их установка на машины малых сил невозможна из-за больших габаритов известных устройств.

Задача создания самовосстанавливающегося предохранителя для прессов малых сил, поставленная в работе [1], остается актуальной и сейчас.

В связи с этим была разработана конструкция малогабаритного гидравлического предохранителя (рисунок 1), который не требует отдельного гидропривода, позволяет повысить долговечность и эффективность применения путем обеспечения возможности срабатывания на всем ходе ползуна вниз [2].

Устройство работает следующим образом. При возникновении перегрузки ползун 1 останавливается, а подпятник 6 шатуна, продолжая перемещаться вниз, сжимает рабочую жидкость высокой вязкости (типа «технический вазелин») в полости 7. Когда давление жидкости достигнет величины, при которой сила, создаваемая на торце втулки 5, превысит силу сопротивления, создаваемую пружиной 3, втулка 5, отжав шарик 4, начинает перемещаться вверх. При этом объем полости 7 увеличивается, подпятник шатуна опускается вниз до крайнего нижнего положения, вал проворачивается, а все механизмы пресса предохраняются от перегрузки. В том случае, когда перегрузка возникает при большем недоходе ползуна 1 до крайнего нижнего положения, чем номинальный недоход, ролик находится в контакте не с прямолинейным, а с криволинейным участком профиля копира 8, выдвигаясь вместе со штоком 2 из фланца втулки 5. При этом уменьшается сжатие пружины 3 и запирающая сила шариком 4 шпильки 9, тем самым снижая силу срабатывания предохранителя до значения, допускаемого на ползуне при этой величине недохода. После срабатывания предохранителя при ходе ползуна 1 вверх, совершаемого за счет энергии привода пресса, втулка 5, упираясь в регулируемый упор 10, возвращается в исходное положение так, чтобы шарик встал в канавку шпильки 9. Таким образом предохранительное устройство восстанавливает свое рабочее состояние.

Для теоретического исследования процессов в кривошипном прессе с малогабаритным гидравлическим предохранителем составлена математическая модель. Расчетная схема кривошипного пресса с таким предохранителем представлена на рисунке 1.

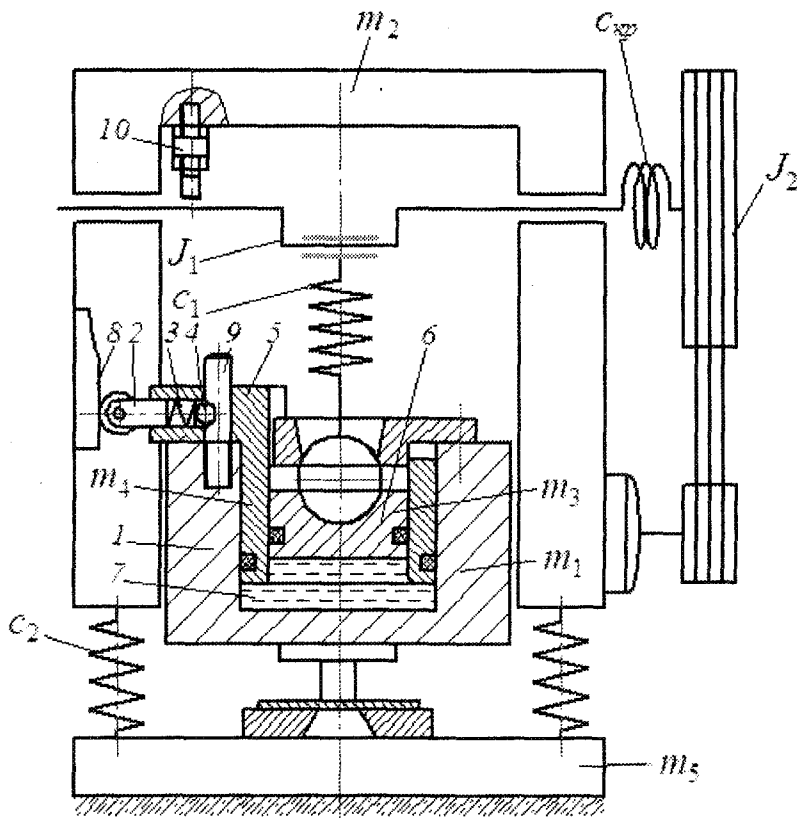


Рисунок 1 – Расчетная схема кривошипного пресса с малогабаритным гидравлическим предохранителем
 1 – ползун; 2 – шток; 3 – пружина; 4 – шарик; 5 – втулка; 6 – подпятник;
 7 – полость предохранителя, заполненная рабочей жидкостью; 8 – копир;
 9 – шпилька; 10 – регулируемый упор

При разработке математической модели были приняты следующие допущения:

- масса станины условно разбита на две части, нижнюю m_5 , которая принимается неподвижной и в расчете не учитывается, и верхнюю m_2 с приведенной к ней массами привода и кривошипного вала;
- масса шатуна распределена между массами подпятника m_3 и верхней части станины m_2 ;
- моменты инерции вращающихся частей приведены к оси маховика;
- пресс оснащен уравновешивателем, поэтому зазоры в сочленениях главного исполнительного механизма выбраны и в модели не учитываются;
- упругие деформации деталей пресса сосредоточены в шатуне, стойках станины и кривошипном валу;
- поступательное движение масс m_1 , m_3 , m_4 состоит из двух движений: переносного S , обусловленного кинематикой главного исполнительного механизма, и относительного x_i , налагаемого малыми перемещениями, вызванными упругими деформациями деталей пресса;
- утечки жидкости в предохранителе отсутствуют.

При разработке математической модели силы и перемещения, направленные вниз приняты положительными, направленные вверх – отрицательными.

Взаимодействие элементов пресса определяется условиями нагружения предохранительного устройства. Поэтому необходимо рассмотреть две фазы нагружения

предохранителя: фазу нарастания силы на рабочем органе пресса до момента начал срабатывания предохранителя и фазу срабатывания предохранительного устройства.

При принятых допущениях математическая модель, описывающая фазу нарастания силы на рабочем органе пресса, представляет собой систему из двенадцати дифференциальных уравнений первого порядка, включающую уравнения движения ползуна станины, подпятника шатуна, кривошипного вала, маховика, уравнение изменения давления рабочей жидкости в полости предохранителя и уравнения связи скоростей и перемещений:

$$\left. \begin{aligned} (m_1 + m_4) \frac{dv_1}{dt} &= G_1 + G_4 - R_1 - P_D + pF_1, \\ m_2 \frac{dv_2}{dt} &= G_2 + c_2 x_2 - \mu_2 v_2 - c_1 (S - x_3 + x_2), \\ m_3 \left(\frac{dv}{dt} + \frac{dv_3}{dt} \right) &= G_3 - R_2 - pF_1 + c_1 (S - x_3 + x_2), \\ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= c_{кр} (\alpha_1 - \alpha_2) - m_k c_1 (S - x_3 + x_2), \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= -c_{кр} (\alpha_1 - \alpha_2), \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{1}{\varphi} F_1 (v + v_1 - v_3), \\ \frac{dS}{dt} = v, \quad \frac{dx_1}{dt} = v_1, \quad \frac{dx_2}{dt} = v_2, \quad \frac{dx_3}{dt} = v_3, \quad \frac{d\alpha_1}{dt} = \omega_1, \quad \frac{d\alpha_2}{dt} = \omega_2, \end{aligned} \right\} (1)$$

где m_1, G_1 – масса и сила тяжести ползуна, деталей предохранителя и рабочей жидкости;
 m_2, G_2 – масса и сила тяжести верхней части станины с приводом, кривошипным валом и частью шатуна;

m_3, G_3 – масса и сила тяжести подпятника и части шатуна;

m_4, G_4 – масса и сила тяжести втулки;

c_1, c_2 – коэффициенты жесткости упругих связей «подпятник – верхняя часть станины» и «верхняя часть станины – стол пресса»;

$c_{кр}$ – коэффициент крутильной жесткости кривошипного вала;

$S = R \cdot \left[(\cos \alpha - \cos \alpha_0) + \frac{\lambda}{4} \cdot (\cos 2\alpha - \cos 2\alpha_0) \right]$ – кинематическое перемещение подпятника, [1];

R – радиус кривошипа;

$\lambda = R/L$ – коэффициент длины шатуна;

L – длина шатуна;

α_0 – начальное значение угла поворота кривошипного вала в момент встречи инструмента с заготовкой;

$\alpha = \alpha_0 - \omega_H t - \omega_1 t$ – текущее значение угла поворота кривошипного вала;

ω_H – номинальная угловая скорость кривошипного вала;

t – время движения частей пресса;

v – кинематическая скорость массы m_3 ;

x_1, v_1 – перемещение и скорость массы m_1 ;

x_2, v_2 – перемещение и скорость массы m_2 от положения равновесия, вызванные упругой деформацией связи c_2 ;

x_3, v_3 – перемещение и скорость массы m_3 , вызванные упругой деформацией связи c_1 ;

P_D – сила сопротивления деформации вырубаемого материала [3];

R_1 – сила трения в рабочих частях штампа и направляющих ползуна;

R_2 – сила трения в уплотнениях подпятника;

J_1 – момент инерции кривошипного вала;

J_2 – момент инерции маховика и вращающихся деталей привода, приведенный к валу маховика;

$\alpha_1, \alpha_2, \omega_1, \omega_2$ – углы поворота и угловые скорости кривошипного вала и маховика, соответственно, вызванные упругой деформацией вала;

$m_k = R(\sin \alpha + \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha) + m_k^{\mu}$ – приведенное плечо силы давления жидкости на подпятник [1];

m_k^{μ} – приведенное плечо сил трения;

μ_2 – коэффициент вязкого сопротивления, учитывающий демпфирование колебаний материалом станины;

p – давление рабочей жидкости в полости предохранителя;

F_1 – площадь поперечного сечения подпятника;

φ – коэффициент сжимаемости рабочей жидкости предохранителя.

Сопротивление деформации P_D листового материала при вырубке-пробивке принимается в виде аналитического выражения с учетом переменного сопротивления срезу в зависимости от пластических свойств вырубаемого материала и глубины внедрения пуансона [1, 3]:

$$P_D = k_1 L h_M \sigma_{cp}^x, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий затупление инструмента, колебаний и механических свойств металла;

L – периметр вырубаемого изделия;

h_M – толщина вырубаемого материала;

σ_{cp}^x – текущее сопротивление срезу, меняющееся в зависимости от глубины внедрения пуансона,

$$\sigma_{cp}^x = \frac{S_k}{2 - 0,95\psi_k} \cdot \frac{\psi}{\psi_k} \left(1,03 - \frac{0,9\psi}{1,9 - \psi} \right), \quad (3)$$

где ψ – относительное сужение поперечного сечения при вырубке-пробивке, $\psi = 0, \dots, \psi_k$;

ψ_k – относительное сужение при стандартных испытаниях на разрыв;

S_k – истинное напряжение разрушения [3].

Для материалов с равномерным относительным сужением поперечного сечения при растяжении $\psi_p \leq 0,15$

$$S_k = \sigma_{\sigma} (1 + 1,35\psi_k);$$

для материалов с $\psi_p > 0,15$

$$S_k = \sigma_{\sigma} (0,8 + 2,06\psi_k),$$

где σ_{σ} – предел прочности металла при растяжении.

При нормальных условиях работы прессы сила P_D возрастает до своего максимального значения $P_D = P_H$, затем происходит скол заготовки, и сила на ползуне снижается до нуля. В случае наступления перегрузки (например, при подаче сдвоенной заготовки) P_D про-

должает возрастать, что приводит к поломкам деталей пресса. Поэтому при достижении на ползуне P_H должно начаться срабатывание предохранительного устройства.

Своего максимума сила на ползуне достигнет, когда σ_{cp}^x будет наибольшим, которое получается, если в формулу (3) подставить соответствующее значение ψ для данного материала.

Для материалов, имеющих $\psi_k < 0,6$, в формулу (3) вместо ψ подставляется ψ_k [3], тогда

$$\sigma_{cp}^{max} = \frac{S_k}{2 - 0,95\psi_k} \cdot \left(1,03 - \frac{0,9\psi_k}{1,9 - \psi_k} \right), \quad (4)$$

при этом путь пуансона h_k от момента встречи с заготовкой до достижения σ_{cp}^{max}

$$h_k = \left(\frac{0,9\psi_k}{1,9 - \psi_k} \right) h_M.$$

Для материалов с $\psi_k \geq 0,6$

$$\sigma_{cp}^{max} = \frac{S_k}{2 - 0,95\psi_k} \cdot \frac{0,38}{\psi_k}, \quad (5)$$

$$h_k = 0,4h_M.$$

Для упрощения математической модели график $P_D(S \pm x_i)$ линеаризуется.

Уравнение прямой, проходящей через начало координат:

$$y = kx.$$

При срабатывании предохранителя ордината y принимает значение P_H , абсцисса $x = h_k$.

Подставляя формулы (4) и (5), а также значения h_k в (2) для материалов с $\psi_k < 0,6$ и $\psi_k \geq 0,6$, определяем значения коэффициента k :

для материалов с $\psi_k < 0,6$

$$k = \frac{k_1 L S_k}{\psi_k} \cdot \frac{(1,957 - 1,93\psi_k)}{(1,8 - 0,855\psi_k)},$$

для материалов с $\psi_k \geq 0,6$

$$k = \frac{k_1 L S_k}{\psi_k} \cdot \frac{0,95}{2 - 0,95\psi_k}.$$

Тогда максимальная сила деформации, равная номинальной силе пресса P_H :

для материалов с $\psi_k < 0,6$

$$P_H = P_D^{max} = \frac{k_1 L S_k}{\psi_k} \cdot \frac{(1,957 - 1,93\psi_k)}{(1,8 - 0,855\psi_k)} \cdot h_k;$$

для материалов с $\psi_k \geq 0,6$

$$P_H = P_D^{max} = \frac{k_1 L S_k}{\psi_k} \cdot \frac{0,95}{2 - 0,95\psi_k} \cdot h_k.$$

В зависимости от выбранного материала, периметра вырубаемого изделия коэффициент k при x будет принимать определенные числовые значения. Задаваясь номинальной силой P_H или путем пуансона h_k от момента встречи с заготовкой до достижения на нем максимальной силы, можно построить линеаризованный график сопротивления деформации $P_D(S \pm x_i)$ по двум точкам $(0; 0)$ и $(h_k; P_H)$.

Условием начала второй фазы является достижение силой сопротивления деформации заготовки P_D своего максимального значения, равного номинальной силе прессы: $P_D = P_H$.

Начальные условия, необходимые для интегрирования дифференциальных уравнений во второй фазе нагружения, определяются соответствующими значениями величин, вычисленных в конце первой фазы.

Математическая модель, описывающая процессы фазы срабатывания предохранителя, состоит из уравнений системы (1) в совокупности с уравнением движения втулки массой m_4 и первой производной её пути по времени:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \frac{dv_1}{dt} &= G_1 - R_1 - P_H + p(F_1 + F_2), \\ m_2 \frac{dv_2}{dt} &= G_2 + c_2 x_2 - \mu_2 v_2 - c_1(S - x_3 + x_2), \\ m_3 \left(\frac{dv}{dt} + \frac{dv_3}{dt} \right) &= G_3 - R_2 - pF_1 + c_1(S - x_3 + x_2), \\ m_4 \frac{dv_4}{dt} &= G_4 - R_3 - P_3 - pF_2, \\ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= c_{xp}(\alpha_1 - \alpha_2) - m_k c_1(S - x_3 + x_2), \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= -c_{xp}(\alpha_1 - \alpha_2), \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{1}{\varphi} [F_1(v + v_1 - v_3) - F_2 v_4], \\ \frac{dS}{dt} = v, \quad \frac{dx_1}{dt} = v_1, \quad \frac{dx_2}{dt} = v_2, \quad \frac{dx_3}{dt} = v_3, \quad \frac{dx_4}{dt} = v_4, \quad \frac{d\alpha_1}{dt} = \omega_1, \quad \frac{d\alpha_2}{dt} = \omega_2, \end{aligned} \right\} (6)$$

где x_4, v_4 – перемещение и скорость втулки массой m_4 ;

R_3 – сила трения в уплотнениях втулки;

P_3 – сила сопротивления шарикового замка. Определяется из условия равновесия горизонтальных составляющих сил, приложенных к шарiku (рис. 2):

$$P_{np} + N \cdot f \cdot \sin \beta = N \cdot \cos \beta,$$

откуда

$$N = \frac{P_{np}}{\cos \beta - f \cdot \sin \beta}.$$

Тогда

$$P_3 = N \cdot \sin \beta = P_{np} \frac{\sin \beta}{\cos \beta - f \cdot \sin \beta},$$

где f – коэффициент трения скольжения шарика по поверхности шпильки;

β – угол наклона поверхности проточки шпильки;

$P_{np} = c(\lambda_1 + \lambda_2)$ – сила сопротивления сжатию тарельчатых пружин;

c – коэффициент жесткости пакета тарельчатых пружин;

λ_1 – предварительное сжатие тарельчатых пружин, обеспечивающее запираение шарикового замка до достижения на подпятнике номинальной силы;

$\lambda_2 = x_4 \cdot \operatorname{tg} \beta$ – величина сжатия пружин при срабатывании предохранительного устройства.

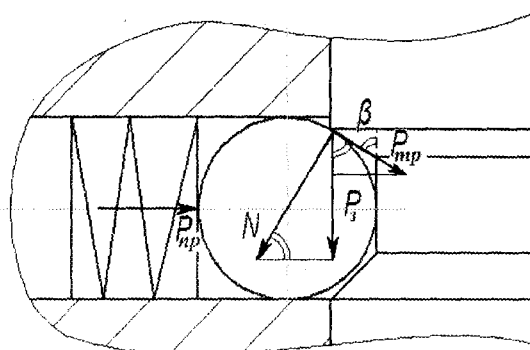


Рисунок 2 – Схема к определению силы сопротивления шарикового замка P_r ,
 N – сила нормального давления шарика; $P_{тр} = f \cdot N$ – сила трения

Предложенная математическая модель позволит исследовать процессы в кривошипном прессе с малогабаритным гидравлическим предохранителем, влияние параметров предохранительного устройства на коэффициент перегрузки и определить оптимальные параметры предохранителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ланской, Е.Н. Элементы расчета деталей и узлов кривошипных прессов / Е.Н. Ланской, А.Н. Банкетов. – М.: Машиностроение, 1966. – С. 89-92.
2. Пат. №2304514 Российская Федерация, В30В 15/28. Устройство для предохранения пресса от перегрузок / Петров Н.В., Леонова Н.В., Катков Н.П.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет - № 2006109784; заявл. 27.03.2006; опубл. 20.08.2007, Бюл. № 17.
3. Чудаков, П.Д. Расчет усилия, работы и построение графиков рабочих усилий при резке листового металла в штампах. ЭНИИКМАШ. Кн. 1 / П.Д. Чудаков – М.: Машгиз. – 1959. – С. 104-120.

Чернова Олеся Николаевна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Инженер
 г. Орел, 302020, Наугорское шоссе, 29
 Тел. +7 (4862) 43-20-96
 E-mail: olesya6288@mail.ru

Злобин Сергей Николаевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 Тел. +7 (4862) 43-20-96
 E-mail: zsn2@rambler.ru

Петров Николай Владимирович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел
 Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автопласт»
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 Тел.: +7 (4862) 41-68-77

O.N. CHERNOVA, S.N. ZLOBIN, N.V. PETROV

MATHEMATICAL WORKING MODEL OF COMPACT HYDRAULIC CRANK PRESS SAFETY DEVICE

Developed mathematical model of processes in the crank press with the compact hydraulic safety device allows to research the influence of the safety device basic features on the capacity factor and to determine the optimal features of the safety device.

Keywords: *crank press, safety device, mathematical model.*

BIBLIOGRAPHY

1. Lanskoj, E.N. Jelementy rascheta detalej i uzlov krivoshipnyh pressov / E.N. Lanskoj, A.N. Banke-tov. – M.: Mashinostroenie, 1966. – S. 89-92.

2. Pat. №2304514 Rossijskaja Federacija, V30V 15/28. Ustrojstvo dlja predohranenija pressa ot pere-gruzok / Petrov N.V., Leonova N.V., Katkov N.P.; zajavitel' i patentoobladatel' Orlovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet - № 2006109784; zajavl. 27.03.2006; opubl. 20.08.2007, Bjul. № 17.

3. Chudakov, P.D. Raschet usilija, raboty i postroenie grafikov rabočih usilij pri rezke listovogo metalla v shtampah. JeNIKMASH. Kn. 1 / P.D. Chudakov – M.: Mashgiz. – 1959. – S. 104-120.

Chernova Olesya Nikolaevna

State University - Education-Science-Production Complex, Orel

Engineer

Orel, 302020, Naugorskoe shosse 29

Tel.: +7 (4862) 43-20-96

E-mail: olesya6288@mail.ru

Zlobin Sergey Nikolaevich

State University - Education-Science-Production Complex, Orel

Candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department «Avtoplast»

Orel, 302020, Naugorskoe shosse 29

Tel.: +7 (4862) 43-20-96

E-mail: zsn2@rambler.ru

Petrov Nikolai Vladimirovich

State University - Education-Science-Production Complex, Orel

Candidate of technical Sciences, Professor of the Department «Avtoplast»

Orel, 302020, Naugorskoe shosse 29

Tel.: +7 (4862) 41-68-77

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.91

Е.С. МОЛЧАНОВА, Н.А. БЫЧКОВ, С.И. ЧЕРНЯЕВ

СРАВНЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО, ГИДРОАБРАЗИВНОГО И ЛАЗЕРНОГО СПОСОБОВ РЕЗКИ, И ПРОШИВКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статье сделана попытка сравнения особенностей плазменного, гидроабразивного и лазерного способов резки и прошивки конструкционных материалов, применяемых в радиоэлектронике. Принципы действия у каждого способа свои, однако, они имеют общую область применения и, поэтому, являются конкурирующими. В работе исследованы основные преимущества и недостатки этих способов.

Ключевые слова: радиоэлектроника, конструкционные материалы, способы обработки, плазменная резка, гидроабразивная резка, лазерная резка.

Создание конкурентоспособной продукции невозможно без применения инноваций в машиностроении, применения современных технологических процессов [1, 2]

Бурное развитие радиоэлектроники в современных условиях предъявляет все более жесткие требования к технологиям обработки конструкционных материалов. Одним из направлений обработки конструкционных материалов является их резка и раскрой. Существующие традиционные процессы разделения материалов, основанные на механическом, электрохимическом, электрофизическом и физико-механическом воздействиях, имеют ряд недостатков – относительно низкую производительность, малую стойкость инструмента, невозможность раскроя конструкционных материалов по сложному криволинейному контуру. Поэтому, поиск новых перспективных технологий обработки этих материалов, не прекращается.

Наиболее перспективными, в настоящее время, являются плазменный, гидроабразивный и лазерный способы резки конструкционных материалов. Эти способы имеют общую область применения и потому являются конкурирующими технологиями. Принципы резки конструкционных материалов у каждого способа свои, хотя имеются и общие стороны. Плазменные и лазерные способы «роднит» то, что разделение материалов посредством их осуществляется за счет теплового воздействия на обрабатываемый материал. А, вот гидроабразивный способ резки отличается от ранее названных, как раз, отсутствием нагрева обрабатываемых заготовок. Он основывается на эрозионном воздействии на обрабатываемый материал смеси высокоскоростной водяной струи (выступающей в качестве носителя) и твердых абразивных частиц [3, 4]. На рисунке 1 представлены схемы активных элементов установок резки конструкционных материалов [5].

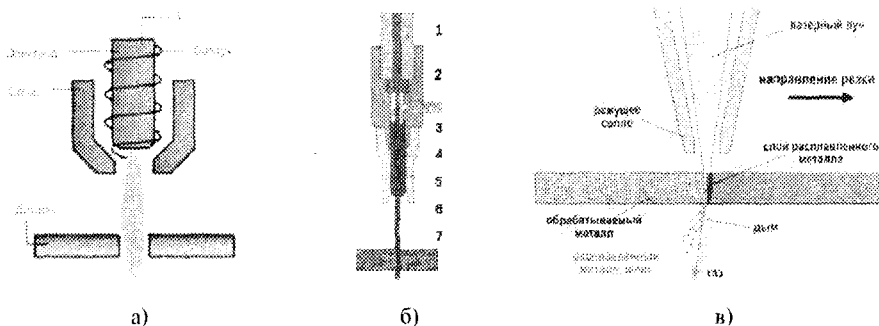


Рисунок 1 – Схемы установок резки конструкционных материалов [15, 22, 26]

а) – плазменной, б) – гидроабразивной и в) – лазерной: 1 – подвод воды под высоким давлением; 2 – сопло; 3 – подача абразива; 4 – смеситель; 5 – кожух; 6 – режущая струя; 7 – разрезаемый материал

Технология плазменной резки (см. рис. 1, а) основана на использовании воздушно-плазменной дуги постоянного тока прямого действия. Сущность процесса плазменной резки заключается в локальном расплавлении и выдувании расплавленного материала из полости реза. Между электродом и соплом аппарата, или между электродом и разрезаемым материалом зажигается электрическая дуга. В сопло подаётся газ под давлением в несколько атмосфер, превращаемый электрической дугой в струю плазмы с температурой от 5000 °С до 30000 °С и скоростью от 500 до 1500 м/с. Первоначальное разжигание дуги осуществляется высокочастотным импульсом или коротким замыканием между форсункой и разрезаемым металлом. Форсунки охлаждаются потоком газа (воздушное охлаждение) или жидкости (водяное охлаждение). Воздушные форсунки, как правило, надежнее, форсунки с жидкостным охлаждением используются в установках большой мощности и дают лучшее качество обработки. Толщина разрезаемого металла может достигать до 100 мм [5].

Физическая суть механизма гидроабразивной резки состоит в отрыве и уносе из полости реза частиц материала скоростным потоком твердофазных частиц. Устойчивость истечения и эффективность воздействия двухфазной струи (вода и абразив) обеспечиваются оптимальным выбором целого ряда параметров резки, включая давление и расход воды, а также расход и размер частиц абразивного материала [6, 7].

Лазерная резка (см. рисунок 1, в) может быть основана на различных процессах: испарении материала, плавлении с удалением расплава из зоны реза, химических реакциях (горении, разложении с выделением летучих соединений и др.). Получение глубокого реза испарением сопряжено с образованием достаточно большого количества жидкой фазы и ее неполным удалением из зоны воздействия излучения давлением паров. В этом случае с целью исключения заплывания сквозного реза применяют устройства отсоса продуктов разрушения из зоны резания или поддув активного газа, обычно кислорода, в зону резания (газоплазменная резка) [8].

Кратко рассмотрим положительные и отрицательные стороны, приведенных выше способов резки конструкционных материалов, применяемых в радиоэлектронике.

Одной из главных характеристик плазменной резки является максимальная толщина разрезаемого материала (в технической документации приводится для углеродистых сталей). На толщину разрезаемого материала существенно влияет его теплопроводность. Поэтому, например, для меди, максимальная толщина разрезаемого металла снижается примерно на 30 % по сравнению с указанными «рабочими» толщинами [9]. Плазменная резка имеет еще одну важную характеристику - скорость резания, которая оказывает существенное влияние на ее качество. При пониженной скорости плазмообразующий газ расходуется нерационально, что приводит к образованию шлака на нижней стороне обрабатываемого материала. При повышенной скорости плазменной резки дуга осциллирует, из-за чего линия реза получается волнистой. При этом также образуется шлак, отделение которого затруднено [3, 10]. К достоинствам плазменной резки можно отнести то, что: обрабатываются любые металлы - черные, цветные, тугоплавкие сплавы и т. д.; скорость резания малых и средних толщин материалов в несколько раз выше скорости газоплазменной резки; небольшой и локальный нагрев разрезаемой заготовки, исключаящий ее тепловую деформацию; высокая чистота и качество поверхности разреза; безопасность процесса (нет необходимости в баллонах со сжатым кислородом, горючим газом и т. д.); возможна сложная фигурная вырезка; относительно низкая стоимость оборудования; относительно высокая скорость разделительной резки малых и средних толщин материалов при увеличенных допусках; возможность автоматизации процесса резки [3, 11-13]. Недостатками плазменной резки являются: ограничение перечня подвергающихся резке материалов токопроводящими материалами; низкая точность реза криволинейных поверхностей; обгорание и оплавление кромок; появление напряжения и микротрещин, а также структурных изменений в обрабатываемых материалах; необходимость дополнительной механической обработки; высокая стоимость эксплуатации установок при резке материалов толщиной свыше 25 мм и легированных сталей; неблагоприятное воздействие на окружающую среду вследствие выделения вредных газов и испарений в процессе резки;

необходимость дополнительных затрат на приобретение мощной вытяжной вентиляции; нельзя чтобы продукты горения попадали в сопло плазматрона, т.е. необходимо соблюдать определенный угол реза; пожаро- взрывоопасность процесса [3, 11, 14, 15].

В настоящее время гидроабразивные способы приходят на смену многим другим способам раскроя материалов благодаря своим уникальным качествам. Гидрорезка оказалась востребованной в различных отраслях промышленности [16], в том числе и радиоэлектронной промышленности. В радиоэлектронике гидроабразивная обработка является альтернативным способом механической, лазерной, ультразвуковой и плазменной резке. А в некоторых случаях это способ обработки материалов может быть единственно возможным. Объясняется это тем, что струя носителя и абразива не изменяет физико-механические свойства материала и исключает деформацию, оплавление и пригорание материала [17]. Установки гидроабразивной резки справляются с резами любой формы, скошенными кромками, минимальными внутренними радиусами и острыми углами, позволяют начинать обработку в любой точке поверхности заготовки. Они позволяют получать детали со сложными профилями без дополнительной обработки поверхности [3, 13]. К достоинствам гидроабразивной резки относят также следующие качества: способ может быть применён абсолютно к любым материалам; отсутствие термического воздействия на материал (холодное резание - температура в зоне реза 60 – 90 °С - генерируемое в процессе резания тепло практически мгновенно уносится водой, а, следовательно, в результате не происходит заметного повышения температуры в заготовке [18]. Ни одна технология, кроме гидроабразивной резки: не может обеспечить отсутствие термического влияния на металл вблизи пропила; при гидроабразивной обработке конструкционных материалов можно воспроизводить очень сложные формы или скосы под любым углом (струя жидкости по своим техническим возможностям приближается к идеальному точечному инструменту, что позволяет обрабатывать сложный профиль с любым радиусом закругления 0,1-3,0 мм, даже при резании стекла; рациональный расход материалов (малые потери материала); широкий спектр разрезаемых толщин (до 150-230 мм и более); высокое качество реза (можно получать финишную поверхность с шероховатостью Ra 0,5-1,5 мкм, т.е. во многих случаях отпадает необходимость в дополнительной обработке); высокая эффективность резки листовых материалов толщиной более 8 мм; небольшая, порядка 1 мм, ширина реза (уменьшение отходов и улучшение экономичности раскроя); отсутствие выгорания легирующих элементов в легированных сталях и сплавах; отсутствие оплавления и пригорания материала на кромках обработанных деталей и в прилегающей зоне; возможность реза тонколистовых материалов в пакете из нескольких слоев для повышения производительности, в том числе, за счёт уменьшения холостых ходов режущей головки; инструмент резки (струя воды или вода + абразив) не нуждается в переточке; низкое тангенциальное усилие резания на деталь (в общем случае даже не требуется зажима разрезаемого материала). Небольшие сила (1-100 Н) в зоне резания исключают деформацию заготовки, оплавление и пригорание материала в прилегающей зоне; высокая скорость резания; возможность резки сложных контуров по фасонным поверхностям; полная пожаро- и взрывобезопасность процесса поскольку нет тепла, накапливаемого при абразивно-жидкостной струйной обработке; экологическая чистота - отсутствие пыли (поток струи воды уносит пыль с собой) и вредных газов, отсутствие радиационного излучения, а также опасности вылета шлаковых или мелкодисперсных частиц; уровень шума колеблется в пределах 85-95 дБ; быстрое реагирование на нужды производства; высокая технологичность (инструмент резки (струя воды или вода плюс абразив) не нуждается в переточке; ударная нагрузка на изделие минимальна, отсутствует обратная реакция на режущий инструмент. (различные операции, например, сверление и резку, можно выполнять одним и тем же инструментом, так как между изделием и инструментом нет непосредственного контакта; резку можно осуществлять на высоте и глубине до нескольких сотен метров, в том числе и под водой, а также возможность резки от одного насоса высокого давления одновременно двумя и более режущими головками на одном столе или несколькими головками на разных столах; существует возможность установки на одном столе и гидроабразивной и лазерной резки; заметная экономичность

процесса; резку можно осуществлять с самыми разными скоростями - от 1 мм/мин до 30000 мм/мин., в зависимости от типа и толщины разрезаемого материала; рез можно начинать в любой точке заготовки и при этом не нужно предварительно делать отверстие; малая ширина реза позволяет экономить дефицитные материалы при их раскросе; среднее потребление воды в абразивно-жидкостном режущем устройстве невелико - около 3-4 л/мин, несмотря на высокие давления использования (400 МПа и более); возможность фасонной резки достаточно толстых материалов (сталь - до 300 мм, бетон, в т.ч. с арматурой - более 1000 мм); универсальность установки, позволяющая резать на одной установке самые разнообразные материалы, а также заготовки, состоящие из различных материалов (например: резина + железо + пластик) [6, 11, 17-19, 20-22]. Для некоторых материалов технологии плазменной или лазерной резки оказываются неприменимыми. Рассмотрим несколько таких ситуаций: для листового металла, ламинированного пластиком, только гидроабразивная резка позволяет избежать негативного влияния обработки на внешнюю поверхность покрытия; медь не может быть разрезана лазером по причине явлений отражения; при работе со стеклом лазерный луч проходит материал насквозь, не разрушая его. Кроме того, некоторые материалы, прежде всего большой толщины, позволяют осуществлять эффективную резку только с использованием гидроабразивной технологии. Гидроабразивная резка имеет еще одно преимущество - тонкая струя создает существенно меньшие потери материала по сравнению с другими технологиями. Стоит отметить также, что, в отличие от лазерной резки, гидроабразивная - непривередлива, может резать металл практически любого качества, в том числе, подвергшийся воздействию коррозии. В электронной промышленности, при резании электронных плат для цепей, применение водоструйной резки позволило достичь размера пропила до 0,1 мм и снизило проблему расслоения материала [23]. К недостаткам гидроабразивной резки можно отнести: недостаточно высокую скорость реза тонколистовой стали; ограниченность ресурса некоторых комплектующих и режущей головки; одноразовое использование абразивного материала [3, 11, 22].

Лазерная резка является одним из высокотехнологичных методов раскроса различных листовых материалов. Она является одним из перспективных методов обработки и имеет целый ряд преимуществ: возможность обрабатывать практически любой материал независимо от его теплофизических свойств; повышение качества обработки за счет минимальных зон термического влияния, снижения тепловых деформаций, отсутствия силового воздействия инструмента на деталь; возможность резки легкодеформируемых и нежестких деталей; возможность позиционирования лазерной головки до 0,08 мм позволяет достигать высокой точности взаимного расположения элементов заготовки; повышение скорости обработки, в сравнении с традиционными методами в несколько раз; обеспечение высокой производительности процесса за счет большой мощности излучения; возможность выполнения острых углов, переходов без радиусов, тонких перемычек (толщиной менее 1-2 мм), отверстий малого диаметра, что не позволяет осуществить высечку круглым универсальным инструментом; возможность раскроса практически любого листового материала по сложному контуру; повышение коэффициента использования материала за счет внедрения системы оптимального раскроса; снижение времени на подготовку производства при освоении новой продукции в несколько раз; резка отличается особенно малым допуском реза; качество реза конструкционных сталей позволяет во многих случаях производить сварку встык без предварительной механической обработки; отсутствие смещения кромок реза [3]. Для резки металлов на отечественных предприятиях и за рубежом наибольшее распространение получили технологические установки на основе твердотельных и газовых CO₂-лазеров, работающих как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме излучения. Лазерная резка позволяет производить раскрой тонколистового материала со скоростью до 25 м/мин с точностью до 10 мкм. Сравнительно простое управление лазерным лучом позволяет осуществлять резку по сложному контуру не только плоских, но и объемных заготовок с высокой степенью автоматизации процесса. Использование роботов-манипуляторов со оптоволоконными лазерными системами позволит отказаться от проектирования и изготовления специализированной тех-

нологической оснастки при резке объемных заготовок. В условиях снижения серийности производства и быстрого изменения требований к изделию, т.е. когда возникает реальная потребность ориентации на гибкие автоматизированные производства, преимущества лазерной резки становятся неоспоримыми. Таким образом, лазерная резка позволяет снизить затраты на подготовку производства, снизить себестоимость изделия, а также повысить гибкость заготовительного производства. Лазерная резка является одной из самых перспективных и конкурентоспособных технологических операций. Основные направления совершенствования лазерной резки заключаются в увеличении толщины разрезаемого материала и скорости его резания [3, 8, 11, 24]. Лазерное излучение может эффективно использоваться для раскроя неметаллических материалов: оргстекла толщиной до 50 мм, фторопласта - до 30 мм, стекло-текстолита, гетинакса, полиэтилена, поливинилхлорида - до 2 мм, асбоцемента, базальтовых тканей, картона, керамики, ситалла. Разработаны экономичные методы резки и термораскалывания стекла, в том числе и по сложному контуру. Применение лазерного излучения при механической обработке металлов позволяет поднять производительность в несколько раз, улучшить качество их обработки [27]. Применение импульсно-периодических режимов обработки позволяет осуществлять процесс высокоскоростной прошивки листовых материалов. Производительность обработки достигает 50 отверстий в секунду на стали толщиной до 0,5 мм. Лазерная прошивка позволяет получить отверстие диаметром 0,2–1,2 мм при толщине материала до 3 мм. При соотношении высоты к диаметру отверстий 16:1 она превосходит по экономичности почти все другие методы. Качество получаемых отверстий позволяет нарезать в них резьбу. Такая технология позволяет получать отверстия в часовых камнях и в волоочильных фильерах. Производительность прошивки листов холоднотянутой стали толщиной 2 мм достигает 3–4 отверстий в секунду. Получение одного отверстия в более толстых листах (до 19 мм) из горячекатаной стали - примерно 2 с [3, 25-28]. К недостаткам лазерной резки относят: высокую стоимость оборудования; термическое воздействие на материал в зоне реза со всеми вытекающими неблагоприятными последствиями; ограничение перечня и диапазона толщин подвергающихся резке материалов; невозможность резки светоотражающих или светопропускающих материалов; относительно высокий расход энергии; возможное выделение (хоть и незначительное) вредных газов и испарений в процессе резки; относительно высокая стоимость обслуживания и ремонта [17]. Однако, применение волоконных лазеров позволяет избежать дорогостоящего сервиса и регулярной юстировки из-за отсутствия сложной системы зеркал. Волоконные лазеры потребляют меньше электроэнергии из-за высокого КПД – 25% и выше, имеют малую расходимость выходного пучка и достаточно высокий коэффициент поглощения излучения металлами. Таким образом, можно предположить, что решающими для промышленного применения являются не только экономические причины, но и технологические преимущества лазерных технологий перед аналогами [13]. Среди основных факторов, определяющих производительность и качественные показатели процесса резки, наиболее существенными являются мощность и плотность мощности лазерного излучения, благодаря которой обеспечивается высокая производительность в сочетании с высоким качеством поверхностей реза. Сравнительно простое управление лазерным лучом позволяет осуществить лазерную резку по сложному контуру плоских, а также объемных деталей и заготовок с высокой степенью автоматизации процесса. При этом возможно получение отверстий малого диаметра в сверхтвердых материалах и др. [29].

Таким образом, для применения в производстве того или иного способа, необходимо учитывать механизмы действия каждого из них, так как эти механизмы значительно различаются между собой и подходят лишь для определенных материалов и определенных толщин заготовок. Качественные характеристики резки определяются требованиями по достигаемой точности, по углу кромки реза и влиянию, оказываемому на обрабатываемый материал в зоне воздействия. По этим требованиям, вероятно, лазерный способ резки конструктивных материалов в радиоэлектронной промышленности наиболее приемлем и перспективен в качестве универсального.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, Е.Ю. Высокие технологии в инновационной экономике /Е.Ю. Степанова, Л.И. Поладова //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2007. - № 3. – С. 156-167.
2. Степанова, Е.Ю. Маркетинг инноваций: проблемы и решения /Е.Ю. Степанова, Ю.С. Степанов //Экономические и гуманитарные науки. – 2011. - № 11. – С. 24-31.
3. Бычков, Н.А. Лазерная резка – перспективный способ обработки конструкционных материалов в радиоэлектронике и приборостроении /Н.А. Бычков, Е.С. Молчанова / Современные вопросы науки – XXI век: сб. науч. тр. по мат-лам МНПК. Часть 2; М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2011. - С. 15-22.
4. Степанов, Ю.С. Современные технологические процессы механического и гидроабразивного раскроя технических тканей /Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков. Библиотека технолога. – М. : Машиностроение, 2004. – 240 с.
5. Газо-плазменная резка металла [Электронный ресурс] /Сайт компании ООО «Термокапитал». URL: <http://termokapital.ru/additional/gas-flame-cutting-of-metal>. (дата обращения: 04.04.2013).
6. Гидроабразивная резка. [Электронный ресурс]. / Сайт компании «TechnoInvest-Sb». - URL: <http://ti.uz/production/gidroabrazivnaya-rezka>. (дата обращения: 19.04.2013).
7. Степанов, Ю.С. Формирование качества поверхностного слоя деталей при резании сверхзвуковой струей жидкости /Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков //СТИИ. – 2003. - № 10. – С. 15-17.
8. Вейко, В. П. Сборник задач по лазерным технологиям /В.П. Вейко, Е.А. Шахно.- СПб: СПбГУ «ИТМО», 2007. – 67 с.
9. Плазменная резка. [Электронный ресурс] / Сайт компании MG Group. - URL: <http://h2orez.ru>. (дата обращения: 11.04.2013).
10. Овчинников, В. В. Технология ручной дуговой и плазменной сварки и резки металлов / В. В. Овчинников. - М. : Издательский центр «Академия», 2012. - 240 с.
11. Сравнение технологий плазменной, лазерной и гидроабразивной резки. [Электронный ресурс]. / Сайт компании «Virtex-Group». – URL: http://virtex-group.com/Tehnologia_rezki_metalla. (дата обращения: 20.03.2013).
12. Чернышов, Г. Г. Сварочное дело : Сварка и резка металлов / Г.Г.Чернышов. - М. : Издательский центр «Академия», 2013. - 496 с.
13. Щепелин, В. Разделительная резка материалов //ТехСовет.- № 1 (22) 2005. URL: <http://www.techsovet.ru/article-2005-1-5-665> (дата обращения: 20.04.2013).
14. Плазменная резка. [Электронный ресурс] / Сайт компании «Дальтехлазер». - URL: <http://www.lazerdv.ru/index.php?action=add&id=3232&add&rod=2977>. (дата обращения: 28.03.2013).
15. Разрезая огнем. Портал «Обработка металла». [Электронный ресурс]. / Спецресурс Промышленной группы «ОСТ». - URL: <http://ostmetal.info/razrezaya-ognem>. (дата обращения: 15.04.2013).
16. Степанов, Ю.С. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок /Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Аллошин //Научные технологии в машиностроении. – 2012. - № 6. – С. 11-17.
17. Гидроабразивная художественная резка листовых материалов. Сравнение технологий. [Электронный ресурс]. / Сайт компании «Lusso». - URL: <http://gidrorezka.com.ua/tehnologiya/sravnenie-tehnologii.html>. (дата обращения: 19.04.2013).
18. Уланский, Р.А. Гидроабразивная резка /Р.А. Уланский. [Электронный ресурс]. / Статья в Энциклопедическом Фонде «Russika.Ru». URL: <http://www.steelmetall.ru>. (дата обращения: 19.04.2013).
19. Гидроабразивная резка. [Электронный ресурс]. - URL: <http://dic.academic.ru/> (дата обращения: 18.01.2013).
20. Гидроабразивная резка материалов [Электронный ресурс]. / Сайт компании MG Group URL: <http://h2orez.ru>. (дата обращения: 17.04.2013).
21. Резать водой. [Электронный ресурс]. // Журнал «Оборудование: рынок, предложение, цена», № 8, август 2003 г. - URL: <http://stanko-lid.ru/article/rezat-vodouy.html>. (дата обращения: 07.04.2013).
22. Технология гидроабразивной резки. [Электронный ресурс]. / Сайт компании «СтелМеталл». - URL: <http://www.steelmetall.ru>. (дата обращения: 18.01.2013).
23. У гидроабразивной резки большое будущее. [Электронный ресурс]. // Промышленный журнал «Знак Качества». - №2. – 2009. - URL: http://www.znk.by/archiv/02_09/9.html. (дата обращения: 20.04.2013).
24. Тарасов, Л. В. Четырнадцать лекция о лазерах /Л.В. Тарасов. - М.: Книжный дом «Либроком», 2011. – 176 с.
25. Киселев, Г. Л. Квантовая и оптическая электроника/Г.Л. Киселев. - СПб.: Изд. «Лань», 2011. - 320 с.
27. Лазерная резка [Электронный ресурс]. / Информационный сайт «О сварке». - URL: <http://www.osvarke.com/lazernaya-rezka.html>. (дата обращения: 04.03.2013).
28. Технологические процессы лазерной резки. [Электронный ресурс]. / Сайт компании «Лазерные машины». - URL: <http://lasermachine.ru/tech/68>. (дата обращения: 05.04.2013).
29. Прогрессивная лазерная резка металлов / Л. Фомченкова. [Электронный ресурс] // "Петербургский строительный рынок" 10 (94). - URL: <http://stroy-press.ru/?id=7189>. (дата обращения: 02.04.2013).
30. Соловьев В. Отечественный рынок лазерных технологий /В. Соловьев. [Электронный ресурс]. / Сайт компании «Лазерные технологии». – URL: <http://www.lastech.mv74.ru/page.php?41>. (дата обращения: 04.04.2013).

Молчанова Елена Сергеевна

Калужский филиал ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»
Соискатель кафедры «Промышленная экология и химия»
248 600, г. Калуга, ул. Баженова, 2
Тел.: 8 (4842) 77-45-05
E-mail: alena.molchanova@gmail.com

Бычков Николай Александрович

Калужский филиал ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»
К.т.н, доцент кафедры «Промышленная экология и химия»
248 600, г. Калуга, ул. Баженова, 2
Тел.: 8 (4842) 77-45-05
E-mail: abhima@list.ru

Черняев Сергей Иванович

Калужский филиал ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»
Д.т.н, профессор кафедры «Промышленная экология и химия»
248 600, г. Калуга, ул. Баженова, 2
Тел.: 8 (4842) 77-45-05
E-mail: pacer@russia.ru

E.S. MOLCHANOVA, N.A. BYCHKOV, S.I. CHERNYAEV

COMPARISON OF PLASMA, WATER JET AND LASER CUTTING METHODS, AND PUNCHING OF STRUCTURAL MATERIALS IN THE ELECTRONICS INDUSTRY

The article is an attempt to compare the main features of plasma, laser and water jet cutting methods and punching of structural materials used in electronics. Each of the above methods has its own operational fundamentals. but since they have a common field of application, those methods are indeed competitors. This research paper describes major advantages and disadvantages of these methods.

Keywords: electronics, structural materials, processing methods, plasma cutting, water jet cutting, laser cutting.

BIBLIOGRAPHY

1. Stepanova, E.Ju. Vysokie tehnologii v innovacionnoj jekonomike /E.Ju. Stepanova, L.I. Polandova //Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2007. - № 3. – S. 156-167.
2. Stepanova, E.Ju. Marketing innovacij: problemy i reshenija /E.Ju. Stepanova, Ju.S. Stepanov //Jekonomicheskie i gumanitarnye nauki. – 2011. - № 11. – S. 24-31.
3. Bychkov, N.A. Lazernaja rezka – perspektivnyj sposob obrabotki konstrukcionnyh materialov v radiojelektronike i priborostroenii /N.A. Bychkov, E.S. Molchanova / Sovremennye voprosy nauki – XXI vek: sb. nauch. tr. po mat-lam MNPk. Chast' 2; M-vo obr. i nauki RF. Tambov: Izd-vo TROO «Biznes-Nauka-Obshhestvo», 2011. - S. 15-22.
4. Stepanov, Ju.S. Sovremennye tehnologicheskie processy mehanicheskogo i gidrostrujnogo raskroja tehniceskikh tkanej /Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov. Biblioteka tehnologa. – M. : Mashinostroenie, 2004. – 240 s.
5. Gazo-plazmennaja rezka metalla [Jelektronnyj resurs] /Sajt kompanii OOO «Termokapital». URL: <http://termokapital.ru/additional/gas-flame-cutting-of-metal>. (data obrashhenija: 04.04.2013).
6. Gidroabrazivnaja rezka. [Jelektronnyj resurs]. / Sajt kompanii «Tehnoinvest-Sb». - URL: <http://ti.uz/production/gidroabrazivnaya-rezka>. (data obrashhenija: 19.04.2013).
7. Stepanov, Ju.S. Formirovanie kachestva poverhnostnogo sloja detalej pri rezanii sverzhzvukovoj struej zhidkosti /Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov //STIN. – 2003. - № 10. – S. 15-17.
8. Vejko, V. P. Sbornik zadach po lazernym tehnologijam /V.P. Vejko, E.A. Shahno.- SPb: SPbGU «ITMO», 2007. – 67 s.
9. Plazmennaja rezka. [Jelektronnyj resurs] / Sajt kompanii MG Group. - URL: <http://h2orez.ru>. (data obrashhenija: 11.04.2013).
10. Ovchinnikov, V. V. Tehnologija ruchnoj dugovoj i plazmennoj svarki i rezki metallov/ V. V. Ovchinnikov. - M. : Izdatel'skij centr «Akademija», 2012. - 240 s.

11. Sravnenie tehnologij plazmennoj, lazernoj i gidroabrazivnoj rezki. [Jelektronnyj resurs]. / Sajt kompanii «Virtex-Group». – URL: http://virtex-group.com/Tehnologia_rezki_metalla. (data obrashhenija: 20.03.2013).
12. Chernyshov, G. G. Svarochnoe delo : Svarka i rezka metallov/ G.G.Chernyshov. - M. : Izdatel'skij centr «Akademija», 2013. - 496 s.
13. Shhepelin, V. Razdelitel'naja rezka materialov //TehSovet.- № 1 (22) 2005. URL: <http://www.tehsovet.ru/article-2005-1-5-665> (data obrashhenija: 20.04.2013).
14. Plazmennaja rezka. [Jelektronnyj resurs] / Sajt kompanii «Dal'tehlazer». - URL: <http://www.lazerdv.ru/index.php?action=add&id=3232&add&rod=2977>. (data obrashhenija: 28.03.2013).
15. Razrezaja ognem. Portal «Obrabotka metalla». [Jelektronnyj resurs]. / Specresurs Promyshlennoj grupy «OST». - URL: <http://ostmetal.info/razrezaya-ognem>. (data obrashhenija: 15.04.2013).
16. Stepanov, Ju.S. Sovremennye tehnologii gidro- i gidroabrazivnoj obrabotki zagotovok /Ju.S. Ste-panov, G.V. Barsukov, E.G. Aljushin //Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii. – 2012. - № 6. – S. 11-17.
17. Gidroabrazivnaja hudozhestvennaja rezka listovyh materialov. Sravnenie tehnologij. [Jelektronnyj resurs]. / Sajt kompanii «Lusso». - URL: <http://gidrorezka.com.ua/tehnologiya/sravnenie-tehnologii.html>. (data obrashhenija: 19.04.2013).
18. Ulanskij, R.A. Gidroabrazivnaja rezka /R.A. Ulanskij. [Jelektronnyj resurs]. / Stat'ja v Jenciklopedicheskom Fonde «Russika.Ru». URL: <http://www.steelmetall.ru>. (data obrashhenija: 19.04.2013).
19. Gidroabrazivnaja rezka. [Jelektronnyj resurs]. - URL: <http://dic.academic.ru/> (data obrashhenija: 18.01.2013).
20. Gidroabrazivnaja rezka materialov [Jelektronnyj resurs]. / Sajt kompanii MG Group URL: <http://h2orez.ru>. (data obrashhenija: 17.04.2013).
21. Rezat' vodoy. [Jelektronnyj resurs]. // Zhurnal «Oborudovanie: rynek, predlozhenie, ceny», № 8, av-gust 2003 g. - URL: <http://stanko-lid.ru/article/rezat-vodouy.html>. (data obrashhenija: 07.04.2013).
22. Tehnologija gidroabrazivnoj rezki. [Jelektronnyj resurs]. / Sajt kompanii «StilMetall». - URL: <http://www.steelmetall.ru>. (data obrashhenija: 18.01.2013).
23. U gidroabrazivnoj rezki bol'shoe budushhee. [Jelektronnyj resurs]. // Promyshlennyj zhurnal «Znak Kachestva». - №2. – 2009. - URL: http://www.znk.by/arhiv/02_09/9.html. (data obrashhenija: 20.04.2013).
24. Tarasov, L. V. Chetyrnadcat' lekcii o lazerah /L.V. Tarasov. - M.: Knizhnyj dom «Librokom», 2011. — 176 s.
25. Kiselev, G. L. Kvantovaja i opticheskaja jelektronika/G.L. Kiselev. - SPb.: Izd. «Lan». 2011. - 320 s.
27. Lazernaja rezka [Jelektronnyj resurs]. / Informacionnyj sajt «O svarke». - URL: <http://www.osvarke.com/lazernaya-rezka.html>. (data obrashhenija: 04.03.2013).
28. Tehnologicheskie processy lazernoj rezki. [Jelektronnyj resurs]. / Sajt kompanii «Lazernye ma-shiny». - URL: <http://lasermachine.ru/tech/68>. (data obrashhenija: 05.04.2013).
29. Progressivnaja lazernaja rezka metallov / L. Fomchenkova. [Jelektronnyj resurs] // "Peterburgskij stroitel'nyj rynek" 10 (94). - URL: <http://stroy-press.ru/?id=7189>. (data obrashhenija: 02.04.2013).
30. Solov'ev V. Otechestvennyj rynek lazernyh tehnologij /V. Solov'ev. [Jelektronnyj resurs]. / Sajt kompanii «Lazernye tehnologii». – URL: <http://www.lastech.mv74.ru/page.php?41>. (data obrashhenija: 04.04.2013).

Molchanova Elena Sergeevna

Kaluga Branch Bauman Moscow State Technical University
 Doctoral candidate in Engineering Sciences, of the Department «Industrial ecology and chemistry»
 Bazhenov Street, 2, Kaluga, Russia, 248600
 Ph.: +7 (4842) 77-45-05
 E-mail: alena.molchanova@gmail.com

Buchkov Nikolai Alexandrovich

Kaluga Branch Bauman Moscow State Technical University
 Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Department «Industrial ecology and chemistry»
 Bazhenov Street, 2, Kaluga, Russia, 248600
 Ph.: +7 (4842) 77-45-05
 E-mail: abhima@list.ru

Chernyaev Sergei Ivanovich

Kaluga Branch Bauman Moscow State Technical University
 Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Department «Industrial ecology and chemistry»
 Bazhenov Street, 2, Kaluga, Russia, 248600
 Ph.: +7 (4842) 77-45-05
 E-mail: pacer@russia.ru

В.Я. ОСАДЧИЙ, С.А. СУББОТИН

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОШИВНЫХ СТАНОВ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

В работе дан анализ конструктивных и технологических преимуществ и недостатков прошивных станов поперечно-винтовой прокатки различных конструкций.

Ключевые слова: Стан, валок, труба, гильза, скорость.

Трубная промышленность играет исключительно важную роль в хозяйстве нашей страны. Все передовые отрасли промышленности (атомная, нефтегазовый комплекс, авиакосмическая, оборонная, энергетическая и др.) постоянно нуждаются в трубах различного назначения, особенно бесшовных из углеродистых, конструкционных и нержавеющей марок стали.

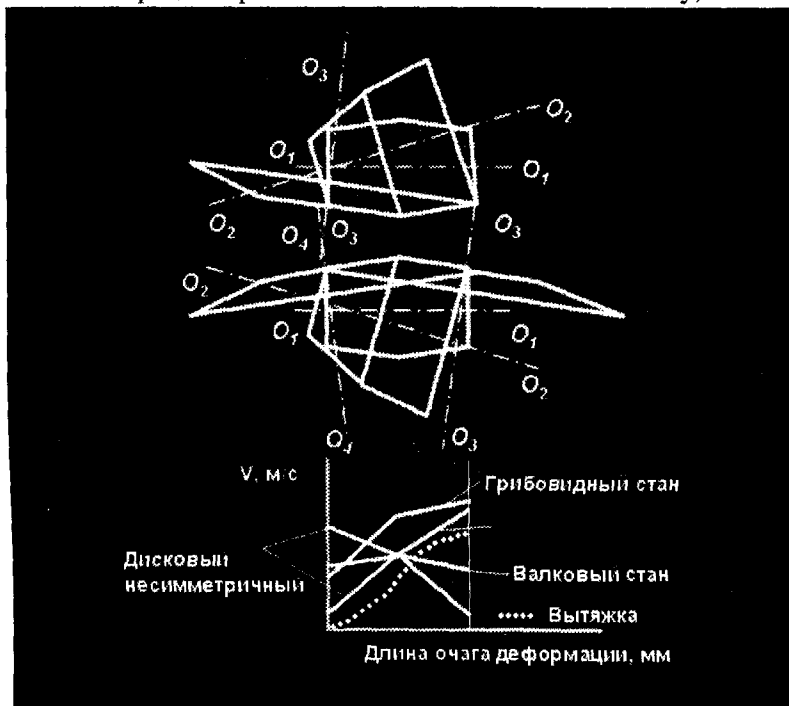
При производстве горячекатаных бесшовных труб первым и важнейшим станом в составе трубопрокатной установки является прошивной стан поперечно-винтовой (винтовой) прокатки.

В настоящее время в мировой практике используют следующие прошивные станы, различные по форме валков: станы с валками бочковидной формы, станы с валками грибовидной формы и станы с валками дисковой формы.

Каждый тип этих станов имеет определенные технологические, конструкционные и эксплуатационные преимущества и недостатки, которые очень важно знать работникам промышленности и науки.

Технологические особенности станов

На процесс прошивки сплошной заготовки в гильзу, на ее качество и производитель-



ность стана существенно влияют кинематические особенности конкретного стана. На рисунке 1 показано изменение осевой составляющей окружной скорости вала по длине очага деформации для валкового, грибовидного и дискового станов, а так же изменение коэффициента вытяжки металла в очаге деформации. В валковых станах окружная скорость вала и осевая составляющая сначала растут незначительно, а затем незначительно уменьшаются.

В стане с грибовидными валками эта характеристика по

Рисунок 1 – График изменения осевой составляющей окружной скорости вала по длине очага деформации для станов различных конструкций

длине очага деформации все время возрастает, что соответствует характеру изменения вытяжки в очаге деформации. Для станов с дисковыми валками кинематические условия крайне неприятные, так как на одном валке все составляющие резко возрастают, а на другом резко падают. Это приводит к проскальзыванию, сильному износу, большому скручиванию и появлению дефектов на поверхности.

Поэтому с точки зрения кинематических параметров наиболее благоприятным является прошивной стан с грибовидными валками, что подтверждается многолетним опытом работы этих станов и наименьшим наличием дефекта по сравнению с другими станами. [1]

Конструктивные особенности станов В настоящее время используют станы с горизонтальным и вертикальным расположением валков. Странниками станов с вертикальным расположением валков являются немецкие и итальянские фирмы.

Это станы с грибовидными валками, в которых используются приводные или неприводные диски вместо стационарных линеек (немецкое предложение) или стационарные линейки на каруселях специальной конструкции, которая позволяет быстро заменить старую линейку на новую (итальянское предложение).

Однако вертикальное расположение валков (рис. 2) имеет ряд существенных недостатков. Учитывая угол раскатки на грибовидных станах 15-20°, приходится привод на выходной стороне стана расположить таким образом, что один из валков находится под станом, а другой над станом. Из чего получается, что рабочая клетка находится на 1ом этаже, один привод на нулевом, второй привод на 2ом этаже, что крайне неудобно для работы в цехе. Замена валков при перевалке требует извлечения сначала верхнего валка, затем кассеты с нижним валком, что увеличивает время перевалки.

В процессе прошивки окалина с водой из очага деформации попадает на нижний валок и на кассету нижнего валка, что крайне нежелательно.

Вертикальное расположение валков делает рабочую клетку высокой и более склонной к вибрации, что отрицательно сказывается на работе оборудования и точности гильз.

Использование приводных дисков на прошивных станах можно считать положительным моментом, т.к. они увеличивают скорость прошивки, но использовать такую конструкцию можно на малых прошивных станах с диаметром гильз не более 150мм. Это связано с

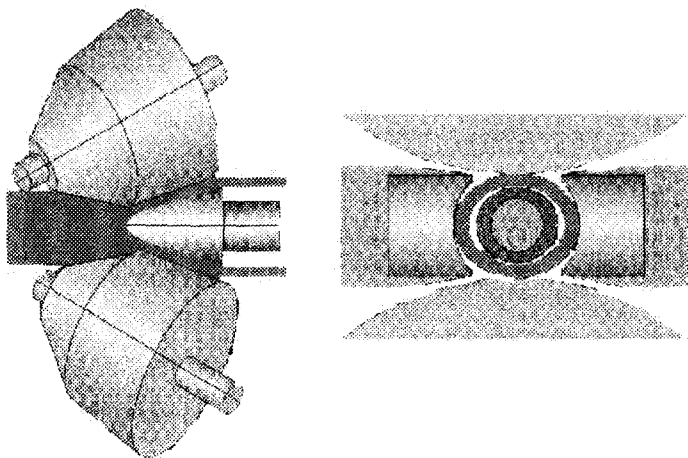


Рисунок 2 – Прошивной стан с вертикальным расположением грибовидных валков

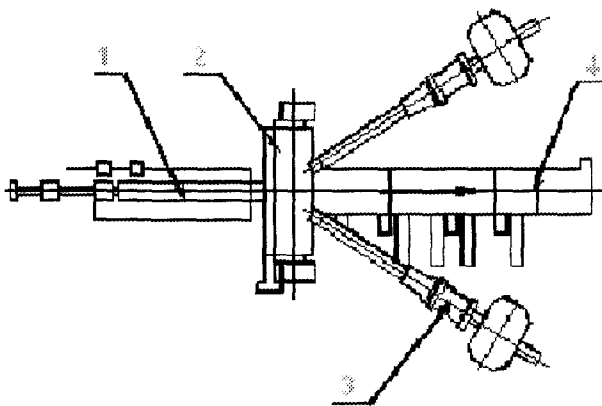


Рисунок 3 – Прошивной стан с грибовидными валками для СевТЗ

тем, что диск должен закрыть надлежащим образом очаг деформации, что требует большого диаметра диска. Так при обсуждении проекта прошивного стана для Северского грубоного завода (СевТЗ), который должен прошивать гильзы диаметром до 450мм. расчетный диаметр диска оказался равным 4800мм. Поэтому для СевТЗ был принят прошивной стан с грибовидными валками, но с расположением валков горизонтально (рис.3) В таблице 1 приведены основные параметры прошивного стана для СевТЗ.

Таблица 1 – Основные параметры прошивного стана

Диаметр рабочих валков в пережиме, D_B	1300мм
Длина рабочих валков, L_B	1200мм
Число оборотов валков, n_B	40...80 об/мин
Максимальное усилие на валок, P_B	900т.
Максимальное усилие на оправку, Q	400т.
Крутящий момент на валке, $M_{кр}$	120т.м.
Угол подачи валка, β	0...10°
Угол раскатки валка по оси прокатки, γ	15°
Угол раскатки дополнительный, $\gamma_{доп.}$	$\pm 1^\circ 30'$
Величина осевого перемещения оправки при прокатке	Не менее 100мм
Диаметр заготовки, D_3	400мм; 350мм
Длина заготовки, L_3	1400...3500мм
Диаметр гильзы, $D_Г$	450...350мм
Длина гильзы, $L_Г$	3000...10000мм
Толщина стенки гильзы, $S_Г$	50...100мм

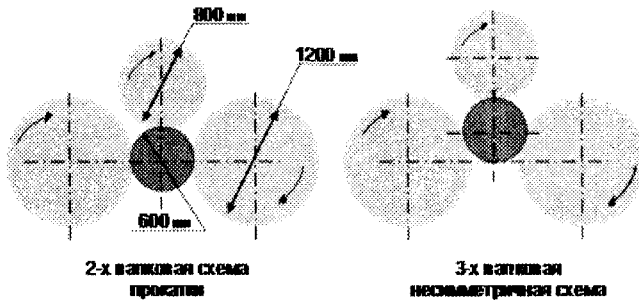


Рисунок 4 – Принципиальная схема универсального прошивного стана ПВП-600

свойствами и обладающие низкой пластичностью. Поэтому для прошивки заготовки из таких марок стали целесообразно использовать трехвалковые прошивные станы поперечно-винтовой прокатки.

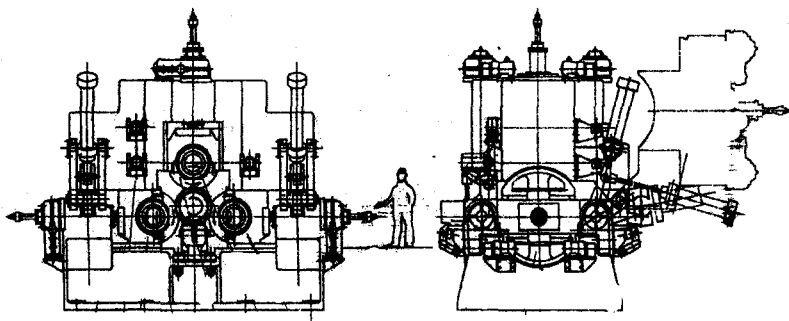


Рисунок 5 – Технический проект универсального прошивного стана ПВП-600

Этот стан был спроектирован и изготовлен под руководством д.т.н. Тартаковского И.К. Электростальским заводом тяжелого машиностроения, начал работать в 2005 году и положительно зарекомендовал себя в работе.

Так же в последние годы оборонная, атомная и др. отрасли промышленности требуют, в достаточных количествах, трубы из нержавеющей стали со специальными

Основываясь на работах Смирнова В.С., Целикова А.И., Осадчего В.Я., Панова Е.И., Электростальским заводом тяжелого машиностроения, МГУПИ и ЧТПЗ был разработан технологический проект универсального прошивного стана ПВП-600. [2]

На рисунке 4 показана принципиальная схема такого стана, который может работать, как 2-х валковый стан, так и как 3-х валковый. На рисунке 5 представлен технический проект универсального прошивного стана. В таблице 2 представлены основные параметры ПВП-600 для цеха №1 ОАО ЧТПЗ.

Таблица 2 – Основные параметры ПВП-600

Диаметр рабочих валков в пережиме, D_B	1200мм (800мм 3й валок)
Длина рабочих валков, L_B	1300мм
Число оборотов валков, n_B	30...60 об/мин
Максимальное усилие на валок, P_B	10000 кН
Осевое усилие на оправку, Q	6000 кН
Крутящий момент на валке, $M_{кр}$	1300 кН*м
Угол подачи валка, β	0...10°
Угол раскатки валка по оси прокатки, γ	0°
Угол раскатки дополнительный, $\gamma_{доп.}$	±1°30'
Величина осевого перемещения оправки при прокатке	Не менее 100мм
Диаметр заготовки, D_3	400мм; 650мм
Длина заготовки, L_3	1200...3000мм
Диаметр гильзы, $D_Г$	400...650мм
Длина гильзы, $L_Г$	2500...4000мм
Толщина стенки гильзы, $S_Г$	70...150мм

Трехвалковые станы поперечно-винтовой прокатки созданные под руководством ВНИИМЕТМАШ успешно работали и работают на машиностроительных заводах. На Синарском трубном заводе работает 3-х валковый стан поперечно-винтовой прокатки для обжатия непрерывно-литой заготовки с целью проработки литой структуры и повышения пластических свойств металла, что способствует получению качественных гильз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осадчий, В.Я. Производство и качество стальных труб / В.Я. Осадчий, А.П. Коликов. – М.: Издательство МГУПИ. 2012.
2. Осадчий, В.Я. Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2007.

Осадчий Владимир Яковлевич

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики»
 доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные технологии обработки давлением»
 107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.20
 Тел. 89165901997
 E-mail: info@mgupi.ru

Субботин Станислав Александрович

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики»
 Студент 4 курса
 107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.20
 8 (499) 268-00-01
 E-mail: info@mgupi.ru

V.YA. OSADCHY, S.A. SUBBOTIN

TECHNOLOGICAL AND DESIGN FEATURES PIERCING MILLS PRODUCED BY CROSS-HELICAL ROLLING

The paper presents the analysis of structural and technological advantages and disadvantages piercing mills helical rolling different designs.

Keywords: Mill, roll, pipe, socket, speed.

BIBLIOGRAPHY

1. Osadchij, V.Ja. Proizvodstvo i kachestvo stal'nyh trub / V.Ja. Osadchij, A.P. Kolikov. – М.: Izdatel'stvo MGUPI, 2012.
2. Osadchij, V.Ja. Tehnologija i oborudovanie trubnogo proizvodstva / V.Ja. Osadchij, A.S. Vavilin, V.G. Zimovec, A.P. Kolikov. – М.: «Интернет Инжиниринг», 2007.

Osadchy Vladimir Yakovlevich

Moscow state university of instrument engineering and informatics

Doctor of chemical sciences, professor, head of chair «Information technologies of processing by pressure»

107996 Russia., Moscow. Ul. the Stromynka street, 20

Tel. 89165901997

E-mail: info@mgupi.ru

Subbotin Stanislav Aleksandrovich

«Moscow state University of instrument engineering and Informatics»

Student of the 4th course

107996 Russia., Moscow. Ul. the Stromynka street, 20

8 (499) 268-00-01

E-mail: info@mgupi.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 629.584

Е.И. ВОРОБЬЕВ, А.Ю. АЛБАГАЧИЕВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РОБОТЫ (ДИНАМИКА И УПРАВЛЕНИЕ)

Представлена динамическая модель технологического робота как управляемой системы твердых тел. Модель построена на основе метода Даламбера - Лагранжа. Условия, которые наложены технологическим процессом, обеспечиваются путем дополнительных программных связей. Контроль действия основаны на концепции обратных задач динамики, управляющие силы находятся с учетом условий устойчивости.

Ключевые слова: динамическая модель, технологический робот, программа соединения, программные связи, обратные задачи.

Технологические роботы применяются для выполнения основных технологических операций: сборки, сварки, обработки поверхностей и др. Эти операции выполняются с помощью исполнительской системы робота-манипулятора - механизма с несколькими степенями свободы.

При выполнении основных операций к роботу предъявляются повышенные требования по сравнению с роботами, выполняющими только транспортные операции.

Построение алгоритма управления может быть осуществлено на основе математической модели робота и выполняемой технологической операции.

Эффективным методом решения этих задач является метод обратных задач динамики [1-5]. В этом случае условия выполнения технологической операции выражаются некоторыми программными связями, аналогичными условиям связей в аналитической механике.

Решение обратных задач в механике позволяет определить основные требования, которые должны быть наложены на систему, чтобы движение с заданными свойствами стало возможным, а также законы изменения и структуру управляющих сил.

В работах А.С. Галиуллина и его сотрудников [3] на основе метода Н.П. Еругина дано развитие метода построения дифференциальных уравнений по заданному движению и применение этого метода к решению обратных задач динамики.

Б.Н. Петровым, П.Д. Крутько и Е.П. Поповым была показана возможность применения результатов решения обратных задач динамики для построения алгоритмов и систем управления [4]. Е.И. Воробьевым метод обратных задач динамики был применен впервые к манипуляторам и промышленным роботам [1, 2, 5].

Динамическая модель манипулятора.

Построению динамических моделей манипуляторов посвящено большое количество работ. В работах [1, 2, 5] решались различные программные задачи построения движений промышленных роботов.

Технологическая операция накладывает на движение рабочего органа манипулятора дополнительные условия. Эти условия могут быть выражены также как связи в аналитической механике (условия на координаты и их произведение). Однако, условия, накладываемые технологической операцией, могут быть более сложными, например, условие на силы при полировании или сборке [4]. В этом случае методы аналитической механики построения уравнений движения оказываются недостаточными.

Эффективным методом построения уравнений движения технологических роботов является метод построения дифференциальных уравнений по заданному решению, метод обратных задач динамики, предложенный для роботов в работе [2].

1. Уравнения движения манипулятора

Для получения дифференциальных уравнений воспользуемся принципом Даламбера-Лагранжа, К действующим на тела силам добавим главные векторы сил инерции и главные моменты сил инерции звеньев, приложенные в их центрах масс, и сообщим системе независимые возможные перемещения в сочленениях.

Формирование уравнений движений сводится к скалярному перемножению коэффициентов, входящих в выражения моментов и сил инерции звеньев и активных сил, на векторы возможных перемещений. Будем считать, что в сочленениях возможны вращательные и поступательные перемещения

При совершении каждого виртуального перемещения $\delta\varphi_j, \delta\varphi_i$ вращательной или поступательной паре j все i -е звенья, для которых $i > j$ получают перемещения, а приложенные к ним силы и моменты совершают работу (рисунок 1).

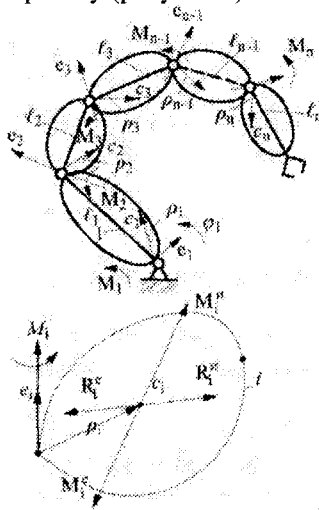


Рисунок 1 - Математическая модель робота

Виртуальная работа сил при виртуальном угловом перемещении в j -м шарнире выражается так:

$$\sum_{i=j}^n \left[(\bar{M}_i^e + \bar{M}_i^i) \cdot \delta\bar{\varphi}_j + (\bar{F}_i^e + \bar{F}_i^i) \cdot (\delta\bar{\varphi}_j \times \bar{r}_{ji}) + \bar{M}_j \delta\bar{\varphi}_i \right] = 0 \quad (1)$$

где $\delta\bar{\varphi}_j \times \bar{r}_{ji}$ – перемещение центра масс звена i при виртуальном угловом перемещении в шарнире j ; $\delta\bar{\varphi}_j = \delta\bar{\varphi}_j \bar{e}_j$, $\bar{r}_{ji} = \sum_{k=j}^{i-1} \bar{l}_k + \bar{\rho}$ – радиус-вектор, определяющий положение центра масс звена i относительно центра шарнира j ; \bar{F}_i^e, \bar{M}_i^e – соответственно внешние силы и моменты звена i .

Подставляя в (1) выражения для \bar{F}_i^e и \bar{M}_i^e , сокращая на $\delta\bar{\varphi}_j$, получим дифференциальные уравнения движения механизма в шарнире j :

$$\begin{aligned} & - \sum_{i=j}^n \left\{ \sum_{k=1}^i \bar{M}_{ik} \bar{e}_j - \sum_{k=1}^i m_i \bar{c}_{ik} \left[\bar{e}_j \times \left(\bar{\rho}_i + \sum_{k=j}^{i-1} \bar{e}_k \right) \right] \right\} \cdot \bar{q}_k = \\ & = \sum_{i=j}^n \left\{ \sum_{k=1}^i \bar{M}_i \bar{e}_j - \sum_{k=1}^i m_i \bar{d}_i \left[\bar{e}_j \times \left(\bar{\rho}_i + \sum_{k=j}^{i-1} \bar{e}_k \right) \right] + \bar{F}_i^e \left[\bar{e}_j \times \left(\bar{\rho}_i + \sum_{k=j}^{i-1} \bar{e}_k \right) \right] + \bar{M}_i^e \bar{e}_j \right\} + M_j \end{aligned} \quad (2)$$

Индекс j в этом уравнении принимает значения, соответствующие номерам вращательных шарниров.

Для получения уравнений динамики, соответствующих движению в поступательных парах, сообщим системе виртуальное перемещение последовательно в каждой поступательной паре и составим суммы виртуальных работ сил.

Виртуальная работа при j -м поступательном виртуальном перемещении выражается так:

$$\sum_{i=j}^n (\bar{F}_i^e + \bar{F}_i^u) \delta \bar{s}_{C_i}^{(j)} + \bar{Q}_j \delta \bar{s}_{C_j}^{(j)} = 0 \quad (3)$$

где $\delta \bar{s}_{C_i}^{(j)}$ виртуальное перемещение центра масс звена i при поступательном перемещении в шарнире j .

Подставляя в (2) значения сил инерции и сокращая на $\delta \bar{s}_{C_i}^{(j)}$, получим систему дифференциальных уравнений, описывающих движения в поступательных парах:

$$\sum_{i=j}^n \sum_{k=1}^i m_i \bar{c}_{ik} \bar{e}_j \bar{q}_k = - \sum_{i=j}^n m_i \bar{d}_i \bar{e}_j + \bar{F}_i^e \bar{e}_j + \bar{Q}_j \quad (4)$$

Индекс j в этом уравнении принимает значения, соответствующие номерам поступательных соединений.

Уравнения (2) и (4) образуют систему линейных дифференциальных уравнений 2-го порядка со скалярными коэффициентами. Коэффициенты этих уравнений зависят от обобщенных координат и при заданных начальных условиях могут быть найдены по этим формулам.

При построении заданных целенаправленных движений антропоморфного робота программы могут выражаться различными уравнениями и функциями. Рассмотрим построение уравнений движений по некоторым программам дифференциального типа. Для решения этой задачи эффективным методом является метод построения уравнений движения на основе обратных задач динамики [3-4].

2. Построение уравнений движения манипулятора по дифференциальной программе

Пусть задана программа движения выходного звена механизма в виде:

$$\dot{O}_k = \left(x_1, \dots, x_m; \dot{x}_1, \dots, \dot{x}_m \right) \quad (5)$$

где $k = 1, 2, \dots; r \leq m; m < 6; x_1(i), \dot{x}_1(i), (i = 1, \dots, m)$ – обобщенные координаты твердого тела и их производные по времени.

Одной из важных особенностей решения обратных задач динамики является то, что управляющие силы находятся в зависимости от обобщенных координат и их производных.

Определение управляющих сил позволяет организовать управление с использованием сигналов от датчиков обратной связи.

Построим дифференциальные уравнения движения механизма, для которого программа (2.1) является их частным решением, что означает, что заданная программа может быть осуществлена этим механизмом.

Рассмотрим манипулятор с незамкнутой кинематической цепью, обладающей n степенями подвижности (см. рисунок 1.1).

Предполагаем, что в шарнирах механизма приложены движущие моменты $M_j (j = 1, \dots, n)$.

Пронумеруем его звенья, начиная от стойки. Для решения задачи программу, заданную в координатах объекта, переведем в форму, содержащую обобщенные координаты механизма.

Установим связь между обобщенными координатами механизма q_1, \dots, q_n и обобщенными координатами твердого тела X_j используя матричные уравнения связи. Как было показано выше, имеем:

$$M_{01} M_{12}, \dots, M_{n-1,n} = M_{0n} \quad (6)$$

Приравнивая соответствующие элементы матриц в левой и правой частях уравнения (6), получим 12 уравнений вида:

$$F_l(q_1, \dots, q_n; x_1, \dots, x_m) = 0$$

$$l = 1, \dots, 12.$$

Из этих двенадцати уравнений независимыми являются лишь шесть. Разрешив эти уравнения относительно x , найдем функции:

$$x_i = x_i(q_1, \dots, q_n) \quad (7)$$

Дифференцируя (6) по времени, получим:

$$\dot{x} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial x_i}{\partial q_j} \dot{q}_j. \quad (8)$$

Используя (7), (8), найдем представление программы движения тела в виде:

$$F_k \left(q_1, \dots, q_n; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n \right); \quad (9)$$

уравнения динамики манипулятора представим в виде:

$$\sum A_{ij}(q_i, c_s) \ddot{q}_i + B_j(q_i, \dot{q}_i, c_s) = Q_j \quad (10)$$

где c_s – постоянные параметры механизма; Q_j – управляющие воздействия приводов.

Эти уравнения запишем в форме Коши, обозначив $q = p_i$, тогда система (2.6) получает вид:

$$\dot{q}_i = p_i; \sum A_{ij}(q_i, c_s) \dot{p}_i + B_j(q_i, p_i, c_s) = u_j \quad (11)$$

Разрешая линейную систему уравнений (2.7) относительно p_i , получим;

$$q = p_i; p_i = f_i(q_i, p_i, c_s) + \sum_{j=1}^n b_{ij}(q_i, p_i, c_s) u_j \quad (12)$$

Теперь задача состоит в том, чтобы найти правые части уравнений (12), такие, чтобы выражение программы являлось частным решением этой системы дифференциальных уравнений.

Используя метод построения дифференциальных уравнений по заданному частному решению, можно записать условие осуществимости программы:

$$\frac{\partial F_k}{\partial q_i} p_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial F_k}{\partial q_i} \left[f_i(q_i, p_i, c_s) + \sum_{j=1}^n b_{ij}(q_i, p_i, c_s) u_j \right] = R_k \quad (13)$$

Система уравнений (12) является линейной относительно неизвестных функций u_j представляющих искомые правые части системы дифференциальных уравнений.

Число известных искомым функций a_i равно n , а число линейных уравнений – r , причем $r \leq n$. Решая: полученную систему уравнений (13) относительно неизвестных получим искомое множество систем дифференциальных уравнении:

$$q_i = p_i; p = \sum_{i=1}^r \frac{\Delta_{jk}}{\Delta} R_k - \sum_{s=r+1}^n \frac{\Delta_{ks}}{\Delta} F_s \quad (14)$$

$$p_j = F_s; s = r + 1, \dots, n.$$

где Δ – функциональный определитель системы (14) по q_i, p_j не равный нулю в силу независимости функций F_k ; Δ_{jk} – алгебраическое дополнение элемента определителя Δ ; Δ_{ks} – определитель, полученный из определителя Δ заменой его k -го столбца S -м столбцом матрицы:

$$\left[\frac{\partial F_k}{\partial q_i} \frac{\partial F_k}{\partial p_i} \right].$$

Построенная система уравнений (14) задает основные условия, налагаемые программой как на постоянные параметры механизма c_s , так и на управляющие воздействия, входящие в функции $a_i (i = 1, \dots, r)$.

Оставшиеся функции $F_s (s = r + 1, \dots, n)$ являются произвольными и вместе с функциями $R_k (k = 1, \dots, r)$, обращающимися в нуль на многообразии F_k , могут быть использованы для выполнения дополнительных условий. Такими дополнительными условиями могут быть условия устойчивости, оптимальности, точности и т. д.

Определение управляющих воздействий. Рассмотрим важный частный случай задачи построения уравнений движения, задачу определения управляющих воздействий, осуществляющих движение механизма по заданной программе.

Относительно уравнений $u_j (j = 1, 2, \dots, n)$ система уравнений (14) есть система r линейных уравнений с n известными. Поэтому управляющие воздействия u_j можно определить, вводя некоторые дополнительные условия оптимальности. За условие оптимальности можно принять условие минимума «принуждения», или нормы u_j , представляющей собой функцию вида:

$$z_w^* = \sum_{j=1}^n u_j^2 \quad (15)$$

Очевидно, что задача определения u_j в данном случае представляет задачу на условный экстремум функционала (15) при условиях (13). Применяя для решения этой задачи метод неопределенных коэффициентов Лагранжа, получим следующие выражения для управляющих воздействий u_j :

$$u_j = \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^n \frac{\partial F_k}{\partial p_i} b_{ij} \lambda_k + R_j \quad (16)$$

где R_j – произвольные функции, обращающиеся в нуль на многообразии F_k ; λ_k – неопределенные множители Лагранжа,

Множители Лагранжа определяются из линейной системы (13) после подстановки в нее выражения для u из (16).

В полученные выражения для управляющих воздействий входят произвольные функции R_j , обращающиеся в нуль на программе движения. Из этого следует, что для реализации программного движения необходимым условием являются не абсолютные величины управляющих сил, а соотношения между ними. Если, считать, что движение происходит по заданной программе точно без отклонений, то можно положить $R_j = 0$. В этом случае найдем «номинальные» силы, необходимые для реализации заданного программного движения. Однако в действительности всегда имеет место отклонение от программы движения, например, в начальный момент времени систему практически нельзя привести точно в состояние, соответствующее программе. Поэтому, чтобы в действительности обеспечить выполнение заданной программы движения, управляющие силы следует находить с учетом условий устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев, Е.И. Комплект из 3-х кн. Механика промышленных роботов /Е.И. Воробьев [и др.]. – М.: Высшая школа, 1989. – 1054 с.
2. Воробьев, Е.И. Построение уравнений программного движения пространственных механизмов с несколькими степенями свободы/Е.И. Воробьев //Машиноведение. - 1981. - № 5.- С.42-46 .
3. Галиуллин, А.С. Обратные задачи динамики. – М.: Наука, 1981.- 144 с.
4. Петров, Б.Н. Построение алгоритмов управления как обратная задача динамики / Б.Н. Петров, П.Д. Крутько, Е.П. Попов //Доклады АН СССР, 1979. - Т. 247. - №5. – С.1078-1081.
5. Балакирова, Т.И. Управление движением сборочным роботом с ограничениями нормальных сил /Т.И. Балакирова, Е.И. Воробьев. – М.: Известия АН СССР. Механика,1985. № 3. – С. 99-102 .

Воробьев Евгений Иванович

МГУПИ

Д-р технических наук, проф.

Тел.: +7(495) 2275163

E-mail: evgeniv36@mail.ru

Албагачиев Али Юсупович

МГУПИ

Д-р технических наук, профессор

Заведующий кафедрой «Технологическая информатика и технология машиностроения»

Тел.: +7(495) 2694588

E-mail: Albagachiev@yandex.ru

T.I. VOROBYEV, A. YU. ALBAGAČHIEV

TECHNOLOGICAL ROBOTS (DYNAMICS, CONTROL)

Dynamic model of robot technology is presented as a system of rigid bodies. The model is constructed based on the method of D'Alembert-Lagrange. The conditions that applied technological process are provided by additional software links. Control actions are based on the concept of inverse problems of dynamics. the administering Powers are subject to conditions of sustainability

Keywords: dynamic model, technological robot, program connections, programmatic linkages, inverse problems.

BIBLIOGRAPHY

1. Vorob'ev, E.I. Komplekt iz 3-h kn. Mehanika promyshlennyh robotov /E.I. Vorob'ev [i dr.]. – М.: Vysshaja shkola, 1989. – 1054 s.
2. Vorob'ev, E.I. Postroenie uravnenij programmnoho dvizhenija prostranstvennyh mehanizmov s neskol'kimi stepenjami svobody/E.I. Vorob'ev //Mashinovedenie. - 1981. - № 5.- S.42-46 .
3. Galiullin, A.S. Obratnye zadachi dinamiki. – М.: Nauka, 1981.- 144 s.
4. Petrov, B.N. Postroenie algoritmov upravlenija kak obratnaja zadacha dinamiki / B.N. Petrov, P.D. Krut'ko, E.P. Popov //Doklady AN SSSR, 1979. - Т. 247. - №5. – S.1078-1081.
5. Balakirova, T.I. Upravlenie dvizheniem sborochnym robotom s ogranichenijami normal'nyh sil /T.I. Balakirova, E.I. Vorob'ev. – М.: Izvestija AN SSSR. Mehanika,1985. № 3. – S. 99-102 .

Vorobiev Evgeniy Ivanovich

Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics

Doctor of technical sciences, Professor

Tel.: +7(495) 2275163

E-mail: evgeniv36@mail.ru

Albagačiev Ali Yusupovich

Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics

Doctor of technical sciences, Professor

Head of the laboratory "Technology Informatics and Engineering Technology "

Tel.: +7(495) 2694588

E-mail: Albagachiev@yandex.ru

А.В. КОРНАЕВ, Л.А. САВИН, Ю.С. СТЕПАНОВ

РОЛЬ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В РАЗВИТИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СМАЗКИ

Статья посвящена анализу направлений развития гидродинамической теории смазки, а также обзору существующих и перспективных наноматериалов, применимых в качестве компонентов смазки узлов жидкостного трения.

Ключевые слова: трибология, гидродинамическая теория смазки, механика сплошных сред, молекулярная динамика, реология, вязкость, адгезия, гибридное трение, нанотехнологии, наносмазка, фуллерен, фуллереноподобный материал.

ВВЕДЕНИЕ

Трение является важной составляющей физических процессов в природе и технике, которая в значительной мере отражает противоречивость материального мира. С одной стороны, без сопротивления среды невозможно движение по поверхности и устойчивое стационарное состояние, с другой – трение является причиной диссипации механической энергии и износа подвижных элементов машины. Основным способом снижения негативного влияния трения является смазка, которая по степени разделения трущихся поверхностей смазочным материалом подразделяется на граничную, полужидкостную и жидкостную. Жидкостная смазка обеспечивает полное разделение трущихся поверхностей за счет несущей способности, возникающей в результате напора подачи смазочного материала (гидростатическая смазка), или в результате эффекта повышения давления внутри смазочного материала за счет его движения (гидродинамическая смазка). Наиболее перспективной с точки зрения повышения энергоэффективности является именно гидродинамическая смазка. Критерием энергоэффективности удобно принять отношение результирующей подъемной силы к результирующей силе трения.

Справедливо предположить, что в ближайшее время гидродинамическая теория смазки способна перейти на новый уровень в связи с открытием и применением новых материалов. Вероятнее всего неизменными останутся четыре условия возникновения гидродинамического эффекта разделения трущихся поверхностей смазочным слоем [1]: способность поверхностей трения «смачиваться» смазочным материалом; наличие у смазочного материала вязких свойств; относительное движение трущихся поверхностей; изменение зазора канала течения смазочного материала по направлению течения и (или) во времени.

Согласно основным условиям возникновения эффекта гидродинамической смазки в части требований к смазочному материалу можно утверждать, что термин «жидкостное трение» является условным, новый материал не обязательно должен быть жидкостью, но обязательно должен обладать свойством вязкости и способностью «прилипать» к поверхностям трения. Зная требования с точки зрения механики к основным свойствам материала гидродинамической смазки, а также современный уровень развития нанотехнологий, можно обозначить некоторые перспективы развития гидродинамической теории смазки в XXI веке.

ПРЕДПОСЫЛКИ ГИБРИДНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СМАЗКИ

Наиболее перспективным путем повышения энергоэффективности гидродинамической смазки является создание и применение новых материалов с совмещенными (гибридными) свойствами и механизмами внутреннего трения. Учитывая эволюционную схему развития трибологии от макро- к микро- и наноуровням [2], а также принимая концепцию развития по спирали, можно обозначить «виток» развития теории смазки по пути совмещения свойств и механизмов (рис. 1).

Наиболее известной иллюстрацией энергоэффективности смазки является кривая Герси-Штрибека, минимум которой находится в области гидродинамической смазки с минимально возможной толщиной при совместном действии эффектов гидродинамики и упругой деформации поверхностей трения [3]. Учет такого совместного действия сил вязкости и упру-

гости присущ теории упругогидродинамической смазки [1], которую можно считать первым этапом развития по пути совмещения свойств и механизмов смазки на макроуровне (рис. 1).

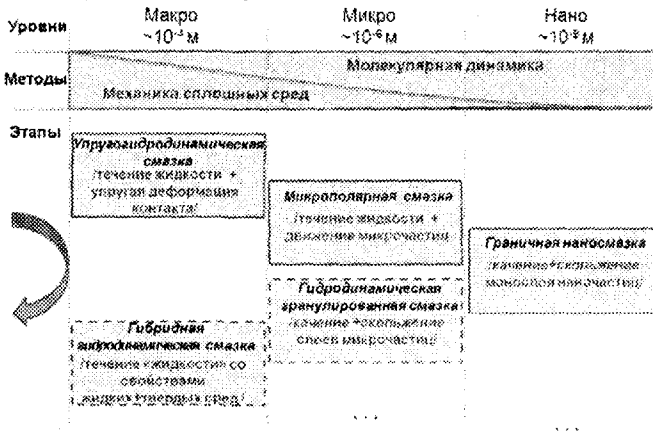


Рисунок 1 – Существующие и перспективные этапы пути совмещения свойств и механизмов смазки

Вторым этапом, принадлежащим уже микроуровню, является теория микрополярной смазки [1], изучающая появление положительных эффектов влияния собственного движения твердых микрочастиц в материале гидродинамической смазки. Следует отметить, во-первых, что простейшую функциональную зависимость влияния концентрации твердых гранул на вязкость жидкости предложил А.Эйнштейн, а во-вторых, что классические методы механики сплошных сред для описания микрополярной смазки существенно усложняются по мере развития

теории микрополярной смазки. Возрастает роль методов молекулярной динамики [4].

Третьим этапом является теория граничной наносмазки, развиваемой в настоящее время российскими [5] и зарубежными [6] учеными. Взаимодействие молекул смазки между собой и с молекулами поверхностей трения описывается методами молекулярной механики с применением принципа потенциального взаимодействия атомов и молекул [4, 6, 7]. Исследован механизм перехода трения молекулы так называемой «нанолуковицы» из режима качения в режим скольжения [6].

Выделенные первые три этапа являются научной основой зарождения и развития основ гидродинамической гранулированной смазки и гибридной гидродинамической смазки (рисунок 1). Оба этапа на сегодняшний день существуют на уровне гипотез [8].

Четвертым (перспективным) этапом является теории гидродинамической гранулированной смазки – смазки узлов гидродинамического трения микроскопическими сферическими частицами, легко заполняющими микронеровности поверхностей трения, сочетающими механизмы трения скольжения и качения, обладающими свойствами вязкоупругого сопротивления деформации, а также адгезионными свойствами.

Пятым (перспективным) этапом является теории гибридной гидродинамической смазки – смазки узлов гидродинамического трения средами со сложными свойствами, присущими жидкостям и твердым материалам. Термин «гибридное трение» (hybrid friction) встречается в зарубежной литературе для обозначения сложных свойств сыпучих сред, сопротивление сдвигу которых зависит одновременно от скорости сдвига (свойство жидкостей) и давления (свойство твердых тел) [9]. В работе коллектива авторов [8] было показано, что смазочный материал, наделенный свойствами гибридного внутреннего трения способен развить дополнительную несущую способность. Однако вопрос количественной оценки роста подъемной силы и силы трения остается открытым.

Обозначенные существующие и перспективные этапы развития теории смазки по пути совмещения свойств и механизмов могут служить ориентиром в действиях ученых теоретиков, интерес которых постоянно поддерживается достижениями в области экспериментальной физики и химии.

Современная экспериментальная физика позволяет исследовать свойства материалов на уровнях вплоть до отдельной наночастицы. Такие сведения незаменимы в развитии методов молекулярной динамики моделирования наносмазки [4]. Макроскопические методы исследования свойств сред сложной реологии должны в ближайшее время перейти на новый уровень и позволить более точно учитывать влияние нескольких факторов на реологические свойства смазочных материалов.

Вполне оправдано предположить, что современная химия способна создать новые материалы с требуемыми свойствами. Полагая, что смазочный материал может обладать заданными физическими и химическими свойствами, легко заполнять микронеровности шероховатых поверхностей трения и создавать на них адгезионный слой, создание новых энергоэффективных смазочных материалов и узлов трения является лишь вопросом времени.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ

Уменьшение размера частицы сопровождается, как правило, преобладающе быстрым падением объемной энергии, над падением поверхностной энергии. Поэтому начиная с некоторого критического размера, поверхностная энергия становится больше объемной, а частица приобретает новые свойства и переходит в новое качество – она становится наночастицей. Ярким примером проявления высокой поверхностной энергии наночастиц является образование конгломератов частиц наноалмазного порошка, которые очень сложно разбить на исходные наночастицы [10]. Подобное проявление сильной поверхностной энергии, а также малый по сравнению с размерами шероховатостей размер наночастиц, благоприятствуют образованию на поверхности трения слоя «прилипания», аналогичного слою, образованному жидкой смазкой, как необходимому первому условию возникновения гидродинамического эффекта смазки (см. введение). Второе условие, а именно наличие требуемых вязких свойств может быть обеспечено благодаря многообразию свойств существующих и теоретически возможных наноматериалов.

Термины «нанотехнологии» и «наноматериалы» появились во многом благодаря открытию фуллерена – третьей аллотропной формы углерода (рис. 2, а) в 1985 году. На сегодняшний день теоретически известно, что фуллерены с количеством атомов более шестидесяти имеют несколько сотен видов, из них получены не более 30, а производятся в коммерческих масштабах только C_{60} и C_{70} [11]. Фуллерены высших порядков могут заключать внутри себя фуллерены низших порядков, образуя «луковичные» структуры (buckyonions) – так называемые экзоэдральные комплексы (рис. 2, б). В работе [12] доказана возможность существования «луковичных» структур фуллерена с десятками слоев, расположенных на расстоянии около 3 ангстрем, что соответствует примерно расстоянию между атомными слоями графита.

Фуллерен, как известно, является гидрофобным материалом, что затрудняет его использование в качестве добавки к жидким смазкам. Гидратированный фуллерен обладает свойством гидрофильности и представляет собой молекулярный комплекс, состоящий из молекулы фуллерена C_{60} , заключенной в гидратную оболочку, которая содержит 24 молекулы воды: $C_{60}@(H_2O)_{24}$ [12].

Фторирование фуллеренов представляет значительный интерес с точки зрения улучшения фрикционных свойств. Фторфуллерен C_{60} может содержать до 48 атомов фтора на одну молекулу: $MF_n \cdot C_{60}$ (рис. 2, в) [13].

Большую практическую значимость имеют реакции полимеризации с участием фуллеренов. Существует гипотетическая возможность «манипулирования» свойствами и размерами молекул, составленных из большого количества фуллеренов и цепочек полимеров (рис. 2, г) [12].

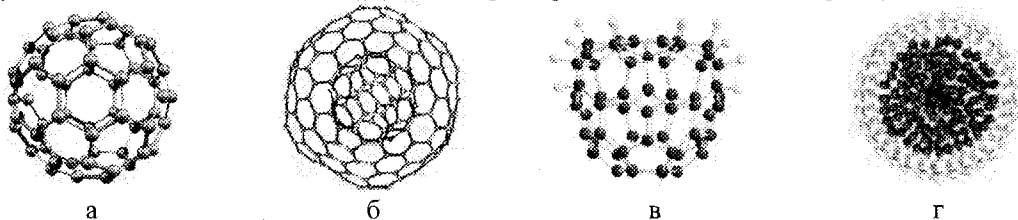


Рисунок 2 – Фуллерены и их соединения

а – фуллерен, б – экзоэдральный комплекс, в – фторфуллерен, г – супрамолекулярная структура фуллерена

Долгое время не удавалось получить аналоги фуллеренов для других элементов, в то время как нанотрубки довольно быстро научились синтезировать для многих элементов и окислов [14]. В 2000-е годы, во многом благодаря работам профессора Р.Тенне, в израильской компании «ApNano materials» [15] были получены неорганические фуллереноподобные наночастицы дисульфида вольфрама WS_2 , получившие практическое применение в качестве добавки «ADDNANO» к жидким смазочным материалам. Каждая частица такой добавки представляет собой многослойное (более 30 слоев) образование «луковичного» типа размером 10-100 нм.

В работе [10] представлен еще один перспективный класс наноматериалов на основе наноалмазных порошков и суспензий. Примечательны однородность фракции наноалмазов – около 4 нм, и реологические свойства суспензии, а именно аномально высокая вязкость. Однако из-за большой поверхностной энергии наноалмазный порошок, как и многие другие вещества в ультрадисперсном состоянии, состоит не из отдельных наночастиц, а из их агрегатов размерами порядка 1 мкм. Полимер-наноалмазные композиты применяют в настоящее время в качестве модификаторов поверхности трения в двигателях внутреннего сгорания. В работе [16] представлены технологии получения золотых наносфер диаметром от 3 до 100 нм. В работе [17] исследована возможность получения наноразмерных порошков тугоплавких соединений, в частности карбида вольфрама WC фракцией около 300 нм с кристаллической структурой.

Многообразие открытых практически или обоснованных теоретически видов наноматериалов исчисляется миллионами. Наноконтактные смазочные материалы уже применяются в узлах и элементах граничного трения, доказан эффект снижения коэффициента трения на 10-15 % и еще более существенного увеличения износостойкости [5, 18]. Однако на сегодняшний день недостаточно теоретически и экспериментально исследован вопрос создания эффективной гидродинамической смазки, состоящей частично или полностью из твердых наноматериалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективы развития гидродинамической теории смазки в XXI веке во многом связаны с достижениями и развитием нанотехнологий, которые согласно высказыванию Р.С.Меркле «...произведут такую же революцию в манипулировании материей, какую произвели компьютеры в манипулировании информацией». Именно манипуляцией материей можно добиться перехода гидродинамической смазки на новый уровень энергоэффективности за счет синергетического эффекта сочетания свойств жидкостей и твердых тел в новых смазочных материалах. В этой связи можно выделить ряд первоочередных задач гидродинамической теории смазки микро- и макроуровня исследования (рис. 1): 1) определение оптимального соотношения коэффициентов трения качения и скольжения гранулированной смазки; 2) определение вида оптимальной функции вязкости гибридной смазки; 3) разработка методов измерения свойств гибридной смазки; 4) разработка новых конструкций подшипников жидкостного трения.

Работа выполнена в рамках проекта «Фундаментальные основы микрополярной и гибридной смазки гранулированными наноматериалами» по заданию Минобрнауки России № 7.516.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: моногр. / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
2. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлингер, Э.Д. Браун и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 567 с.
3. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
4. Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике / Х. Гулд, Я. Гобочник. – Часть 1. – М.: Мир, 1990. – 350 с.
5. Ginzburg V.M. Thermal and Tribological Properties of Fullerene-Containing Composite Systems. P. 2. Formation of Tribo-Polymer Films during Boundary Sliding Friction in the Presence of Fullerene C60 / V.M. Ginzburg,

O.F. Kireenko, A.A. Shepelevskii, L.A. Shibaev, D.G. Tochilnikov, A.M. Leksovskii. - *J. Macromol. Sci., B, Physics* 2005, 44. (1), 93-115.

6. E.W. Bucholz, S.R. Phillpot, S.B. Sinnott. Molecular dynamics investigation of the lubrication mechanism of carbon nano-onions. *Computational materials science* 54 (2012). Elsevier B.V. – P. 91-96.

7. E.Campbell. Fullerene collision reactions. Kluwer academic publishers, 2004. – 217p.

8. Корнаев, А.В. Фундаментальные вопросы проектирования свойств гидродинамической гибридной смазки / А.В. Корнаев, Л.А. Савин, С.А. Герасимов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. №1 (285). – С. 46-51.

9. Aixiang Wu Yezhi Sun. *Granular Dynamic Theory and Its Applications*. – Metallurgical Industry Press, Beijing and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2008 – 364 p.

10. Вуль, А.Я. Исследования нанотехнологии в России: от фуллеренов к нанотрубкам и нанодиамам / А.Я. Вуль, В.И. Соколов // *Российские нанотехнологии*. 2007, том 2 № 3-4 – С. 17-36.

11. Коваленко, В.И. Хамагалимов. Закономерности молекулярного строения стабильных фуллеренов. *Успехи химии*. 2006, № 75 (11) – С. 1094 – 1103.

12. Fullerene polymers. Synthesis, properties and applications. Edited by N. Martin, F. Ciacalone. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. 2009. – 331 p.

13. Горюнков, А.А. Методы синтеза, строение и реакционная способность полигалоген [60] фуллеренов / А.А. Горюнков, Н.С. Овчинникова, И.В. Трушков, М.А. Юровская. *Успехи химии*, №76 (4), 2007, С. 323-347.

14. J-M. Georges et. al. Nanorheology of poly isoprene solutions confined between two solid surfaces. *Tribology for energy conservation*. D.Dowson et.al. (Editors). Elsevier Science B.V. 1998. – P. 51-62.

15. Rapoport L. Slow release of fullerene-like WS₂ nanoparticles from Fe-Ni-Graphite Matrix: a self-lubricating nanopocomposite / L. Rapoport, M. Lvovsky, I. Lapsker et al. *Nano letters*. -- 2001. – V. 249/ - P. 137-140.

16. Хлебцов, Н.Г. Золотые наноструктуры с плазменным резонансом для биомедицинских исследований / Н.Г. Хлебцов, В.А. Богатырев, Л.А. Дыкман, Б.Н. Хлебцов. *Российские нанотехнологии*. 2007, том 2 № 3-4 – С. 69-86.

17. Боровинская, И.П. Технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза наноразмерных порошков тугоплавких соединений / И.П. Боровинская, Т.И. Игнатьева, В.И. Вершинников, О.М. Емельянова, В.Н. Семенова. *Российские нанотехнологии*. 2007, том 2 № 3-4 – С. 114-119.

18. S.M. Hsu. Nano-lubrication: concept and design. *Tribology International* №37. Published by Elsevier Ltd. 2004 – P. 537-545.

Корнаев Алексей Валерьевич

«Госуниверситет – УНПК»

Кандидат технических наук, доцент кафедры Мехатроника и международный инжиниринг

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (4862) 41-98-85

E-mail: rusakov@inbox.ru

Савин Леонид Алексеевич

«Госуниверситет – УНПК»

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Мехатроника и международный инжиниринг

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (4862) 41-98-85

E-mail: savin@ostu.ru

Степанов Юрий Сергеевич

«Госуниверситет – УНПК»

Доктор технических наук, профессор кафедры Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. 8(4862) 47-50-71

E-mail: stepanov@ostu.ru

A.V. KORNAEV, L.A. SAVIN, Y.S. STEPANOV

NANOTECHNOLOGIES IN ADVANCEMENT OF HYDRODYNAMIC THEORY OF LUBRICATION

The paper is devoted to discussing trends in hydrodynamic theory of lubrication according to advances and perspectives in nanotechnologies.

Keywords: tribology; hydrodynamic theory of lubrication, mechanics of continua, molecular dynamics, rheology; viscosity, adhesion, hybrid friction, nanotechnology, nanolubrication, fullerene, fullerene-like material.

BIBLIOGRAPHY

1. Savin, L.A. Modelirovanie rotornykh sistem s oporami zhidkostnogo trenija: monogr. / L.A. Savin, O.V. Solomin. – M.: Mashinostroenie-1, 2006. – 444 s.
2. Chichinadze, A.V. Trenie, iznos i smazka / A.V. Chichinadze, Je.M. Berlinger, Je.D. Braun i dr. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 567 s.
3. Myshkin, N.K. Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tehniczeskie prilozhenija tribologii / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovec. – M.: FIZMATLIT, 2007. – 368 s.
4. Guld, H. Komp'juternoe modelirovanie v fizike / H. Guld, Ja. Tobochnik. – Chast' 1. – M.: Mir, 1990. – 350 s.
5. Ginzburg B.M. Thermal and Tribological Properties of Fullerene-Containing Composite Systems. P. 2. Formation of Tribo-Polymer Films during Boundary Sliding Friction in the Presence of Fullerene C60 / B.M. Ginzburg, O.F. Kireenko, A.A. Shepelevskii, L.A. Shibaev, D.G. Tochilnikov, A.M. Leksovskii. - J. Macromol. Sci., B, Physics 2005, 44. (1), 93-115.
6. E.W. Bucholz, S.R. Phillpot, S.B. Sinnott. Molecular dynamics investigation of the lubrication mechanism of carbon nano-onions. Computational materials science 54 (2012). Elsevier B.V. – P. 91-96.
7. E.Campbell. Fullerene collision reactions. Kluwer academic publishers, 2004. – 217p.
8. Kornaev, A.V. Fundamental'nye voprosy proektirovanija svojstv gidrodinamicheskoy gibridnoj smazki / A.V. Kornaev, L.A. Savin, S.A. Gerasimov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2011. №1 (285). – S. 46-51.
9. Aixiang Wu Yezhi Sun. Granular Dynamic Theory and Its Applications. – Metallurgical Industry Press, Beijing and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2008 – 364 p.
10. Vul', A.Ja. Issledovanija nanougleroda v Rossii: ot fullerenov k nanotrubkam i nanoalmazam / A.Ja. Vul', V.I. Sokolov // Rossijskie nanotehnologii. 2007, tom 2 № 3-4 – S. 17-36.
11. Kovalenko, V.I. Hamatgalimov. Zakonomernosti molekularnogo stroenija stabil'nyh fullerenov. Uspehi himii. 2006, № 75 (11) – S. 1094 – 1103.
12. Fullerene polymers. Synthesis, properties and applications. Edited by N. Martin, F. Cicalone. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. 2009. – 331 p.
13. Gorjunktov, A.A. Metody sinteza, stroenie i reakcionnaja sposobnost' poligalogen [60] fullerenov / A.A. Gorjunktov, N.S. Ovchinnikova, I.V. Trushkov, M.A. Jurovskaja. Uspehi himii, №76 (4), 2007, S. 323-347.
14. J.-M. Georges et. al. Nanorheology of poly isoprene solutions confined between two solid surfaces. Tribology for energy conservation. D.Dowson et.al. (Editors). Elsevier Science B.V. 1998. – P. 51-62.
15. Rapoport L. Slow release of fullerene-like WS2 nanoparticles from Fe-Ni-Graphite Matrix: a self-lubricating nanocomposite / L. Rapoport, M. Lvovsky, I. Lapsker et al. Nano letters. – 2001. – V. 249/ - P. 137-140.
16. Hlebcov, N.G. Zolotyie nanostruktury s plazmennym rezonansom dlja biomedicinskih issledovanij / N.G. Hlebcov, V.A. Bogatyrev, L.A. Dykman, B.N. Hlebcov. Rossijskie nanotehnologii. 2007, tom 2 № 3-4 – S. 69-86.
17. Borovinskaja, I.P. Tehnologija samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza nanorazmernih poroshkov tugoplavkih soedinenij / I.P. Borovinskaja, T.I. Ignat'eva, V.I. Vershinnikov, O.M. Eme-ljanova, V.N. Semenova. Rossijskie nanotehnologii. 2007, tom 2 № 3-4 – S. 114-119.
18. S.M. Hsu. Nano-lubrication: concept and design. Tribology International №37. Published by Elsevier Ltd. 2004 – P. 537-545.

Kornaev Alexey Valeryevich

«State University – UNPK»

Candidate of science, docent of Mechatronics and international engineering department

302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29

Phone 8(4862) 41-98-85

E-mail: rusakor@inbox.ru

Savin Leonid Alekseevich

«State University – UNPK»

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

302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29

Phone 8(4862) 41-98-85

E-mail: savin@ostu.ru

Stepanov Yuri Sergeevich

«State University – UNPK»

Doctor of science, professor of Manufacturing engineering and design-engineering computer science department

302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29

Phone 8(4862) 47-50-71

E-mail: stepanov@ostu.ru

УДК 621.914.5

О.А. МАКАЛОВА, П.С. РУБИН, А.Н. КАЧАНОВ

ВЫБОР ВАРИАНТА ЧЕРНОВОЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС С АРОЧНЫМИ ЗУБЬЯМИ

Рассмотрены альтернативные способы обработки цилиндрических колес с арочными зубьями и выявлены наиболее эффективные для черновой и чистовой обработки. Рассмотрены схемы резания черновой обработки в целях дальнейшего совершенствования процессов и комбинирования наиболее эффективных вариантов.

Ключевые слова: арочный зуб, цилиндрическая передача, резовая головка, черновая обработка, схема резания.

Сложно представить себе такую сферу деятельности, в которой не применялись зубчатые передачи. Значительную часть зубчатых передач составляют цилиндрические зубчатые колеса с различной формой продольной линии зуба: прямозубые, косозубые, шевронные, в частности арочные (рис. 1). Из них широкое распространение получили прямозубые цилиндрические колеса, благодаря тому, что технология их изготовления является наиболее простой.

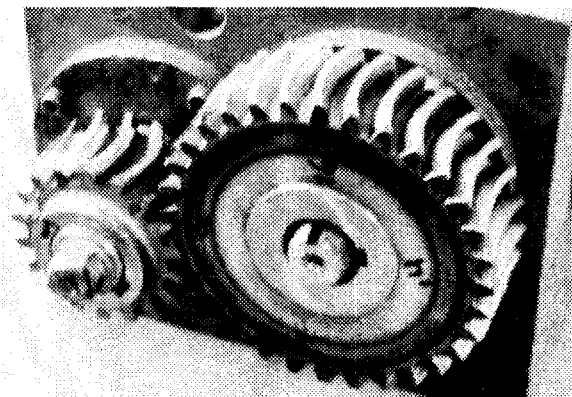


Рисунок 1 – Арочные цилиндрические зубья

Однако прямозубые цилиндрические колеса не всегда обеспечивают качественное сопряжение рабочих поверхностей из-за неточностей их изготовления и возможных перекосов в процессе сборки узлов. Избежать этого можно путем ужесточения требований к точности обработки колес и последующего их монтажа, что неизбежно приводит к дополнительным затратам времени и средств, и в итоге повышает стоимость изделий.

Задачу повышения качества машин, в состав которых входят цилиндрические зубчатые передачи можно решить путем замены прямых зубьев криволинейными. Арочная форма зубьев в сравнении с другими формами превосходит их по плавности, долговечности; обладает повышенной нагрузочной способностью и имеет низкий уровень шума. До настоящего времени использование таких колес в машиностроении не наблюдалось исключительно из-за отсутствия технологии, а не по причине их недостатков или каких-то ограничений. Ни к чему не приводили попытки нарезать арочные колеса, которые имели бы постоянный эвольвентный профиль в любом сечении, перпендикулярных оси вращения.

На данный момент с поставленной задачей успешно справились сотрудники Рязанского филиала МГОУ, предложив запатентованную технологию, обеспечивающую изготовление арочных венцов шестой степени точности по ГОСТ 1643-81 с числом зубьев от 12 до 100, с модулями от 3 до 12мм, с шириной венцов до 200мм и шероховатостью от Ra 1,1 до 2,5мкм. Согласно этой технологии резание колеса выполняется тремя последовательно сменяющимися резовыми головками с нулевым углом профиля на четырех координатных фрезерных станках с ЧПУ или токарно-обрабатывающих центрах, на которых путем интер-

полюции по двум координатам осуществляют движение обката заготовки и режущего инструмента (рис.2). Причем такое разделение необходимо для того, чтобы формообразующая точка инструмента в обоих случаях вращалась вокруг оси резцовой головки с одним и тем же радиусом r_0 . При таком способе обеспечивается получение эвольвентных арочных зубьев с постоянной шириной зуба по делительному диаметру в осевом сечении по всей длине[5].

Однако, при обработке арочных зубьев цилиндрических колес среднего и крупного модулей возникает проблема черновой обработки, так как при радиальном прорезании впадины резцовой головкой с нулевым углом профиля остается большой объем металла, который необходимо удалять дополнительными проходами до момента достижения размеров поверхности припусков на чистовую обработку, что повлечет увеличение трудоемкости операции и как следствие конечной стоимости изделия.

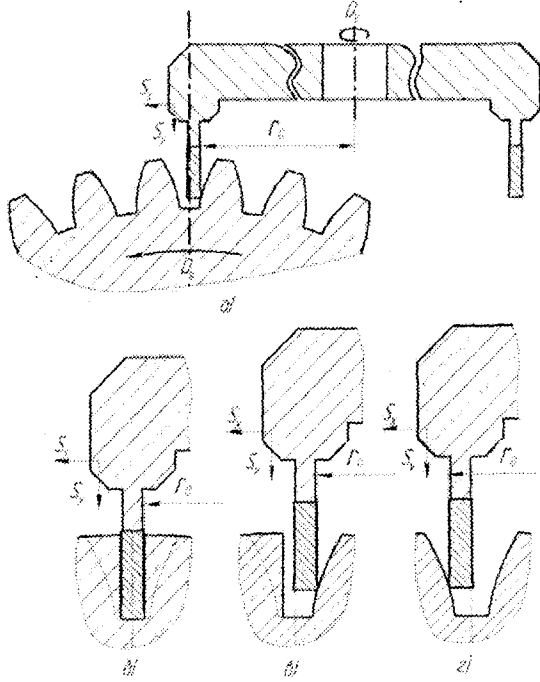
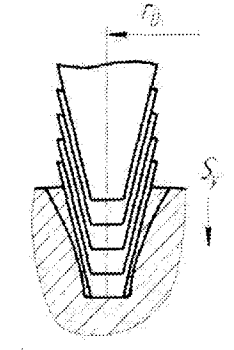
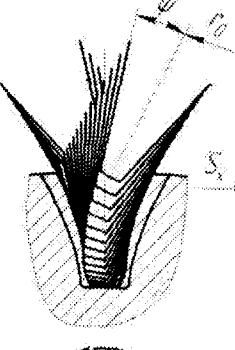
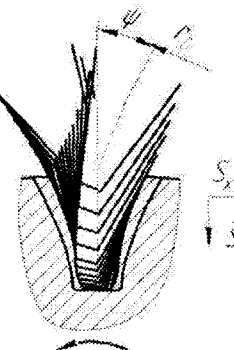
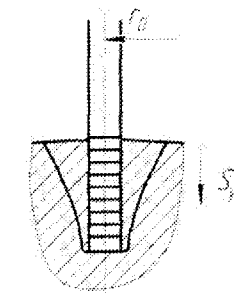
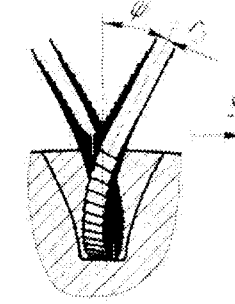
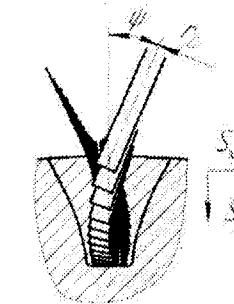
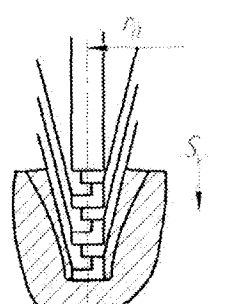
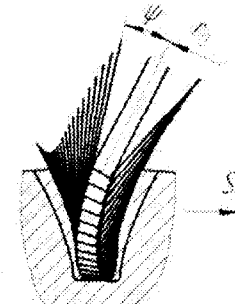
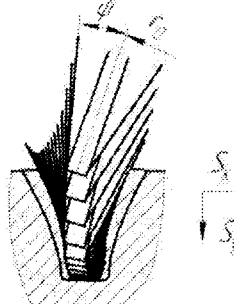


Рисунок 2 – Обработки арочного зубчатого колеса резцовой головкой
 а, б – формирование впадины; в, г – формирование выпуклой и вогнутой стороны зуба

Перспективным направлением повышения производительности обработки арочных зубьев цилиндрических колес является комбинирование способов чистовой и черновой обработки с различными схемами резания. Так для черновой обработки целесообразно применять зуборезные резцовые головки для конических передач с круговыми зубьями с радиальной подачей, обкатыванием или комбинированной подачей. Для чистового обработки применяется способ формообразования рабочей поверхности точкой на вершине угла режущей кромки зуба резцовой головки. Также данную резцовую головку с нулевым углом профиля возможно использовать и при черновой обработке в сочетании с различными способами подачи инструмента и заготовки. Возможные варианты черновой обработки арочных зубьев цилиндрических колес представлены в таблице 1.

Для схем резания С11, С21, С31 методы образования образующей линии происходит копированием профиля режущих кромок инструмента, который движется по направляющей линии, образованной – следом. При реализации процесса нарезания арочных зубчатых колес необходимы движение скорости резания и движение деления заготовки на один зуб. Следовательно, можно обойтись универсальным вертикально-фрезерным станком с использованием дополнительного приспособления расширяющего технологические возможности станка, например, универсально-делительная головка.

Таблица 1 - Схемы удаления припуска на черновую обработку

<i>Схемы резания обработанные радиальной подачей</i>	<i>Схемы резания обработанные тангенциальной подачей</i>	<i>Комбинированные схемы резания</i>
		
<i>Профильная</i> (1)	<i>Обкат</i> (2)	<i>Профильная с обкатом</i> (3)
		
<i>Генераторная</i> (2)	<i>Обкат</i> (2)	<i>Генераторная с обкатом</i> (3)
		
<i>Прогрессивная</i> (3)	<i>Обкат</i> (3)	<i>Прогрессивная с обкатом</i> (3)

Для остальных схем резания образующая линия формируется методом обката и направляющая линия методом касание. В этом случае потребуется оборудование воспроизводящее сложное движения подачи. В качестве такого оборудования могут выступать обрабатывающие центры.

Из таблицы видно, что заданную поверхность можно обработать несколькими методами, необходимо производить выбор оптимального вида обработки, учитывая особенности качественных показателей, уровень и тип производства. Оптимальный вариант обработки можно выбирать по таким критериям, как количество формообразующих движений, конфигурация поперечного сечения срезаемого слоя, возможность использовать при обработке несколько зубьев одновременно и себестоимость изготовления др.

При реализации *профильных* схем резания обработка осуществляется на универсальных вертикально-фрезерных станках с применением зуборезных резовых головок для конических передач с круговыми зубьями.

Для данных схем резания очевидны такие недостатки, как одновременная работа трех лезвий: входное и выходное лезвие нагружено неравномерно, что приводит к повышенному износу режущих кромок.

Для *генераторных* схем основная нагрузка приходится на основное режущее лезвие, боковые кромки которых выполняют вспомогательную роль.

При осуществлении обката появляются характерные признаки заблокированного резания, причем входное и выходное боковые лезвия имеют неравномерную нагрузку.

Прогрессивные схемы позволяют уйти от недостатков заблокированного резания. Практически каждая кромка работает в режиме свободного резания, что может привести к существенному уменьшению сил резания и увеличению стойкости инструмента.

На основании проведенного экономического анализа оборудования и оснастки, применяемых для реализации схем резания можно сделать вывод, что наиболее производительным и относительно дешевым способом обработки зубчатых колес с арочными зубьями будет по схеме С31 с использованием 4-х координатного вертикально-фрезерного станка с ЧПУ. Использование вертикально-фрезерного оборудования предполагает вертикальную компоновку, при которой требуется меньше производственных площадей, меньше оборудования для транспортировки сырья, короче путь перемещения сырья и готовой продукции, меньше «застойных зон», но хуже условия для монтажа и демонтажа оборудования, текущего обслуживания производственной линии.

Обработка колеса по выбранной схеме почти в 2 раза производительней по сравнению с другими схемами, срезается максимальное количество металла за достаточно короткое время; и к тому же не требуется дорогостоящего оборудования и специального инструмента, поскольку используется зуборезная головка по ГОСТ-11902-77.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобков, М.Н. Анализ методов фрезерования арочных зубьев цилиндрических колес / М.Н. Бобков // Известия ТулГУ. Серия Машиностроение. - Тула: ТулГУ, 1998.
2. Бобков, М.Н. Теоретические аспекты технологии изготовления цилиндрических колес с арочными зубьями // Автореферат д-ра техн. наук.: ТулГУ, 1998.
3. Паршин, А.Н. Разработка методов анализа, синтеза зацепления и изготовления арочных цилиндрических зубчатых колес. Автореферат канд. техн. наук. Москва, 2008. 160 с.
4. Патент РФ №2404030 Способ изготовления цилиндрических колес с арочными зубьями// Авт. изобрет. В.Д. Шахтин, И.Г. Панков, А.П. Давыдов, Р.Б. Марголит, А.Н. Паршин, С.И. Липатов – Приоритет изобретения 16.04.2009 № 2009114308; Оpubл. 20.11.2010 Бюл. №32.
5. Макалова, О.А. Оборудование и инструмент для изготовления колес с арочными зубьями/ О.А. Макалова, П.С. Рубин// Научно-технический журнал: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии- №3-3(293). 2012.

Макалова Ольга Александровна

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

Магистрант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Тел: (4862) 55-55-24, 54-15-19

E-mail: forward-16@mail.ru

Рубин Павел Сергеевич

ФГОУ ВПО «Государственный университет-учебно-научно-производственный комплекс»
Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
Тел: (4862) 55-55-24, 54-15-19
E-mail: paulus_rub@mail.ru

Качанов Александр Николаевич

Государственный университет - УНПК
Заведующий кафедрой электрооборудования и электроснабжения, доктор технических наук, профессор
Телефон: (4862) 41-98-53
E-mail: kan@ostu.ru

O.A. MAKALOVA, P.S. RUBIN, A.N. KACHANOV

**THE CHOICE OF ROUGH MACHINING
OF CYLINDRICAL WHEELS WITH ARCHED TEETH**

Considers alternative ways of processing of cylindrical wheels with arched teeth and identified the most effective for roughing and finishing. Considered the scheme cutting rough machining in order to further improve processes and a combination of the most effective options.

Keywords: tooth arch, cylindrical transfer, premaxillary head, rough handling, cutting scheme.

BIBLIOGRAPHY

1. Bobkov M.S. Analysis of the methods of milling the arch of a tooth wheels// proceedings of the TSU. A Series Of Engineering. - Tula: TSU, 1998.
2. Bobkov M.S. Theoretically aspects of the technology of manufacturing of the cylindrical wheels with arched teeth // abstract of Dr. of technical Sciences.: TSU, 1998.
3. Parshin A.. Development of methods of analysis, synthesis coupling and manufacture of arch cylindrical gears. The author's abstract of candidate of technical Sciences. Moscow, 2008. 160 p.
4. Patent of Russian Federation №2404030 Method for the manufacture of cylindrical wheels with arched teeth// Auto invention E. Plahtin I.G. Pankov, AP. Davydov, R.B.. Margolit. A.N. Parshin. S.. Lipatov - the Priority of an invention 16.04.2009 doing № 2009114308; Publ. 20.11.2010 Byull. №32.
5. Makalova O.A., Rubin P.S. Equipment and tools for production of wheels with arched teeth/ O.A. Makalova, P.S. Rubin //Scientific-technical magazine: Fundamental and applied problems of techniques and technologies- №3-3(293), 2012.

Makalova Olga Aleksandrovna

The M.Eng. of the Department "Technology of Machine Building and Design Technology Computer Science " FSEI HVT «State University – ESPC»,
«Mechanical engineering and design-engineering informatics», Orel
Phone: (4862) 55-55-24, 54-15-19
E-mail: forward-16@mail.ru

Rubin Pavel Sergeevich

The postgraduate of the Department "Technology of Machine Building and Design Technology Computer Science " FSEI HVT «State University – ESPC»,
«Mechanical engineering and design-engineering informatics», Orel
Skew fields: (4862) 55-55-24, 54-15-19
E-mail: paulus_rub@mail.ru

Kachanov Alexandr Nikolaevich

FSEI HVT «State University – ESPC»
Head of the department of electrical and power
Doctor of Technical Sciences, Professor
Phone: (4862) 41-98-53
E-mail: kan@ostu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО КОЛИЧЕСТВА ПЕРЕТОЧЕК ДОЛБЯКОВ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ КОЛЕС С ВНУТРЕННИМИ ЗУБЬЯМИ НЕЭВОЛЬВЕНТНОГО ПРОФИЛЯ

В статье рассмотрена методика профилирования долбяков. Приведено исследование задней поверхности долбяков трех профилей: прямоугольный, треугольный и циклоидальный. Выведены уравнения соответствующих задних поверхностей. На основе этих уравнений разработана методика определения величины стачиваемого слоя для долбяков соответствующих профилей. По предлагаемой методике рассчитаны величины стачиваемого слоя и количество допустимых переточек долбяков неэвольвентных профилей. Сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: долбяк, неэвольвентный профиль, переточка, задняя поверхность, схема обката, профилирование

В современном машиностроении активно применяются колеса с внутренними зубьями неэвольвентного профиля. Практически единственным способом сочетающим производительность и точность обработки зубчатого венца является зубодолбление [1,2]. Одно из проблем производства зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля является профилирование долбяка.

Методика формообразования долбяков для обработки колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля основана на трехмерном математическом отображении схемы резания и строится по единому алгоритму для всех исходных профилей, имея математический аппарат, адаптированный для создания САПР.

Процесс формообразования или обработка зубчатой поверхностью 1 профиля долбяка 2 (рис. 1), представлен выражением, описывающим положение каждой точки профиля впадины колеса в любой момент обработки.

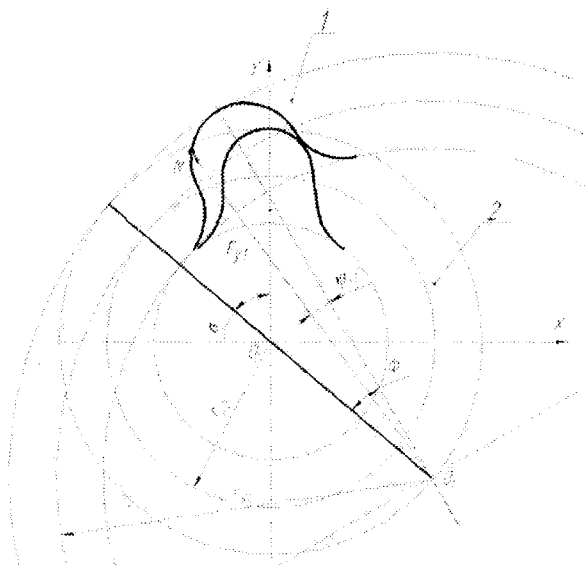


Рисунок 1 – Определение положения впадины колеса с внутренними зубьями 1 относительно зуба долбяка 2

Исходными данными при профилировании долбяка являются профиль впадины, количество зубьев z_1 , радиус основной окружности r_{b1} , радиус окружности выступов r_{a1} и радиус окружности впадин r_{f1} зубчатого колеса с внутренними зубьями, количество зубьев долбяка z_0 .

Уравнение траектории перемещения любой точки впадины зубчатого колеса с внутренними зубьями относительно долбяка получим проектируя отрезки O_0O_1 и O_0N на координатные оси (рис. 1):

$$\begin{aligned} X &= -a_w \sin[U_1(\Phi + \Delta\Phi)] + r_{y1} \sin[(U_1 - 1)(\Phi + \Delta\Phi) + \psi_{y1}]; \\ Y &= -a_w \cos[U_1(\Phi + \Delta\Phi)] + r_{y1} \cos[(U_1 - 1)(\Phi + \Delta\Phi) + \psi_{y1}]; \\ Z &= l, \end{aligned}$$

где a_w - межосевое расстояние долбяка и зубчатого колеса с внутренними зубьями,

U_1 - отношение числа зубьев колеса к числу зубьев долбяка,

Φ - угол определяющий положение впадины колеса относительно межосевого расстояния,

$\Delta\Phi$ - элементарный угол поворота за время двойного хода долбяка:

$$\Delta\Phi = \frac{S_{кр}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L}\right)$$

где $S_{кр}$ - окружная подача,

r_0 - радиус делительной окружности долбяка,

r_{y1} - радиус – вектор точки на впадине зубчатого колеса с внутренними зубьями;

ψ_{y1} - угол между радиус – вектором точки впадины зубчатого колеса с внутренними зубьями и осевой линией.

Параметры r_{y1} и ψ_{y1} определяются из выражений:

$$\begin{aligned} r_{y1} &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \\ \psi_{y1} &= \arcsin\left(\frac{x_i}{r_{y1}}\right) \end{aligned}$$

где x_i и y_i координаты точки профиля впадины зубчатого колеса с внутренними зубьями.

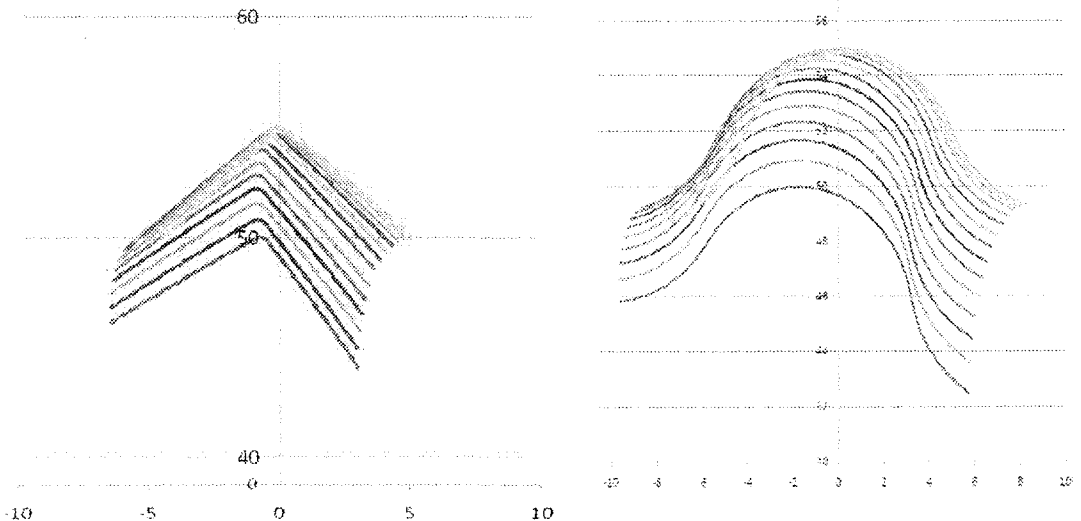


Рисунок 2 – Результаты профилирования

Профиль впадины зубчатого колеса с внутренними зубьями задается в торцевом сечении. Образующие всех профилей, применяемых в машиностроении, описываются простейшими алгебраическими кривыми (прямая, дуга окружности, эллипс, эвольвента и др.) [3].

По данной методики были спрофилированы долбяки треугольного и циклоидального профиля. Полученные профили представлены на рисунке 2.

После решения задач профилирования инструмента становится актуальной задача определения допустимого количества переточек долбяка. Повышение числа возможных переточек значительно повысит срок службы долбяков. Благодаря этому снизятся расходы на режущий инструмент и соответственно повысится экономический эффект. В современной литературе нет четкой методики определения величины стачиваемого слоя для долбяков незвольвентного профиля, поэтому становится актуальной разработка методики определения величины стачиваемого слоя для незвольвентных долбяков.

Для разработки методики определения величины стачиваемого слоя приведем исследование геометрии задней поверхности долбяков незвольвентного профиля и выведем общее уравнение этих поверхностей. На рисунке 3 представлена задняя поверхность долбяков для трех профилей.

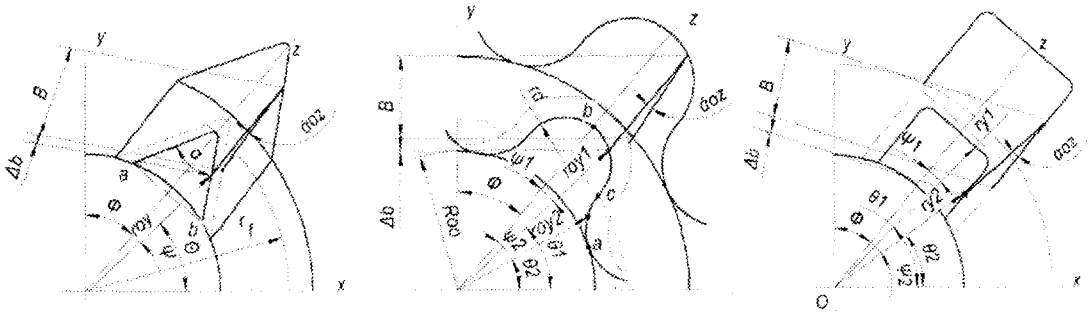


Рисунок 3 – Задняя поверхность долбяков незвольвентного профиля

Представим заднюю поверхность долбяка как винтовую поверхность описываемую уравнениями (1), (2), (3).

$$X = r_a \cdot \cos(\alpha - \arctg \frac{r_d \cdot \sin(\alpha)}{r_{oo} + r_d \cdot \cos(\alpha)}) + r_{oo} \cdot \cos(\arctg \frac{r_a \cdot \sin(\alpha)}{r_{oo} + r_d \cdot \cos(\alpha)}) \pm \Delta b \cdot \operatorname{tg} \alpha \cos z \cdot \cos(90 - (\dot{O} + \Psi)) \pm \arctg(\Delta b \cdot \operatorname{tg} \alpha \cos z) \quad (1)$$

$$Y = r_a \cdot \cos(\alpha - \arctg \frac{r_d \cdot \sin(\alpha)}{r_{oo} + r_d \cdot \cos(\alpha)}) + r_{oo} \cdot \cos(\arctg \frac{r_a \cdot \sin(\alpha)}{r_{oo} + r_d \cdot \cos(\alpha)}) \pm \Delta b \cdot \operatorname{tg} \alpha \cos z \cdot \sin(90 - (\dot{O} + \Psi)) \pm \arctg(\Delta b \cdot \operatorname{tg} \alpha \cos z) \quad (2)$$

$$Z = \Delta b \quad (3)$$

Методика определения величины стачиваемого слоя заключается в следующем:

1 Делаем n-ос количество торцевых сечений (рис. 4). Исходным сечением будет спрофилированное сечение по вышеизложенной методики.

2 Проверяем точность нарезания в положительных и отрицательных сечениях, которые будут отличаться от спрофилированного сечения на величину дельтаб(в + и в-), которая равна величине износа долбяка по ГОСТ 6762 - 79 0,5 мм. Для этого строим схему обката зубчатого колеса долбяком.

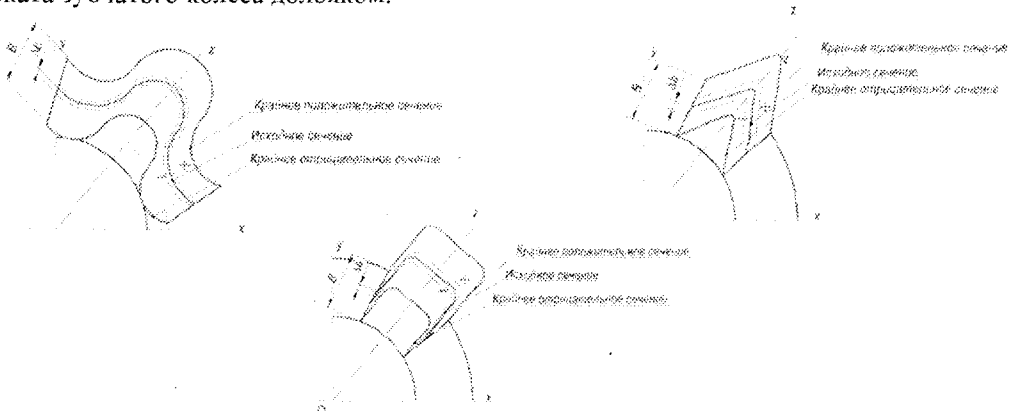


Рисунок 4 – Торцевые сечения по задней поверхности долбяка

Математическое отображение в общем виде для колес с внутренними зубьями представлено в виде:

$$\begin{aligned} X &= -a_{\omega 0} \sin [U_0 (\dot{O} + \Delta \dot{O})] + f(r_y) \sin [(1 - U_0)(\dot{O} + \Delta \dot{O}) + f(\psi)]; \\ Y &= -a_{\omega 0} \cos [U_0 (\dot{O} + \Delta \dot{O})] + f(r_y) \cos [(1 - U_0)(\dot{O} + \Delta \dot{O}) + f(\psi)]; \end{aligned} \quad (1)$$

$$Z = l.$$

где $a_{\omega 0}$ - межосевое расстояние долбяка и обрабатываемого колеса,

U_0 - отношение числа зубьев долбяка к числу зубьев колеса,

Φ - угол, определяющий положение зуба долбяка относительно межосевого расстояния,

$\Delta \Phi$ - элементарный угол поворота за время двойного хода долбяка,

$$\Delta \dot{O} = \frac{S_{\text{дд}}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L} \right)$$

$f(r_y)$ и $f(\psi)$ - согласованные функции от радиус вектора точки профиля зуба долбяка и угла, определяющего его положение относительно линии симметрии зуба.

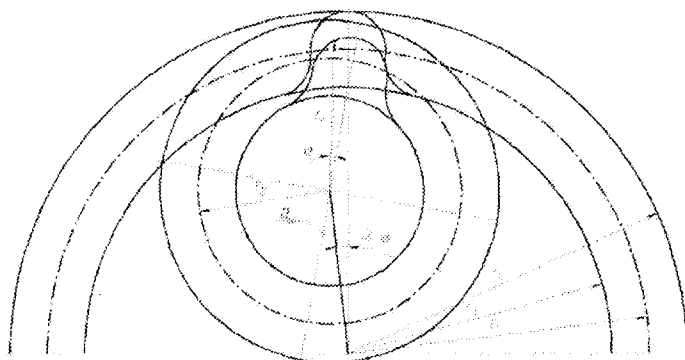


Рисунок 5 - Определение положения зуба долбяка относительно впадины колеса с внутренними зубьями

Полученный при обкате профили детали сравниваем с эталонным колесом по стандарту (рис. 6.). Расстояние между крайним положительным и крайним отрицательным сечением (в которых точность нарезаемых колес находится в пределах нормы) по торцу будет являться допустимой величиной стачивания долбяка.

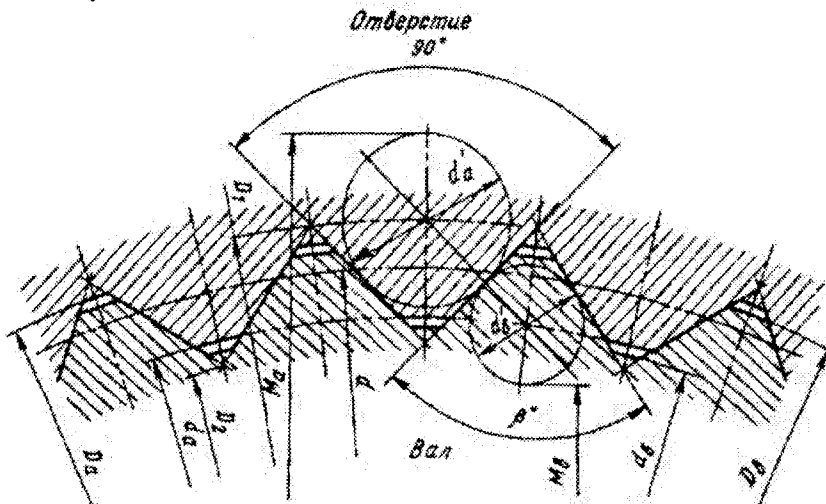


Рисунок 6 - ОСТ на соединения зубчатые треугольного профиля

Основные размеры треугольных соединений, мм

Номинальный диаметр D_B	Число зубьев z	Угол β^0	Диаметр по вершинам	
			Наружний D_1	Внутренний D_2
75	48	82,5	75,860	70,736

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

Исследование проводилось для долбяков треугольного, прямоугольного и циклоидального профиля, высота зубьев $h=5$, число зубьев $z=19$.

У долбяков треугольного профиля (боковой задний угол 2^0) при положительном исходном расстоянии 4 мм. и при отрицательном исходном расстоянии 5 мм., точность нарезаемых колес не выходит за пределы установленных норм. Следовательно сумма положительного и отрицательного исходных расстояний равна 9. Таким образом, долбяк можно переточить 18 раз.

Установлено количество переточек долбяков для нарезания колес с внутренними зубьями незвольвентного профиля, позволяющее увеличить стойкость долбяка без снижения точности обрабатываемых колес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов, Р.В. Современные технологии и оборудование для зубодолбления колес с внутренними зубьями [Текст] / Анисимов Р.В., Тарапанов А.С. // Региональная научно-практическая конференция молодых ученых и аспирантов «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России» - Орел, 2010. – С. 4-8
2. Анисимов, Р.В. Математическое отображение схемы обката для профилирования долбяков обрабатываемых колеса с внутренними зубьями незвольвентного профиля. [Текст] / Анисимов Р.В., Ревенков А.А. // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»: - №2/3 -Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2011. – С. 18-22
3. Анисимов, Р.В. Совершенствование технологического оснащения для нарезания колес с внутренними зубьями незвольвентного профиля [Текст] /Р.В. Анисимов, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов/ // «Научкоемкие технологии в машиностроении»-№5- М.: Машиностроение, 2012. – С. 9-15
4. Анисимов, Р.В. Математическое отображение схемы обката для профилирования долбяков обрабатываемых колеса с внутренними зубьями незвольвентного профиля / Р.В. Анисимов, А.А. Ревенков // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»: - №2/3 -Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2011. – С. 18-22

Ревенков Александр Александрович

Государственный УНИК, г. Орел
Аспирант
Тел. 48-18-84
E-mail: sascha.revenkov@yandex.ru

Анисимов Роман Викторович

Государственный УНИК, г. Орел
Кандидат технических наук
Тел. 48-18-84
E-mail: roman.anisimov@bk.ru

A.A. REVENKOV, R.V. ANISIMOV

DETERMINATION OF AMOUNT ALLOWED REGRINDING CUTTER FOR CUTTING THE INTERNAL GEAR NOT INVOLUTE PROFILE

In the article the technique of profiling cutters. Study shows the back of the cutters of three profiles: square, triangle, and cycloid. The equations of the respective rear surfaces. Based on these equations the method of determining the value of the layer to grind down the cutters respective profiles. According to the proposed method the amount to grind off a layer and the number of valid regrinding cutters not involute profiles. Corresponding conclusions.

Keywords: ram, not involute profile, regrinding, the rear surface, the scheme of rounding, profiling.

BIBLIOGRAPHY

1. Anisimov, R.V. Sovremennye tehnologii i oborudovanie dlja zubodolblenija koles s vnutrennimi zub'jami [Tekst] / Anisimov R.V., Tarapanov A.S. // Regional'naja nauchno-prakticheskaja konferencija molodyh uchenyh i aspirantov «Nauchnyj potencial Orlovshhiny v modernizacii promyshlennogo kompleksa malyh gorodov Rossii»- Orel, 2010. – S. 4-8

2. Anisimov, R.V. Matematicheskoe otobrazhenie shemy obkata dlja profilirovanija dolbjakov obrabatyvajushhijh kolesa s vnutrennimi zub'jami nejevol'ventnogo profilja. [Tekst] / Anisimov R.V., Revenkov A.A.// «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii»: - №2/3 -Orel: IPC OreIGTU, 2011. – S. 18-22

3. Anisimov, R.V. Sovershenstvovanie tehnologicheskogo osnashhenija dlja narezanija koles s vnutrennimi zub'jami nejevol'ventnogo profilja [Tekst] /R.V. Anisimov, A.S. Tarapanov, G.A. Harlamov/ / «Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii»-№5- M.: Mashinostroenie, 2012. – S. 9-15

4. Anisimov, R.V. Matematicheskoe otobrazhenie shemy obkata dlja profilirovanija dolbjakov obrabatyvajushhijh kolesa s vnutrennimi zub'jami nejevol'ventnogo profilja / R.V. Anisimov, A.A. Revenkov // «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii»: - №2/3 -Orel: IPC OreIGTU, 2011. – S. 18-22

Revenkov Alexander Aleksandrovich

State university UNPK. Eagle

Graduate student

Ph. 48-18-84

E-mail: sascha.revenkov@yandex.ru

Anisimov Roman Viktorovich

State university UNPK. Eagle

Candidate of Technical Sciences

Ph. 48-18-84

E-mail: roman.anisimov@bk.ru

Н.В. ТАТАРЧЕНКОВ, Ю.С. МЕЛЬНИКОВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГИБКА ТРУБЫ ПО КРУГЛОМУ КОПИРУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОРНА

Предложена методика определения утонения стенки трубы при изгибе наматыванием на копир и расчет изменения высоты сечения в зависимости от положения дорна.

Ключевые слова: гибка труб, круглый копир, дорн.

Гибка труб наматыванием на круглый копир является основным способом получения изогнутых участков трубопроводов машиностроительного назначения. Применение дорна для уменьшения овальности сечения, приобретаемой при гибке, усугубляет утонение стенки трубы, которое – как и овальность – жестко регламентируется техническими требованиями к изделиям.

Отладка гибочной операции включает варьирование осевого смещения δ_z дорна относительно оси копира. Увеличивая значения δ_z , можно получать проходное сечение изогнутого участка, близкое к круглому, а в принципе – даже с обратной овальностью, т.е. с высотой H , превышающей исходный диаметр трубы (hochoval [1]). При этом необходимо оперативно оценивать деформацию толщины стенки трубы, укладываясь в допустимые пределы. Наиболее простая и надежная оценка достигается измерением ячеек сетки, нанесенной на заготовку и подсчета относительных удлинений (укорочений) ε_z и ε_α . Радиальная деформация ε_r , ответственная за изменение толщины стенки t , рассчитывается из условия постоянства объема. Хотя найденное значение ε_r относится к наружной поверхности изогнутого участка, его согласно [1] можно принимать для тонкостенных труб как среднее по толщине. Погрешность данного допущения оценивалась авторами статьи при проведении опытной гибки.

Трубы из сплава Д16М с исходными размерами: диаметр $d = 30$ мм, толщина $t_0 = 1,8$ мм изгибали по копиру на радиус $R_k = 105$ мм. Делительную сетку 1x1 мм наносили лазерным мини-маркером и измеряли после деформирования с помощью инструментального микроскопа. Окружную деформацию ε_α на наружной поверхности заготовки подсчитывали по изменению ширины ячеек сетки. Перепад окружных деформаций $\Delta\varepsilon_\alpha$ по толщине t , вызванный оваллизацией сечения, пропорционален $\Delta\xi$ – изменению исходной кривизны средней линии стенки $1/r$. Значение $\Delta\xi$ в месте наибольшего утонения определяли методом параболической аппроксимации. Измеряли с помощью индикатора часового типа прогибы y_1 и y_2 образующей наружной поверхности трубы на возрастающих расстояниях x_1 и x_2 от плоскости изгиба и подсчитывали

$$\Delta\xi = 2 \frac{y_2 - y_1}{x_2^2 - x_1^2} - \frac{1}{r}.$$

При этом пренебрегали погрешностью применения данных, относящихся не к средней, а к наружной поверхности. Минимальная толщина стенки трубы определяется соотношением

$$t = t_0 \left(1 - \varepsilon_z + \frac{t}{2R} - \varepsilon_\alpha - \frac{t}{2} \Delta\xi \right),$$

содержащем деформации делительной сетки ε_z и ε_α , а также радиус изогнутой оси трубы $R = R_k + 0,5H$. Поправки $0,5t/R$ и $0,5t\Delta\xi$ приведения деформаций к средней линии стенки в полученных результатах довольно существенны. Первая эквивалентна $\sim 0,06\varepsilon_z$, вторая достигает

$0,3\varepsilon_\alpha$ ввиду сравнительно малой величины ε_α . Соотношение отрицательной окружной и положительной осевой деформаций стальных труб согласно [1] составляло около $-0,2$ при гибке с дорном и $-0,65$ – без дорна. Растяжение образцов из сплава Д16М, вырезанных из труб, обнаруживает анизотропию механических свойств, которая еще более уменьшает абсолютную величину ε_α .

Влияние смещения δ_z дорна на высоту сечения изогнутого участка H иллюстрирует рисунок 1.

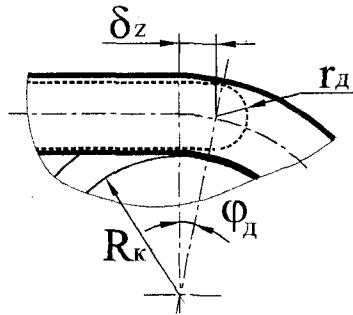


Рисунок 1 – Нормальное положение дорна

Ось дорна, показанного пунктиром, смещена реакцией трубы в направлении копира, следовательно, $\operatorname{tg} \varphi_d = \delta_z / R$, где $R = R_k + t + r_d$. Нормальным положением (Normstellung [1]) дорна считается его касание внутренней поверхности трубы с недеформированным сечением, высота которого в дальнейшем уменьшается, но не в такой степени, как при бездорновой гибке.

Увеличение высоты сечения трубы, поддерживаемого дорном, на приращении угла φ_d

$$\Delta H = R \left(\frac{1}{\cos(\varphi_d + \Delta\varphi_d)} - \frac{1}{\cos \varphi_d} \right).$$

С учетом малости тангенса угла φ_d по сравнению с единицей преобразуем эту зависимость к виду: $\Delta H = (2\delta_z \Delta\delta_z + \Delta\delta_z^2) / (2R)$, который позволяет рассчитывать приращение смещения дорна $\Delta\delta_z$, ориентируясь на необходимое увеличение высоты сечения. Подбор величины δ_z в ходе отладки гибочной операции носит характер последовательных приближений, поскольку полученная формула ΔH не учитывает дальнейшее деформирование сечения. Оно также усиливается по мере увеличения δ_z , тем не менее, сходимость итераций обеспечивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Franz, W.-D. Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen / W.-D. Franz. – Düsseldorf: VDI-Verlag. – 1988. – 237 s.

Татарченко Николай Владимирович

Госуниверситет - УНПК
Учебный мастер кафедры Автопласт
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
тел.: 8 (4862) 41-68-77
E-mail: vdovostu@mail.ru

Мельникова Юлия Сергеевна

Госуниверситет - УНПК
Аспирантка кафедры Автопласт
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
тел.: 8 (4862) 41-68-77
E-mail: vdovostu@mail.ru

N.V. TATARCHENKOV, Y.S. MELNIKOVA

EXPERIMENTAL BENDING PIPES A ROUND COPIER USING DORN

The technique of definition of thinning of the pipe wall at the bend of the winding copier and calculating changes section height depending on the provisions of the mandrel.

Keywords: flexible pipes, round copier, dorn.

BIBLIOGRAPHY

1. Franz, W.-D. Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen / W.-D. Franz. – Düsseldorf: VDI-Verlag. – 1988. – 237 s.

Tatarchenkov Nikolay Vladimirovich
State University - unpk
Master training Department Avtoplast
302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29
phone: 8 (499) 41-68-77
E-mail: vdovostu@mail.ru

Melnikova Julia Sergeevna
State University - ESPC
Postgraduate student Avtoplast
302020, Eagle, Naugorskoye Highway 29
tel.: 8 (4862) 41-68-77
E-mail: vdovostu@mail.ru

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 687.054.3.24

УДК 631.0

А.А. ЧЕРЕПЕНЬКО, А.П. ЧЕРЕПЕНЬКО, А.И. ЖАВОРОНКОВ

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗГИБА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГЛАДИЛЬНОЙ ПОДУШКИ

В статье представлено аналитическое описание, в виде математической модели, процесса изгиба рабочих поверхностей гладильных подушек в процессе эксплуатации. Полученная модель позволяет рассчитывать на ЭВМ деформации и напряжения, возникающие в рабочей поверхности подушки в процессе теплового и механического воздействия.

Ключевые слова: рабочие поверхности гладильных подушек.

При воздействии на рабочую поверхность знакопеременных механических и тепловых нагрузок в ней возникают соответствующие напряжения и происходит ее деформация. Для упрощения задачи их определения представим рабочую поверхность в форме прямоугольной пластины с началом координат в центре симметрии опорной плоскости. При этом ось O_z направлена вертикально вверх, оси O_y и O_x - вдоль осей симметрии нижней части рабочей поверхности так, чтобы система координат O_{xyz} была правой (рис. 1).

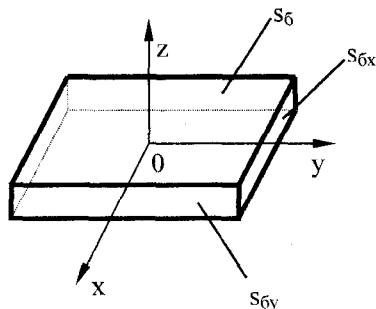


Рисунок 1 – Рабочая поверхность гладильной подушки в прямоугольной системе координат

Пусть ρ - плотность материала рабочей поверхности, $T(z)$ - распределение температуры по толщине рабочей поверхности. Тогда уравнения равновесия рабочей поверхности [1] имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = -\rho \cdot g - \alpha \cdot \frac{dT}{dz} \cdot \frac{E}{3(1-2\sigma)} \end{cases}, \quad (1)$$

где g - ускорение силы тяжести, α - коэффициент теплового расширения материала рабочей поверхности, E - модуль Юнга, σ - коэффициент Пуассона материала, ρ - плотность материала.

Предполагается, что сверху на рабочую поверхность оказывается давление P , нижняя часть ее закреплена. Учитывая это, система (1) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} \sigma_{zz}|_{(x,y,z)} \in S_b = -P \\ \sigma_{xx}|_{(x,y,z)} \in S_{\delta y} = \sigma_{yx}|_{(x,y,z)} \in S_{\delta y} = 0 \\ \sigma_{yy}|_{(x,y,z)} \in S_{\delta x} = \sigma_{xy}|_{(x,y,z)} \in S_{\delta y} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где S_b - верхняя плоскость рабочей поверхности, $S_{\delta y}$ - боковая плоскость рабочей поверхности, параллельная оси O_y , $S_{\delta x}$ - боковая плоскость рабочей поверхности, параллельная оси O_x .

Граничные условия (2) получаются из уравнений равновесий на рабочей поверхности:

$$\begin{cases} \sigma_{zx} \cdot n_x + \sigma_{zy} \cdot n_y + \sigma_{zz} \cdot n_z = f_{пов.z} \\ \sigma_{xx} \cdot n_x + \sigma_{xy} \cdot n_y + \sigma_{xz} \cdot n_z = f_{пов.x} \\ \sigma_{yx} \cdot n_x + \sigma_{yy} \cdot n_y + \sigma_{yz} \cdot n_z = f_{пов.y} \end{cases} \quad (3)$$

где $\bar{f}_{пов.}$ - поверхностная сила. На плоскости $\bar{f}_{пов.} = (f_{пов.x}, f_{пов.y}, f_{пов.z})$,

(n_x, n_y, n_z - составляющие единичного вектора внешней нормали \bar{n} к плоскости) $S_b: \bar{n} = (0, 0, 1)$, $f_{пов.z} = -P$, тогда из первого уравнения системы (3) получим первое граничное условие системы (2). На боковой плоскости $S_{\delta y}: \bar{n} = (1, 0, 0)$, $\bar{f}_{пл} = \bar{0}$, из второго и третьего уравнений системы (3) получим второе граничное условие системы (2). На боковой плоскости $S_{\delta x}$:

$\bar{n} = (0, 1, 0)$, $\bar{f}_{пл} = \bar{0}$, из второго и третьего уравнения системы (3) получим третье граничное условие системы (2). Здесь везде $\sigma_{xx} \cdot \sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$, σ_{yy} , σ_{zz} , $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$ - компоненты тензора деформации. $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}$ - напряжения на площадке, перпендикулярной оси O_x , σ_{xx} - в направлении, перпендикулярном площадке, σ_{xy}, σ_{xz} - касательные напряжения в плоскости (рис. 2) площадки.

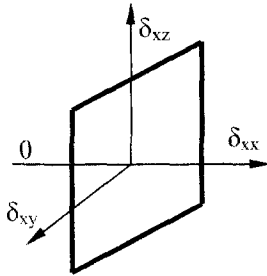


Рисунок 2 – Площадка, перпендикулярная оси O_x в прямоугольной системе координат

$\sigma_{yy} \cdot \sigma_{yx}, \sigma_{yz}$ - напряжения на площадке, перпендикулярной оси O_y , σ_{yy} - в направлении, перпендикулярном площадке, σ_{yx}, σ_{yz} - касательные напряжения в плоскости площадки.

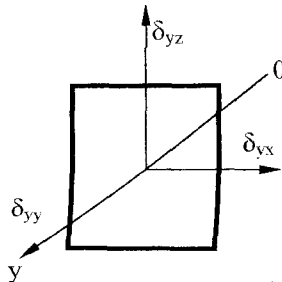


Рисунок 3 – Площадка, перпендикулярная оси O_y в прямоугольной системе координат

σ_{zz} , σ_{zx} , σ_{zy} - напряжения на плоскости, перпендикулярной оси O_z , σ_{zz} - в направлении, перпендикулярном площадке, σ_{zx} , σ_{zy} - касательные напряжения в плоскости площадки:

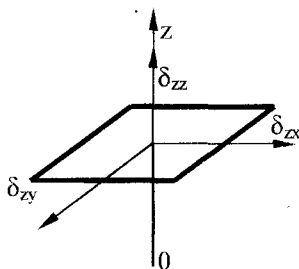


Рисунок 4 – Площадка, перпендикулярная оси O_z в прямоугольной системе координат

Система уравнений в частных производных (1) линейна, поэтому вместо нее рассмотрим две системы, первая из которых описывает деформации и напряжения при приложении внешней нагрузки, а вторая - деформации и напряжения, связанные с тепловым расширением, обусловленные градиентом температуры по толщине подушки.

Первая система имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = -\rho \cdot g \end{cases} \quad (4)$$

Граничные условия описываются уравнениями (2).

Вторая система имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = -\frac{\alpha \cdot E}{3(1 - 2\sigma)} \cdot \frac{dT}{dz} \end{cases} \quad (5)$$

Граничные условия:

$$\begin{cases} \sigma_{zz} \Big|_{(x, y, z) \in S_b} = \sigma_{zz} \Big|_{(x, y, z) \in S_n} = 0 \\ \sigma_{xx} \Big|_{(x, y, z) \in S_{\sigma_y}} = \sigma_{yx} \Big|_{(x, y, z) \in S_{\sigma_y}} = 0 \\ \sigma_{yy} \Big|_{(x, y, z) \in S_{\sigma_x}} = \sigma_{xy} \Big|_{(x, y, z) \in S_{\sigma_x}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

где S_n - нижняя поверхность подушки.

Пусть $\sigma_{xx}^{(1)}, \sigma_{xy}^{(1)}, \sigma_{xz}^{(1)}, \sigma_{yy}^{(1)}, \sigma_{yz}^{(1)}, \sigma_{zz}^{(1)}$ - решение системы (4) при граничных условиях (2), а $\sigma_{xx}^{(2)}, \sigma_{xy}^{(2)}, \sigma_{xz}^{(2)}, \sigma_{yy}^{(2)}, \sigma_{yz}^{(2)}, \sigma_{zz}^{(2)}$ - решение системы (5) при граничных условиях (6), тогда справедливо равенство:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_{xx}^{(1)} + \sigma_{xx}^{(2)}, \quad \sigma_{yx} = \sigma_{yx}^{(1)} + \sigma_{yx}^{(2)}, \quad \sigma_{xz} = \sigma_{xz}^{(1)} + \sigma_{xz}^{(2)}, \\ \sigma_{yy} &= \sigma_{yy}^{(1)} + \sigma_{yy}^{(2)}, \quad \sigma_{yz} = \sigma_{yz}^{(1)} + \sigma_{yz}^{(2)}, \quad \sigma_{zz} = \sigma_{zz}^{(1)} + \sigma_{zz}^{(2)}. \end{aligned} \tag{7}$$

Справедливость равенств (7) легко проверяется подстановкой их в систему (1) и использованием систем (4), (5) и граничных условий (2), (6).

В начале решим систему (4) при граничных условиях (2). Удовлетворяющее граничным условиям (2) и уравнениям (4) решение имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^{(1)} &= \sigma_{yx}^{(1)} = \sigma_{xz}^{(1)} = \sigma_{yy}^{(1)} = \sigma_{yz}^{(1)} = 0 \\ \sigma_{zz}^{(1)} &= -P - \rho \cdot g \cdot (H_z - Z) \end{aligned} \tag{8}$$

H_z - толщина рабочей поверхности.

Определяем составляющие тензора деформации [1]:

$$\begin{cases} n_{xy}^{(1)} = \frac{1 + \sigma}{E} \sigma_{xy}^{(1)} = 0; \quad n_{xz}^{(1)} = \frac{1 + \sigma}{E} \sigma_{xz}^{(1)} = 0; \quad n_{yz}^{(1)} = \frac{1 + \sigma}{E} \sigma_{yz}^{(1)} = 0; \\ n_{xx}^{(1)} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx}^{(1)} - \sigma \cdot (\sigma_{yy}^{(1)} + \sigma_{zz}^{(1)})] = \frac{\sigma}{E} [P + \rho \cdot g(H_z - Z)]; \\ n_{yy}^{(1)} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy}^{(1)} - \sigma \cdot (\sigma_{xx}^{(1)} + \sigma_{zz}^{(1)})] = \frac{\sigma}{E} [P + \rho \cdot g(H_z - Z)]; \\ n_{zz}^{(1)} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz}^{(1)} - \sigma \cdot (\sigma_{xx}^{(1)} + \sigma_{yy}^{(1)})] = -\frac{1}{E} [P + \rho \cdot g(H_z - Z)]. \end{cases} \tag{9}$$

Далее имеем:

$$n_{xx} = \frac{\partial n_x}{\partial x}; \quad n_{yy} = \frac{\partial n_y}{\partial y}; \quad n_{zz} = \frac{\partial n_z}{\partial z} \tag{10}$$

(n_x, n_y, n_z - составляющие вектора деформации, т.е. смещения точек деформированного тела).

Используя уравнения (9), интегрируем уравнения (10):

$$\begin{cases} n_x^{(1)} = \frac{\sigma}{E} [P + \rho \cdot g \cdot (H_z - Z)] \cdot x \\ n_y^{(1)} = \frac{\sigma}{E} [P + \rho \cdot g \cdot (H_z - Z)] \cdot y \\ n_z^{(1)} = \frac{1}{2E} [2P \cdot Z + \rho \cdot g(2H_z \cdot Z - Z^2)] \end{cases} \tag{11}$$

Таким образом, формулы (8), (11) описывают напряжения и деформацию при нагружении подушки внешним давлением и под влиянием собственного веса.

Рассмотрим теперь систему (5) при граничных условиях (6). Используя связь тензора деформации с тензором напряжений [1], получим вместо системы уравнений (5) систему дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial^2 n_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n_x}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\sigma} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial n_x}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y} + \frac{\partial n_z}{\partial z} \right) &= 0 \\ \frac{\partial^2 n_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n_y}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\sigma} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial n_x}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y} + \frac{\partial n_z}{\partial z} \right) &= 0 \\ \frac{\partial^2 n_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n_z}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\sigma} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial n_x}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y} + \frac{\partial n_z}{\partial z} \right) &= \\ &= -\frac{2(1+\sigma)}{1-2\sigma} \cdot \alpha \cdot \frac{dT}{dz} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

В векторном виде:

$$\left(\begin{aligned} \bar{n} = (n_x, n_y, n_z), \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \operatorname{div} \bar{n} = \frac{\partial n_x}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y} + \frac{\partial n_z}{\partial z}, \\ \operatorname{grad} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \end{aligned} \right);$$

$$\Delta \bar{n} + \frac{1}{1-2\sigma} \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{n} = -\frac{2(1+\sigma)}{1-2\sigma} \cdot \alpha \cdot \operatorname{grad} T \quad (13)$$

Граничные условия для составляющих вектора деформации n_x, n_y, n_z определяются граничными условиями для напряжений (6) и условием $n_z|_{z=0} = 0$

Решение этой задачи достаточно сложно, поэтому приведем физические соображения, позволяющие упростить ее решение. При этом предположим, что рабочая поверхность представляет собой пластину (рис. 5). Рассмотрим некоторый участок пластины, перпендикулярный оси O_y на высоте Z , который при нагревании изменяет форму (рис. 6).

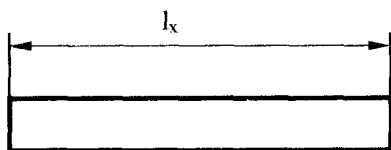


Рисунок 5 – Рабочая поверхность, представленная в виде пластины

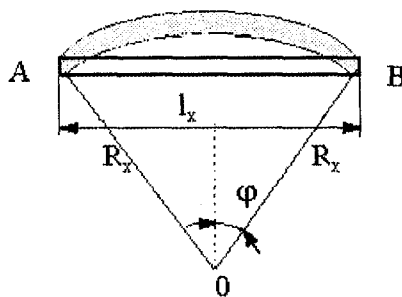


Рисунок 6 – Положение пластины (рабочей поверхности) после изменения формы

Удлинение рассматриваемого участка вдоль оси O_x равно:

$$\Delta l_x = \alpha \cdot (T(z) - T(0)) \cdot l_x.$$

Длина дуги АВ = $l_x \cdot (1 + \alpha \cdot (T(z) - T(0)))$. Для нахождения радиуса изгиба R_x

имеем уравнение:

$$2R_x \cdot \phi = l_x \cdot [1 + \alpha \cdot (T(z) - T(0))]$$

$$\sin \varphi = \frac{l_x}{2 \cdot R_x}; \quad \varphi = \arcsin \frac{l_x}{2R_x},$$

тогда

$$2R_x \cdot \arcsin \frac{l_x}{2R_x} = l_x \cdot [1 + \alpha \cdot (T(z) - T(0))],$$

или

$$\arcsin \frac{l_x}{2R_x} = \frac{l_x}{2R_x} \cdot [1 + \alpha \cdot (T(z) - T(0))] \tag{14}$$

Возьмем операцию синус от обеих частей уравнения (1):

$$\frac{l_x}{2R_x} = \sin \left[\frac{l_x}{2R_x} \cdot (1 + \alpha(T(z) - T(0))) \right].$$

Обозначим $y = \frac{l_x}{2R_x}$, тогда получим:

$$y = \sin(ky), \text{ где } k = 1 + \alpha(T(z) - T(0)). \tag{15}$$

Уравнение (2) не решается аналитически. Геометрически решение можно изобразить так:

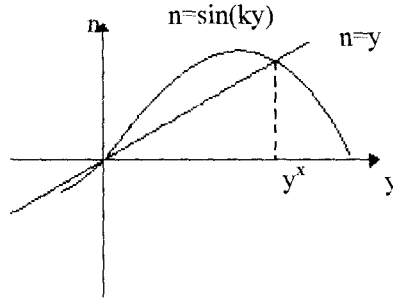


Рисунок 7 – Геометрическое представление уравнения (15)

y^* - решение уравнения (15). Для решения уравнения (15) применим численный метод решения нелинейного уравнения типа метода хорд. Рассмотрим алгоритм этого метода. Путем подбора выберем 2 точки y_0 и y_1 , удовлетворяющие условию:

$F(y_0) \cdot F(y_1) < 0$, где $F(y) = y - \sin(ky)$, т.е. на концах отрезка $[y_0, y_1]$ функция $F(y)$ принимает различные значения. Далее проводим через две точки $(y_0, F(y_0))$ и $(y_1, F(y_1))$ - прямую и находим точку пересечения этой прямой с осью O_y :

$$\frac{n - F(y_0)}{F(y_1) - F(y_0)} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0}; \quad n = 0 \Rightarrow y_2 = y_0 - \frac{F(y_0)}{F(y_1) - F(y_0)} \cdot (y_1 - y_0).$$

Далее проводим прямую через точки $(y_1, F(y_1))$ и $(y_2, F(y_2))$ и находим ее пересечение с осью O_y и т.д.

Каждое последующее приближение y_k получается при пересечении оси O_y прямой, проходящей через две точки $(y_{k-2}, F(y_{k-2}))$ и $(y_{k-1}, F(y_{k-1}))$, при этом

$$y_k = y_{k-2} - \frac{F(y_{k-2})}{F(y_{k-1}) - F(y_{k-2})} \cdot (y_{k-1} - y_{k-2}).$$

Процесс приближенного нахождения решения останавливается при условии $|y_k - y_{k-1}| < \varepsilon$, где ε - заданная точность нахождения корня. Пусть \hat{y} - приближенное значение уравнения (2). Тогда

$$\hat{y} = \frac{l_x}{2\hat{R}_x}; \quad \hat{R} = \frac{l_x}{2\hat{y}},$$

где \hat{R}_x - приближенное значение радиуса изгиба.

Заметим, что $\hat{R}_x = \hat{R}_x(z)$, т.к. коэффициент согласно (15) зависит от z . Найдем теперь смещение произвольной точки x рассматриваемого участка пластины. Будем отсчитывать x вдоль оси O_x , т.е. относительно центра симметрии отрезка l_x . Отсчет угла α производим по часовой стрелке, как показано на рисунке:

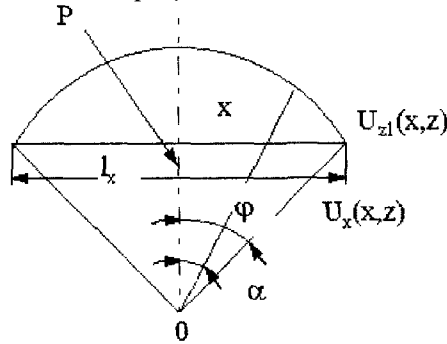


Рисунок 8 – Схема геометрического решения уравнения (15)

Тогда, как следует из рисунка, вертикальное смещение $n_{z1}(x, z)$, вызванное удлинением вдоль оси O_x равно:

$$n_{z1}(x, z) = R_x \cdot \cos \alpha - R_x \cdot \cos \varphi = R_x(z) \cdot (\cos \alpha - \cos \varphi). \quad (16)$$

Горизонтальное смещение $n_x(x, z)$, вызванное удлинением вдоль оси O_x , равно:

$$n_x(x, z) = R_x \cdot \sin \alpha - x = R_x(z) \cdot \sin \alpha - x. \quad (17)$$

Выражая $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ через координату x , имеем:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{R \cdot \cos \varphi}; \quad \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{x^2}{R_x^2 \cdot \cos^2 \varphi}}} = \frac{R_x \cdot \cos \varphi}{\sqrt{R_x^2 \cdot \cos^2 \varphi + x^2}}.$$

Введем величину d_{zx} - расстояние от центра изгиба O до точки P , тогда $R_x \cdot \cos \varphi = d_{zx}$.

$$d_{zx} = R_x \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} = R_x \cdot \sqrt{1 - \frac{l_x^2}{4R_x^2}} = \frac{\sqrt{4R_x^2 - l_x^2}}{2}.$$

Тогда

$$\cos \alpha = \frac{d_{zx}}{\sqrt{d_{zx}^2 + x^2}}, \quad \sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \frac{x}{\sqrt{d_{zx}^2 + x^2}} \quad (18)$$

Подставляя соотношения (18) в формулы (16), (17), получим:

$$n_{z1}(x, z) = R_x(z) \cdot \left(\frac{d_{zx}}{\sqrt{d_{zx}^2 + x^2}} - \frac{d_{zx}}{R_x(z)} \right) = R_x(z) \cdot d_{zx} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{zx}^2 + x^2}} - \frac{1}{R_x(z)} \right) \quad (19)$$

$$n_x(x, z) = \frac{R_x(z) \cdot x}{\sqrt{d_{zx}^2 + x^2}} - x = x \cdot \left(\frac{R_x(z)}{\sqrt{d_{zx}^2 + x^2}} - 1 \right) \quad (20)$$

Рассмотрим теперь некоторый участок пластины, перпендикулярный оси O_x на высоте z . Рассуждая аналогично предыдущему случаю, получим:

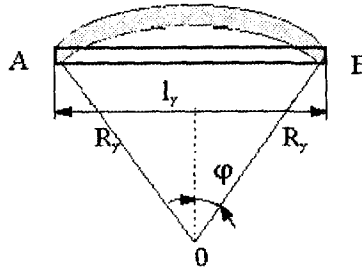


Рисунок 9 – Схема геометрического решения уравнения (15) для участка пластины

Для радиуса изгиба R_y уравнение:

$$\sin y = \sin \kappa y,$$

где $\kappa = 1 + \alpha(T(z) - T(0))$

$$y = \frac{l_y}{2R_y}; \quad \sin \psi = \frac{l_y}{2R_y}.$$

Уравнение (16) решается численным методом, рассмотренным ранее. Для смещений точки у $n_{z2}(y, z)$, $n_y(y, z)$ получаем уравнения, аналогичные (19) и (20):

$$n_{z2}(y, z) = R_y(z) \cdot d_{zy} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{zy}^2 + y^2}} - \frac{1}{R_y(z)} \right) \quad (21)$$

$$n_y(y, z) = y \cdot \left(\frac{R_y(z)}{\sqrt{d_{zy}^2 + y^2}} - 1 \right) \quad (22)$$

$$d_{zy} = R_y \cdot \cos \psi; \quad d_{zy} = \frac{\sqrt{4R_y^2 - l_y^2}}{2} \quad (23)$$

Считаем, что суммарное смещение $n_z(x, y, z)$ удовлетворяет уравнению:

$$\begin{aligned} n_z(x, y, z) &= n_{z1}(x, z) + n_{z2}(y, z) = \\ &= R_x(z) \cdot d_{zx} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{zx}^2 + x^2}} - \frac{1}{R_x(z)} \right) + R_y(z) \cdot d_{zy} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{zy}^2 + y^2}} - \frac{1}{R_y(z)} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

Смещения $n_x(x, z)$, $n_y(y, z)$ - удовлетворяют уравнениям (20) и (22), соответственно. Таким образом, уравнения (20), (22) и (24) определяют вектор деформации $n^{(2)} = (n_x(x, z), n_y(y, z), n_z(x, y, z))$. При определении формы подушки необходимо деформации, обусловленные сжатием, сложить с деформациями, обусловленными нагревом. Общий вектор деформации $n = n^{(1)} + n^{(2)}$ в деформированном состоянии при построении аналитического описания поверхности подушки необходимо имевшиеся данные $Z_{ij} = f(x_i, y_j)$ скорректировать с учетом деформации, т.е. положить:

$$\tilde{Z}_{ij} = Z_{ij} + n_z(x_i, y_j) = f\left(x_i + n_x(x_i, z_{ij})\right) y_j + n_y(y_j, z_{ij}) \quad (25)$$

По данным (25) и тем же алгоритмам строится сплайн-интерполяция поверхности подушки. Для расчета напряжений, возникающих при наличии температурного градиента, необходимо знать производные вектора деформации по координатам. Эти производные находятся из уравнений (20), (22), (24).

Имеем:

$$n_{xx} = \frac{\partial n_x}{\partial x} = \frac{R_x(z)}{\sqrt{d_{zx}^2 + x^2}} - 1 + x \cdot \left(-\frac{R_x(z) \cdot x}{\sqrt{(d_{zx}^2 + x^2)^3}} \right) =$$

$$= \frac{R_x(z)}{\sqrt{d_{zx}^2 + x^2}} \left(1 - \frac{x^2}{d_{zx}^2 + x^2} \right) - 1 = \frac{R_x(z) \cdot d_{zx}^2}{\sqrt{(d_{zx}^2 + x^2)^3}} - 1; \quad (26)$$

$$n_{yy} = \frac{\partial n_y}{\partial y} = \frac{R_y(z) \cdot d_{zy}^2}{\sqrt{(d_{zy}^2 + y^2)^3}} - 1;$$

$$n_{zz} = \frac{\partial n_z}{\partial z}.$$

При расчете величины n_{zz} следует учитывать, что функции $R_x(z)$, $R_y(z)$, d_{zx} , d_{zy} получены приближенным путем. Поэтому необходимо вычислить эти производные численно. Пусть даны значения $n_z(x, y, z_i)$, $n_z(x, y, z_{i+1})$, тогда в качестве производной берется величина:

$$\tilde{n}_{zz} = \frac{n_z(x, y, z_{i+1}) - n_z(x, y, z_i)}{z_{i+1} - z_i}.$$

Более точные производные можно получать, осуществляя сплайн-интерполяцию функции $n_z(x, y, z_i)$, $i = 0, 1, \dots, n$ согласно вышеописанным алгоритмам.

Пусть $g_z(x, y, z)$ - сплайн, решающий эту задачу. Тогда полагаем $n_{zz} = \frac{\partial g_z(x, y, z)}{\partial z}$.

Напряжения $\sigma_{xx}^{(2)}$, $\sigma_{yy}^{(2)}$, $\sigma_{zz}^{(2)}$ рассчитываются по формулам [1]:

$$\sigma_{xx}^{(2)} = \frac{E}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)} \cdot \left[(1 - \sigma) \cdot n_{xx} + \sigma \cdot (n_{yy} + n_{zz}) \right];$$

$$\sigma_{yy}^{(2)} = \frac{E}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)} \cdot \left[(1 - \sigma) \cdot n_{yy} + \sigma \cdot (n_{xx} + n_{zz}) \right]; \quad (27)$$

$$\sigma_{zz}^{(2)} = \frac{E}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)} \cdot \left[(1 - \sigma) \cdot n_{zz} + \sigma \cdot (n_{xx} + n_{yy}) \right].$$

Суммарные напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xz} , σ_{yz} :

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{(1)} + \sigma_{xx}^{(2)}; \quad \sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{(1)} + \sigma_{yy}^{(2)}; \quad \sigma_{zz} = \sigma_{zz}^{(1)} + \sigma_{zz}^{(2)};$$

$$\sigma_{xz} = \frac{E}{1 + \sigma} \cdot n_{xz} = \frac{E}{1 + \sigma} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\partial n_x}{\partial z} + \frac{\partial n_z}{\partial x} \right);$$

$$\sigma_{yz} = \frac{E}{1 + \sigma} \cdot n_{yz} = \frac{E}{1 + \sigma} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\partial n_y}{\partial z} + \frac{\partial n_z}{\partial y} \right); \quad (28)$$

$$\sigma_{xy} = 0.$$

Производные $\frac{\partial n_x}{\partial z}$ и $\frac{\partial n_y}{\partial z}$ определяются численным образом.

Полученная модель [2] позволяет рассчитывать на ЭВМ деформации и напряжения, возникающие в рабочей поверхности подушки в процессе теплового и механического воздействия согласно разработанной блок - схеме (рис. 10).

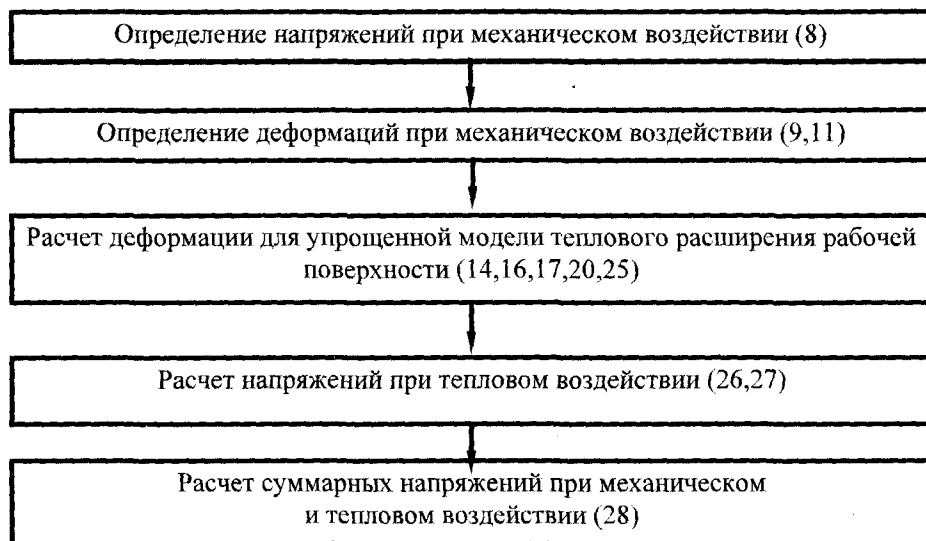


Рисунок 10 – Блок - схема расчета деформаций и напряжений возникающих в рабочих поверхностях

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау, Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – М.: Наука, 1997
2. Черепенько, А.А. Теоретические исследования процесса изменения геометрических размеров рабочих поверхностей гладильных подушек / А.А. Черепенько, Ю.С. Степанов, В.И. Малько, А.П. Черепенько // Сборник рефератов НИР и ОКР/ВИНИТИ - М., 1998.- № 678-В98. - 21с.

Черепенько Аркадий Анатольевич

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры ТМиКТИ

E-mail: arkan-68@mail.ru

Черепенько Анатолий Павлович

ФГБОУ ВПО Орловский государственный университет г. Орел

Доктор технических наук, профессор

E-mail: arkan-68@mail.ru

Жаворонков Александр Иванович

ФГБОУ ВПО Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса г. Шахты, Ростовской области

Доктор технических наук, профессор

E-mail: arkan-68@mail.ru

A.A. CHEREPENKO, A.P. CHEREPENKO, A.I. ZHAVORONKOV

ANALYTICAL RESEARCH OF THE PROCESS OF BENDING WORKING SURFACE IRONING PILLOWS

The article presents an analytical description, as a mathematical model, a process of bending work surfaces ironing pads during operation. The resulting model allows us to rely on computers strains and stresses arising in the work-ing surface of the cushion during the thermal and mechanical effects.

Keywords: work surfaces ironing pads.

BIBLIOGRAPHY

1. Landau, L.D. Teorija uprugosti / L.D. Landau, E.M. Livshic. – M.: Nauka, 1997
2. Cherepen'ko, A.A. Teoreticheskie issledovaniya processa izmeneniya geometricheskikh razmerov rabo-chih poverhnostej gladil'nyh podushek / A.A. Cherepen'ko, Ju.S. Stepanov, V.I. Mal'ko, A.P. Cherepen'ko // Sbornik referatov NIR i OKR/VINITI - M., 1998.-. № 678-V98. - 21s.

Cherepenko Arkady Anatolevich

VPO State University - ESPC Orel

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of TMI KTI

E-mail: arkan-68@mail.ru

Cherepenko Anatoly Pavlovich

VPO Orel Orel State University

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: arkan-68@mail.ru

Zavoronkov Alexander Ivanovich

VPO South-Russian State University of Economics and Service

Shakhty, Rostov Region

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: arkan-68@mail.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК: 620.179.14

П.Н. ШКАТОВ, И.В. МОСТЯЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВИХРЕТОКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Работа посвящена исследованию возможностей вихретоковой дефектоскопии при использовании магнитной жидкости для выявления в немагнитных электропроводящих объектах дефектов, расположенных с тыльной стороны относительно сканируемой поверхности.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, магнитная жидкость, дефектоскопия.

Вихретоковый метод неразрушающего контроля широко используется для дефектоскопии электропроводящих объектов [1]. К преимуществам вихретокового контроля (ВК) относятся бесконтактность, практически неограниченная скорость сканирования, простота автоматизации. Из-за скин-эффекта наибольшая чувствительность ВК достигается при выявлении поверхностных дефектов. Для выявления возможных дефектов, расположенных в контролируемом объекте с тыльной стороны относительно сканируемой поверхности, вихретоковый метод, как правило, не применяется. Это связано с экранирующим влиянием верхнего слоя металла, закрывающего дефект. Для регистрации подобных дефектов в объектах из ферромагнитных сталей успешно применяется вихретоко-магнитный метод [2-4]. Его сущность состоит в одновременном воздействии на контролируемый участок постоянным и переменным магнитными полями. При наличии дефектов, расположенных на тыльной стороне контролируемого объекта, постоянный магнитный поток перераспределяется, изменяя степень намагничивания металла над дефектом. Это приводит к появлению на сканируемой лицевой поверхности магнитных пятен, считываемых вихретоковым преобразователем (ВТП). На практике вихретоко-магнитным методом удается выявить дефекты с тыльной стороны под слоем металла до 30 мм.

При контроле качества немагнитных электропроводящих объектов удастся выявлять дефекты с тыльной стороны под слоем металла до 5 мм при использовании вихретокового преобразователя типа УВТП, разработанного в МГУИИ и используемого совместно с дефектоскопом «ЗОНД ВД-96» [5]. Отличительная особенность этого преобразователя состоит в эффективном подавлении не характерных для дефектов пространственных изменений магнитного поля в объеме чувствительной зоны ВТП. Для преобразователей типа УВТП минимальная глубина $h_{пор}$ надежно выявляемых дефектов должна составлять не менее 10 % от толщины закрывающего дефект слоя металла (остаточной толщины). Величина $h_{пор}$ может возрасти в несколько раз при увеличении электромагнитной неоднородности металла или наличии различных неоднородностей, например, сварных швов, отверстий, крепежных элементов, пазов и выступов на его тыльной поверхности.

Эффективность выявления вихретоковым методом дефектов, выходящих на тыльную поверхность контролируемого объекта, можно существенно увеличить за счет применения магнитной жидкости. Магнитные жидкости – представители класса коллоидных растворов. Они обладают свойствами обычных жидкостей и способны под воздействием магнитных полей изменять свое положение в пространстве [6].

Магнитная жидкость применяется в ультразвуковом методе неразрушающего контроля, с целью создания надежного акустического контакта между ультразвуковым преобразователем и поверхностью контролируемого ферромагнитного объекта [7]. Это особенно

эффективно при контроле изделий, имеющих сложный рельеф и произвольную ориентацию в пространстве. Магнитная жидкость заполняет под воздействием удерживающего магнитного поля пространство между поверхностью контролируемого объекта и рабочим торцом ультразвукового преобразователя, образуя звукопровод.

Для вихретоковой дефектоскопии важно то, что магнитная жидкость имеет высокую магнитную проницаемость, может заполнять полость дефектов под действием капиллярных сил, усиливаемых, при необходимости, постоянным магнитным полем.

После заполнения магнитной жидкостью полости дефектов, расположенных с тыльной стороны сканируемой поверхности, чувствительность к ним при соответствующем выборе частоты многократно возрастает. Магнитный и немагнитный объекты по-разному воздействуют на переменный магнитный поток, создаваемый ВТП. За счет магнитных свойств ферромагнетиков магнитный поток усиливается, а под действием вихревых токов в немагнитном металле – ослабляется. Это иллюстрируется известными [1] годографами нормированного по холостому ходу U_0 вносимого в накладной ВТП напряжения $\underline{U}_{\text{вн}}^* = \underline{U}_{\text{вн}}^*/U_0$, приведенными на рисунке 1. Здесь U_0 – напряжение, вносимое в измерительную обмотку ВТП возбуждающей обмоткой с током при отсутствии контролируемого объекта.

Годографы $\underline{U}_{\text{вн}}^*$ даны на рисунке 1 в функции параметров $\mu_r = \mu$ и $\beta_0 = R\sqrt{\omega\mu\sigma}$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота возбуждающего тока, μ_0 – магнитная постоянная, σ – удельная электрическая проводимость металла, $R = \sqrt{R_v R_n}$, R_v и R_n – радиусы возбуждающей и измерительной обмоток ВТП, соответственно.

На приведенном рисунке показано, что по мере увеличения β_0 , а, следовательно, и рабочей частоты f происходит изменение мнимой составляющей $\underline{U}_{\text{вн}}^*$ в сторону отрицательных значений (ослабление возбуждающего магнитного потока). В то же время, с увеличением относительной магнитной проницаемости μ наблюдается изменение мнимой составляющей $\underline{U}_{\text{вн}}^*$ в сторону положительных значений (усиление возбуждающего магнитного потока). Выбирая достаточно низкую рабочую частоту, можно добиться слабого влияния немагнитного металла ($\mu = 1$) при сохранении влияния ферромагнитного. Иначе говоря, экранирующие свойства слоя немагнитного металла, находящегося между дефектом с заполненным магнитной жидкостью полостью и ВТП (рис. 2), проявляться практически не будут. Таким образом, будет считываться прямое воздействие магнитной жидкости, заполнившей полость дефекта. Оно будет определяться объемом жидкости, расстоянием до ВТП и ее магнитной проницаемостью. Из рисунка 1 следует, что значимое увеличение $\underline{U}_{\text{вн}}^*$ происходит при росте μ до 5. В дальнейшем, при неограниченном увеличении μ , величина $\underline{U}_{\text{вн}}^*$ изменяется только на 35 %.

Широко используемая магнитная жидкость имеет относительную магнитную проницаемость $\mu = 5 \dots 7$ [7]. Таким образом, ее магнитные свойства близки к оптимальным.

Следует отметить, что контролируемый объект может иметь достаточно сложную форму поверхности, не влияющую на выявляемость дефекта.

Расчетно-теоретические исследования взаимодействия параметрического ВТП с дефектом на тыльной стороне металлической пластины выполнялись методом конечных элементов.

На рисунке 3 приведена зависимость вносимого дефектом нормированного по холостому ходу напряжения от глубины h дефекта длиной 10 мм, шириной 0,2 мм при частоте $f = 1$ кГц. Дефект находится в пластине толщиной 2 мм с удельной электрической проводимостью $\sigma = 4$ МСм/М. На диаграмме приведены зависимости для трех случаев: дефектный образец без магнитной жидкости (МЖ), дефектный образец заполнен МЖ, МЖ находится только в полости дефекта. Приведенные зависимости показывают, что в двух последних случаях дефект надежно выявляется и может быть выполнена оценка его глубины.

Зависимости $U_{\text{деф}}^*$ от частоты f приведены на рисунке 4. Они показывают, что при наличии МЖ $U_{\text{деф}}^*$ увеличивается с уменьшением рабочей частоты. Вместе с тем, уменьшение f приводит к уменьшению абсолютной величины сигнала, регистрируемого чувствительными элементами ВТП в виде катушек индуктивности. Это определяет наличие некой

оптимальной частоты контроля с учетом необходимости отстройки от эффекта формы, степень подавления которого также растет с уменьшением частоты f .

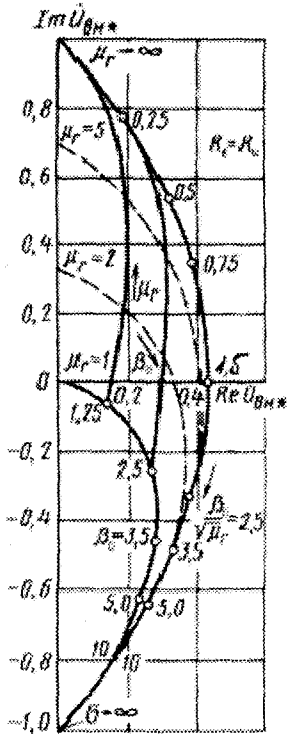


Рисунок 1 – Годографы относительного вносимого напряжения $U^*_{ан}$ накладного ВТП, расположенного над проводящей ферромагнитной и немагнитной средой

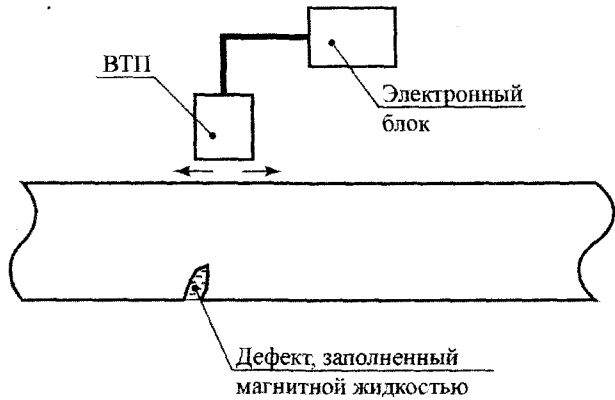


Рисунок 2 – Накладной ВТП, размещенный над немагнитной пластиной с дефектом, полость которого заполнена магнитной жидкостью

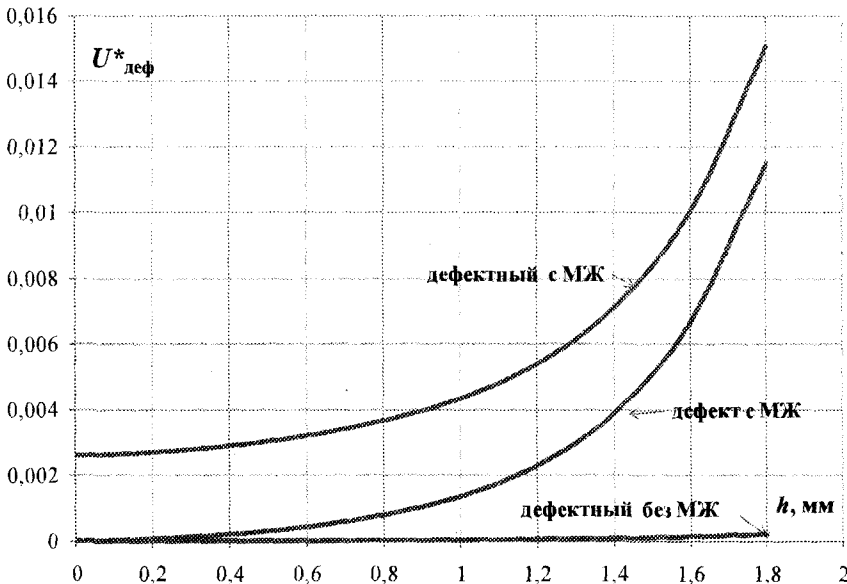


Рисунок 3 – Зависимость вносимого дефектом нормированного напряжения $U^*_{деф}$ от глубины h дефекта при разных вариантах применения МЖ
длина дефекта 10 мм, ширина – 0,2 мм, частота $f=1$ кГц, толщина пластины – 2 мм

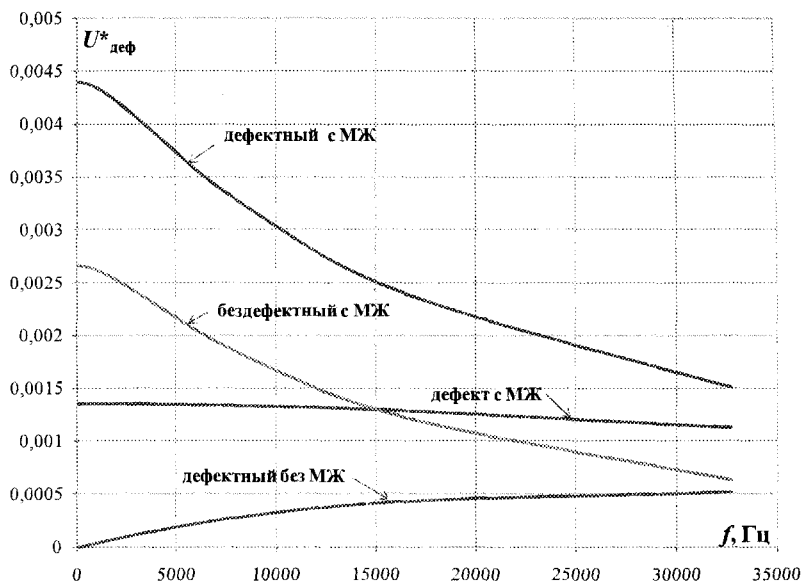


Рисунок 4 – Зависимость вносимого дефектом нормированного напряжения $U^*_{\text{деф}}$ от частоты f глубина $h = 1$ мм, длина – 10 мм, ширина – 0,2 мм, толщина металлической пластины – 2 мм

Так как вихретоковый сигнал определяется наличием магнитных частиц в полости дефекта, следует ожидать существенного влияния ширины $2b$ дефекта. На рисунке 5 приведены зависимости $U^*_{\text{деф}} = U^*_{\text{деф}}(h)$ при нескольких значениях ширины дефекта $2b$.

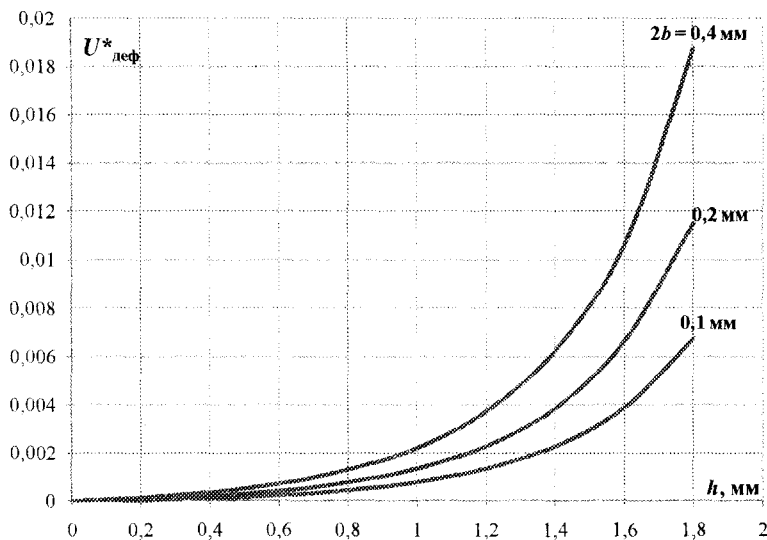


Рисунок 5 – Зависимость вносимого дефектом нормированного напряжения $U^*_{\text{деф}}$ от глубины h дефекта при разных значениях его ширины $2b$ длина дефекта 10 мм, частота $f = 1$ кГц, толщина пластины – 2 мм

Из приведенных зависимостей видно, что для трещин глубиной менее 1 мм наблюдается практически линейная связь между шириной трещины и $U^*_{\text{деф}}$. При больших значениях h степень влияния ширины несколько уменьшается. Таким образом, для трещин малой ширины вихретоковый сигнал пропорционально падает с уменьшением $2b$, что определяет предельные возможности рассматриваемого способа.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. За счет применения магнитной жидкости удается надежно отстроиться от эффекта формы при выявлении дефектов, развивающихся с тыльной стороны.

2. Чувствительность к дефектам, заполненным магнитной жидкостью и степень отстройки от эффекта формы растет с уменьшением частоты тока возбуждения ВТП.

3. Чувствительность к дефектам, заполненным магнитной жидкостью при малых значениях их ширины пропорциональна ширине дефектов.

4. Применение магнитной жидкости позволяет существенно увеличить эффективность выявления дефектов в объектах со сложной формой поверхности вихретоковым методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосенко, Ю.К. Вихретоковый контроль / Ю.К. Федосенко, П.Н. Шкатов, А.Г. Ефимов. – М.: Издательский дом «Спектр». – 2011. – 240 с.

2. Шкатов, П.Н. Комбинированные электромагнитные методы контроля / П.Н. Шкатов, С.В. Клюев. – М.: Издательский дом «Спектр». – 2011. – 280 с.

3. Shkatov P. Combining eddy-current and magnetic methods for the defectoscopy of ferromagnetic materials // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – Vol. 28. – Issue 2. – June 2013. – p. 155-165.

4. Клюев, С.В. Исследование возможности оценки коррозионного состояния толстостенных ферромагнитных объектов вихретоко-магнитным методом / С.В. Клюев, П.Н. Шкатов // *Известия ОрелГТУ, сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»*. – 2010. – № 1. – С. 17–22.

5. Волков, Б.И. Вихретоковый контроль металла в энергетике / Б.И. Волков, П.Н. Шкатов. – Челябинск.: Цицо. – 2013. – 250 с.

6. Такетоми, С. Магнитные жидкости / С. Такетоми, С. Тикадзуми. – М.: Мир, – 1993. – 272 с.

7. Баев А.Р., Майоров А.Л. Удержание магнитной жидкости между ультразвуковым преобразователем и ферромагнитным образцом / А.Р. Баев, А.Л. Майоров. – В кн.: Магнитные жидкости: научные и прикладные исследования. – Мн. – 1983. – с. 62-70.

8. Диканский, Ю.И. О магнитной проницаемости магнитодиэлектрической эмульсии / Ю.И. Диканский, А.Р. Закиян, Н.Ю. Константинова // *Журнал технической физики*. – 2008. – Т. 78. – вып. 1. – С. 21-26.

Шкатов Петр Николаевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва

Доктор технических наук, профессор

Тел. (499) 268-76-94 факс. (495) 964-91-50

E-mail: petr_shkatov@mail.ru

Мостяев Игорь Вячеславович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва

Аспирант

Тел. (499) 268-76-94

P.N. SHKATOV, I.V. MOSTYAEV

INVESTIGATION OF NEW POSSIBILITIES OF EDDY-CURRENT FLAW DETECTION USING MAGNETIC FLUIDS

The work is devoted to research possibilities of the eddy-current magnetic fluid to identify in nonmagnetic electrically conductive objects defects located on the back side on the surface being scanned.

Keywords: eddy current testing, magnetic liquid, defectoscopy.

BIBLIOGRAPHY

1. Fedosenko, Ju.K. Vihretokovyj kontrol' / Ju.K. Fedosenko, P.N. Shkatov, A.G. Efimov. – М.: Izdatel'skij dom «Spektr». – 2011. – 240 s.

2. Shkatov, P.N. Kombinirovannye jelektromagnitnye metody kontrolja / P.N. Shkatov, S.V. Kljuev. – М.: Izdatel'skij dom «Spektr». – 2011. – 280 s.

3. Shkatov P. Combining eddy-current and magnetic methods for the defectoscopy of ferromagnetic materials // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – Vol. 28. – Issue 2. – June 2013. – p. 155-165.

4. Kljuev, C.V. Issledovanie vozmozhnosti ocenki korrozionnogo sostojanija tolstostennyh ferromag-nitnyh ob#ektov vihretoko-magnitnym metodom / C.V. Kljuev, P.N. Shkatov // Izvestija OreIGTU, ser. «Fun-damental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii». – 2010. – № 1. – S. 17-22.
5. Volkov, B.I. Vihretokovyj kontrol' metalla v jenergetike / B.I. Volkov, P.N. Shkatov. – Cheljabinsk.: Cico. – 2013. – 250 s.
6. Taketomi, S. Magnitnye zhidkosti / S. Taketomi, S. Tikadzumi. – M.: Mir. – 1993. – 272 s.
7. Baev A.R., Majorov A.L. Uderzhanie magnitnoj zhidkosti mezhdu ul'trazvukovym preobrazovatelem i ferromagnitnym obrazcom / A.R. Baev, A.L. Majorov. – V kn.: Magnitnye zhidkosti: nauchnye i prikladnye issledovanija. – Mn. – 1983. – s. 62-70.
8. Dikanskij, Ju.I. O magnitnoj pronicaemosti magnitodijelektricheskoj jemul'sii / Ju.I. Dikanskij, A.R. Zakinjan, N.Ju. Konstantinova // Zhurnal tehniczeskoj fiziki. – 2008. – T. 78. – vyp. 1. – S. 21-26.

Shkatov Petr Nikolaevich

The Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow

Doctor of technical science, professor

Tel. (499) 268-76-94 fax (495) 964-91-50

E-mail: petr_shkatov@mail.ru

Mostyaev Igor' Vyacheslavovich

The Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow

The post-graduate student

Tel. (499) 268-76-94

МЕТОДОЛОГИЯ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

В статье рассмотрены вопросы методологии передачи и обработки данных в распределенных информационно-измерительных системах с коммутацией пакетов. Показано, что при сравнительно небольшой нагрузке общая задержка передачи в значительной мере зависит от времени формирования группы заявок.

Установлено, что чем меньше нагрузка, тем реже поступают заявки, и тем больше требуется времени для формирования группы, и, следовательно, тем больше значение времени ожидания начала обслуживания.

При увеличении интенсивности потока сообщений, поступающих в систему, среднее значение задержки убывает до некоторого минимального значения, и затем начинает возрастать, т.к. группы заявок накапливаются в очереди на обслуживание.

Ключевые слова: *распределенные информационно-измерительные системы, данные, пакетная обработка, потоки сообщений распределенных информационно-измерительных систем, передача данных, управление информационными потоками.*

Для распределенных информационно-измерительных систем (РИИС) с коммутацией пакетов введем предположение о том, что моменты прибытия пакетов или инициализации соединений имеют ограниченную дисперсию, поскольку аналитическая модель для таких систем хорошо известна [1]. На основании этой модели рассчитываются основные характеристики РИИС, и производится планирование ее ресурсов, в частности, объема буферного пространства. Трафик в РИИС с коммутацией пакетов с большой точностью моделируется статистически самоподобными процессами или, по крайней мере, не имеет экспоненциального распределения [1].

Для самоподобного процесса, представляемого пакетным трафиком, не существует естественного ограничения длительности всплеска. Всплески могут происходить в любом временном масштабе. Кроме того, множество типов обменов в современной РИИС инициируются и управляются операционной системой сетевых узлов автоматически, например, обновления маршрутной информации, что может приводить к глобальной синхронизации потоков в РИИС. Такая ситуация является невозможной для пуассоновской модели, однако имеет место в реальности [2].

Итак, традиционный подход к моделированию трафика РИИС с коммутацией пакетов базируется полностью на предположении о неограниченности дисперсии процесса поступления пакетов, что позволяет применять теоретический аппарат марковских цепей для анализа таких систем.

Однако развитие современных скоростных РИИС передачи данных и мультимедиа информации с выраженной гетерогенной физической и логической инфраструктурой и большим набором разнообразных сервисов и генерируемых ими потоков, приводит к появлению существенно более сложных характеристик потоков.

Трафик в таких РИИС имеет явно выраженный всплесковый характер, не сглаживаемый усреднением по длительным временным промежуткам и большому числу потоков.

Традиционный подход к моделированию трафика изменялся путем разработки все более сложных стохастических моделей. Основной целью разработки всех этих моделей являлось сохранение возможности аналитического подхода к исследованию задач управления очередями и эффективностью системы.

Однако в литературе отмечается, что статистические свойства стохастических моделей не совпадают со свойствами экспериментальных данных по сетевому трафику [3]. Причиной того, что стохастический анализ применялся в течение длительного времени, был недостаток эмпирических данных. Сейчас в экспериментальных данных и модельных экспериментах недостатка нет.

Представим РИИС в виде топологической схемы, в которую входят несколько узлов, два маршрутизатора и набор каналов, соединяющих узлы (рис. 1). Узлы объединены в две локальные вычислительные сети (ЛВС), каждая из которых подключена к одному маршрутизатору. Маршрутизаторы связывают ЛВС, передавая трафик по каналу с малой пропускной способностью и большим значением задержки. Каждый из узлов в одной из ЛВС отправляет сегменты с заданным межсегментным интервалом, который и определяет скорость передачи. Эта скорость задается алгоритмом управления потоком. Предполагается, что источники потоков всегда имеют информацию для отправки. Источники и приемники трафика находятся в разных ЛВС. Приемники трафика отправляют подтверждения в противоположном направлении в виде сегментов, не содержащих данных.

Задача маршрутизатора состоит в том, чтобы осуществлять передачу сегмента по адресу получателя в его заголовке. В буфере маршрутизатора R1 организуется очередь сегментов, которые отправляются далее к маршрутизатору R2. Очередь имеет конечную длину. Сегмент, поступающий на выходной интерфейс, помещается в очередь, если она может вместить этот сегмент, иначе сегмент теряется. Очередь маршрутизатора R1 обслуживается со скоростью канала, соединяющего маршрутизаторы.

Наиболее важными характеристиками при анализе являются [4]:

- пропускная способность канала, определяющая скорость поступления битов в канал;
- задержка передачи, характеризующая длительность интервала между поступлением определенного бита в канал и появлением его из канала;
- вероятность битовой ошибки BER , определяющая вероятность потери сегмента как $1 - (1 - BER)^L$ в зависимости от вероятности ошибки при передаче;
- относительное число потерь сегментов (отношение числа потерянных к общему числу отправленных сегментов);
- коэффициент использования пропускной способности каналов:

$$U = \text{число принятых битов} / \text{скорость канала} \times \text{время};$$
- коэффициент равноправия разделения ресурсов:

$$F = \left(\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{n} \right) \times \left(\sum_{i=1}^n b_i^2 \right), \quad (1)$$

где b_i – доля пропускной способности, занятая i -м соединением;
 n – средняя длина очереди Q в маршрутизаторе R1.

Процесс передачи данных состоит из трех основных фаз: прием порций данных и выбор направления передачи; формирование пакетов и ожидание в очереди; передача пакетов в соответствующем потоке.

Построение математической модели передачи данных проведем исходя из следующих упрощающих предположений:

- передача данных производится в одном потоке;
- пакет включает K порций данных;
- канал передачи абсолютно надежен, то есть отсутствует повторная передача пакетов.

На рисунке 2 показана упрощенная функциональная схема РИИС с пакетной коммутацией данных. Заметим, что из первого предположения следует, что временем обработки порций данных на фазе выбора направления передачи можно пренебречь.

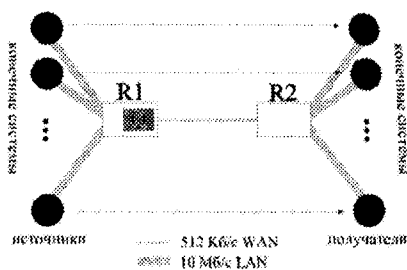


Рисунок 1 – Формальная модель исследуемой РИИС

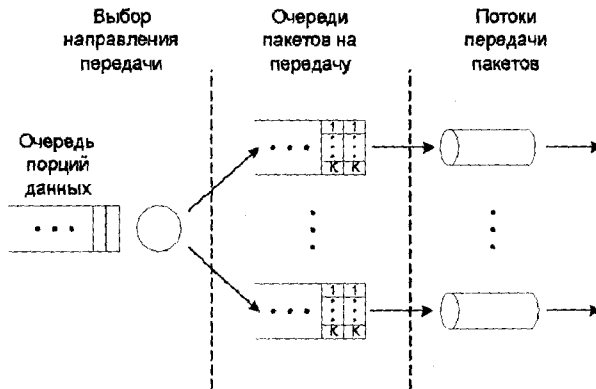


Рисунок 2 – Функциональная схема РИИС с пакетной коммутацией данных

Предположим также, что поток данных является пуассоновским с параметром N , а время передачи пакета в потоке распределено по экспоненциальному закону с параметром $1/x$. Тогда в качестве упрощенной математической модели функционирования передачи данных может быть рассмотрена система массового обслуживания (СМО) типа $M|M|1$ (рис. 3) с групповым обслуживанием заявок, в которой заявки соответствуют порциям данных, а размер группы заявок – числу порций, передаваемых в одном пакете.

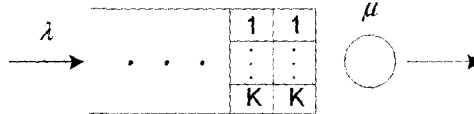


Рисунок 3 – Пример системы массового обслуживания

Таким образом, в построенной модели поступление группы заявок на обслуживающий прибор производится только в том случае, когда в очереди имеется, по крайней мере, K заявок. В этом заключается принципиальное отличие данной модели от СМО, где размер группы ограничен сверху и не фиксирован [7,8].

На рисунке 4 показана диаграмма интенсивностей переходов марковского процесса, описывающего функционирование рассматриваемой СМО, где под состоянием понимается общее число заявок в системе.

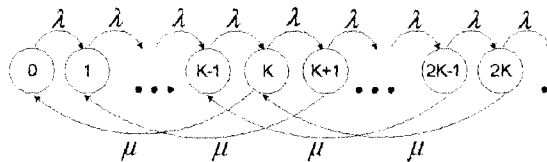


Рисунок 4 – Диаграмма интенсивностей переходов марковского процесса

Пусть p_i вероятность того, что в некоторый момент времени система находится в состоянии i . Тогда соответствующая система уравнений равновесия имеет вид:

$$\begin{aligned}
 0 &= -\lambda p_0 + \mu p_K, \\
 0 &= -\lambda p_i + \mu p_{K+1} + \lambda p_{i-1}, \quad i = 1, \dots, K-1, \\
 0 &= -(\lambda + \mu) p_i + \mu p_{K+1} + \lambda p_{i-1}, \quad i \geq K.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Для решения (2) введем производящую функцию:

$$P(z) = \sum_{i=0}^{\infty} p_i z^i,
 \tag{3}$$

Очевидно видеть, что она имеет вид

$$P(z) = \frac{(1-z^k) \sum_{i=0}^{K-1} p_i z^i}{\rho z^{k+1} - (\rho+1)z^k + 1}, \quad (4)$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$.

Из условия нормировки, т.е. $P(z) \rightarrow 1$, при $z \rightarrow 1$ получаем уравнение

$$\sum_{i=0}^{K-1} p_i = 1 - \frac{\rho}{K},$$

которое вместе с $K-1$ уравнениями, полученными при подстановке в числитель (5) соответствующих нулей знаменателя, образует невырожденную систему уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{K-1} p_i &= 1 - \frac{\rho}{K}, \\ \sum_{i=0}^{K-1} p_i z^j &= 0, \quad j = 1, \dots, K-1. \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) получаем искомую производящую функцию в виде

$$P(z) = \frac{1-z^k \sum_{i=0}^{K-1} z^i}{z - z_K}.$$

Основные вероятностно-временные характеристики рассматриваемой системы массового обслуживания можно вычислить по формулам:

$$N = \frac{1}{z_K - 1} + \frac{K-1}{2}, \quad (6)$$

$$P_0 = 1 - \frac{\rho}{K}, \quad (7)$$

где N – среднее число заявок в системе;

P_0 – вероятность простоя прибора.

Для вычисления среднего времени пребывания заявок в системе можно воспользоваться формулой Литтла [6].

Проведенный анализ показал, что при сравнительно небольшой нагрузке общая задержка передачи в значительной мере зависит от времени формирования группы заявок. Действительно, чем меньше нагрузка, тем реже поступают заявки, и тем больше требуется времени для формирования группы, и, следовательно, тем больше значение времени ожидания начала обслуживания. При увеличении интенсивности потока сообщений, поступающих на систему, среднее значение задержки убывает до некоторого минимального значения, и, затем, начинает возрастать, т.к. группы заявок накапливаются в очереди на обслуживание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хелеби, С. Принципы маршрутизации в Internet. 2-е издание: пер. с англ. / С. Хелеби, Д. Мак-Ферсон. – М.: Издательский дом «Вильямс». – 2003. – 448 с.
2. Тихоненко, О.М. Модели массового обслуживания в системах обработки информации / О.М. Тихоненко. – Мн.: Университетское. – 1990. – 191 с.
3. Тимофеев, А.В. Проблемы и методы адаптивного управления потоками данных в телекоммуникационных системах / А.В. Тимофеев // Информатизация и связь. – 2003. – № 1-2. – с. 68-73.
4. Васильев, А.М. Современные распределенные информационно-измерительные системы. Методология построения. Книга 2. / А.М. Васильев. – М.: МГУПИ. – 2009. – 258 с.
5. Столлингс, В. Современные компьютерные сети / В. Столлингс. – СПб.: Питер. – 2003. – 783 с.
6. Лэмбли, Т. Маршрутизация / Т. Лэмбли, Ш. Одон, К. Уолмс. – СПб.: Лори. – 2002. – 390 с.

7. Frost V., Melamed B. Traffic modelling for telecommunications networks // IEEE Communications Magazine. – 1994. – 32(2). – p. 70-80.

8. Leland W., Taqqu M., Willinger W., Wilson D. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version) // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1994. – 2(1). – p. 1-15.

Васильев Андрей Михайлович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»

Тел.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupipr1@mail.ru

Слепцов Владимир Владимирович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва

Доктор технических наук, профессор кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»

Тел.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupipr1@mail.ru

A.M. VASIL'EV, V.V. SLEPTSOV

**METHODOLOGY OF DATA TRANSMISSION AND PROCESSING
IN DISTRIBUTED INFORMATION MEASUREMENT SYSTEMS
OF PACKET-SWITCHED**

The article considers the problems of the methodology of data transmission and processing in distributed information measurement systems with packet switching. It is shown that, with a relatively light load, the total transmission delay is largely dependent on the time of formation of a group of applications.

It is found that less load, the less we receive applications, and the more time is required to form a group, and, hence, the higher the timeout value of a service.

Keywords: distributed information-measuring systems, data, batch processing, message flows distributed information-measuring systems, data transfer and information management.

BIBLIOGRAPHY

1. Helebi, S. Principy marshrutizacii v Internet. 2-e izdanie: per. s angl. / S. Helebi, D. Mak-Ferson. – M.: Izdatel'skij dom «Vil'jame». – 2003. – 448 s.

2. Tihonenko, O.M. Modeli massovogo obsluzhivaniya v sistemah obrabotki informacii / O.M. Tihonenko. – Mn.: Universitetskoe. – 1990. – 191 s.

3. Timofeev, A.V. Problemy i metody adaptivnogo upravleniya potokami dannyh v telekommunikacionnyh sistemah / A.V. Timofeev // Informatizacija i svjaz'. – 2003. – № 1-2. – s. 68-73.

4. Vasil'ev, A.M. Sovremennye raspredelennye informacionno-izmeritel'nye sistemy. Metodologija postroeniya. Kniga 2. / A.M. Vasil'ev. – M.: MGUPI. – 2009. – 258 s.

5. Stollings, V. Sovremennye komp'juternye seti / V. Stollings. – SPb.: Piter. – 2003. – 783 s.

6. Ljempl, T. Marshrutizacija / T. Ljempl, Sh. Odon, K. Uolms. – SPb.: Lori. – 2002. – 390 s.

7. Frost V., Melamed B. Traffic modelling for telecommunications networks // IEEE Communications Magazine. – 1994. – 32(2). – p. 70-80.

8. Leland W., Taqqu M., Willinger W., Wilson D. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version) // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1994. – 2(1). – p. 1-15.

Vasilyev Andrey Michailovich

Moscow state University of instrument engineering and Informatics, Moscow

Candidate of technical Sciences, senior lecturer of the Department «Devices and instrumentation systems»

Тел.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupipr1@mail.ru

Sleptsov Vladimir Vladimirovich

Moscow state University of instrument engineering and Informatics, Moscow

Doctor of technical Sciences, Professor of the Department «Devices and instrumentation systems»

Тел.: (499) 269-56-10

E-mail: mgupipr1@mail.ru

А.И. СУЗДАЛЬЦЕВ, Н.А. САФРОНОВА

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С КОСВЕННЫМ КОНТРОЛЕМ И УПРАВЛЕНИЕМ УРОВНЕМ ВОДЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОДНОМ ПАРОГЕНЕРАТОРЕ

Представлены методика проведения и результаты экспериментов по определению параметров зависимости уровня воды в котле электрического электродного парогенератора от тока через его электроды.

Ключевые слова: электрический электродный парогенератор, ток в электродах, уровень воды.

ВВЕДЕНИЕ

Электрические электродные генераторы (ЭЭП), обеспечивающие потребителей паровоздушными смесями в замкнутых или разомкнутых производственных системах, функционируют на принципе поддержания заданного уровня воды в котле и заданного давления пара на выходе парогенератора. Слабым звеном системы управления уровнем воды являются датчики уровня, которые в процессе парообразования постепенно покрываются налетом, отчего изменяется сигнал с соответствующего датчика уровня, что приводит к несвоевременному включению/выключению исполнительного органа подачи воды [1]. По этой причине время между ремонтно-профилактическими работами, связанными с удалением и установкой нового датчика уровня, уменьшается. Аналогичный процесс происходит во всех видах паровых котлов [2]. Предварительная очистка воды с добавлением соответствующих реагентов несколько удлиняет сроки надежной работы датчиков уровня, но не меняет сущности процесса регулирования.

КОСВЕННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ВОДЫ

Предложен косвенный метод контроля уровня воды в электродном парогенераторе [3]. Контроль уровня воды по предложенному методу основан на включении/выключении клапана подачи воды в парогенератор в зависимости от величины измеренного переменного тока, протекающего через его электроды. При этом зависимость между протекающим током и уровнем воды определяют заранее для каждого парогенератора по его конструктивным параметрам согласно выражению (1), а алгоритм управления электромагнитным клапаном представлен выражением (2):

$$V_i = f(J_i) = \frac{\pi^2 (r_0 + r_1)^2 \cdot \rho_B \cdot J_i}{3(U - 2R_3 J_i)}, \quad (1)$$

$$Z = \begin{cases} 1, & \text{если } [V_i = f(J_i)] - V_{\text{зн}} = 0, \\ 0, & \text{если } [V_i = f(J_i)] - V_{\text{зв}} = 0; \end{cases} \quad (2)$$

где V_i – измеренный объем воды в котле парогенератора;
 U, J_i – напряжение и ток через электроды, соответствующий измеренному объему;
 ρ_B – удельное электрическое сопротивление воды с растворенными в ней солями;
 R_3 – электрическое сопротивление электродов;
 r_0, r_1 – радиусы границ водного столба между электродами;
 $V_{\text{зн}}$ и $V_{\text{зв}}$ – заданные нижнее и верхнее значения объема воды в котле ЭЭП, обусловленные его конструктивными параметрами.

Сначала в котел заливают воду объемом $V_0 > V_{\text{зн}}$, иначе просто не будет течь ток. Включают электропитание, начинается парообразование и фиксируется ток J_0 , который уменьшается в сторону J_n , и периодически вычисляют объем V по формуле (1), а электромагнитный клапан подачи воды выключен ($Z=0$). При достижении током величины J_n вычисленное значение объема становится равным $V_{\text{зн}}$, отчего включится электромагнитный клапан и начнется подача воды ($Z=1$), а ток начнет увеличиваться в направлении J_B с периодическим расчетом объема. При достижении объемом воды величины $V_{\text{зв}}$ клапан подачи воды отклю-

чается, ток начинает уменьшаться до достижения объема $V_{зн}$, отчего включится электромагнитный клапан и начнется вновь подача воды и т.д.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика экспериментального определения удельного электрического сопротивления воды с растворенными солями разработана и реализована нами на ООО «Воплощение» с целью дальнейшего использования в системе управления температурой пара в камере ошпаривания при производстве бараночно-сушечных изделий (БСИ) в поточной линии с электродным парогенератором.

1. Исходные данные.

1.1 Схема экспериментального образца электродного парогенератора приведена на рисунке 1.

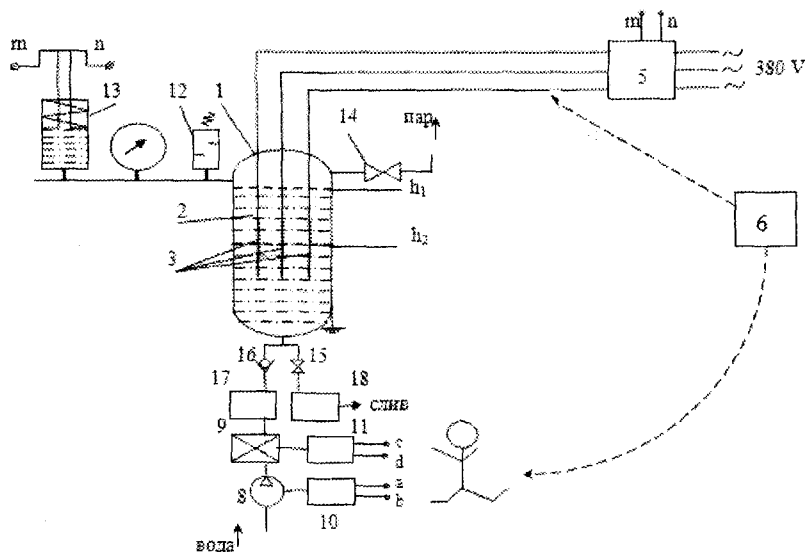


Рисунок 1 – Структурная схема электродного парогенератора

1 – котел с герметично установленной крышкой; 2 – вода, h_1 и h_2 – соответственно верхний и нижний ее уровни; 3 – электроды; 5 – электромагнитный пускатель напряжения; 6 – токовые клещи; 8 – насос; 9 – электромагнитный клапан; 10-11 – цепи питания соответственно насоса и электромагнитного клапана; 12 – предохранительный клапан; 13 – реле давления с электрическим контактом m ; 14 – вентиль для выпуска пара; 15 – сливной вентиль; 16 – обратный клапан; 17-18 – счетчики расхода воды

1.2 Элементы стенда, измерительные приборы и исполнительные механизмы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Элементы стенда, измерительные приборы и исполнительные механизмы

Наименование прибора, исполнительного механизма	Порядковый номер	Тип, марка	Основные параметры	Источник информации
1	2	3	4	5
Реле давления	13	Монитор АТТ-4007	До 5250 мм рт ст (7,135 кг/см ²)	www.aktakom.ru
Электромагнитный пускатель	5	ПМЛ-6211	$I = 160$ А	www.reform-market.ru
Токовые клещи	6	АТК-2104	U до 600 В I до 1000 А Погр. 0,5 %	www.aktakom.ru
Счетчик расхода воды	17,18	BCX 15	Расход 0,1 м ³ /час	www.kordinata.ru/informrg
Электромагнитный клапан	9	ЭМК 2W21	$U = \sim 220$ В	www.evelen.ru

2. Расчеты.

2.1 Расчеты электрических сопротивлений электродов:

$$R_3 = \frac{\rho_{03} \cdot h_3}{l \cdot l_0}, \quad (3)$$

где ρ_{03} , h_3 , l , l_0 – соответственно удельное электрическое сопротивление, высота, ширина и толщина электродов.

2.2 Расчеты удельного электрического сопротивления воды с растворенными солями производятся после преобразования выражения (1) относительно ρ_v .

3. Проведение эксперимента. Эксперимент базируется и учитывает отдельные факторы теоретических и экспериментальных исследований ряда авторов [4, 5, 6, 7, 8].

3.1 По конструктивным параметрам парогенератора и электродов рассчитывались величины R_3 , r_0 , r_1 .

3.2 Электромагнитный клапан 9 подачи воды в котел 1 парогенератора включался вручную, вода набиралась до определенного уровня, после чего клапан отключали, и вода переставала поступать. При этом фиксировались время набора воды t' и объем набранной воды с помощью счетчика 17 расхода воды на входе в котел. Следом включалась подача напряжения ~ 380 В через пускатель 5 на электроды 3 котла, и контролировался процесс парообразования: один человек фиксировал значения токов через электроды ЭЭП с помощью токовых клещей 6 через определенные интервалы времени, а второй синхронно регистрировал интервалы времени парообразования t'' . При достижении условно заданного значения тока подачу напряжения отключали, включали клапан 15 слива воды с фиксированием с помощью второго счетчика 18 объема воды до полного слива. Далее находили истинный объем испарившейся воды как разность соответствующих показаний счетчиков.

Позже эксперименты повторяли при разных значениях верхнего и нижнего уровней воды.

3.3 Далее рассчитывали значения удельного электрического сопротивления раствора и строили графики его зависимости от уровня (объема) воды в котле ЭЭП, а также зависимости величины тока, протекающего через электроды парогенератора от уровня (объема) воды в его котле.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 2 приведены зависимости изменения удельного электрического сопротивления воды с растворенными солями и тока через электроды от уровня (объема) воды в ЭЭП, на рисунках 3, 4 и 5 – фрагменты временной зависимости изменения тока через электроды в процессе парообразования по 6 экспериментам для трех уровней воды, а на рисунке 6 – усредненные временные характеристики изменения объемов воды (уровня) по полным циклам парообразования (с учетом времени подачи воды в ЭЭП).

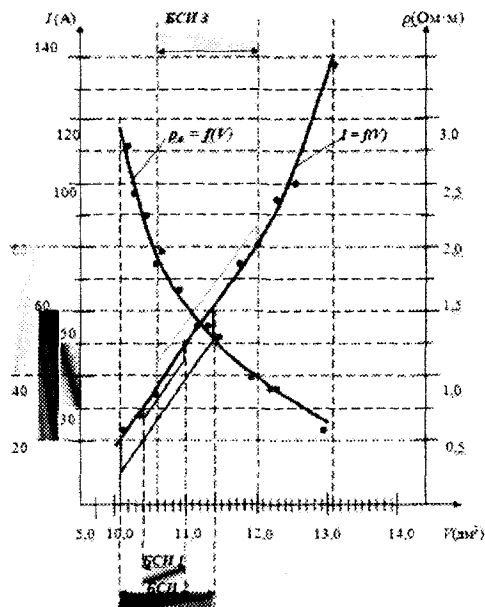


Рисунок 2 – Экспериментальные зависимости удельного электрического сопротивления воды с растворенными солями и тока в электродах от уровня (объема) воды в ЭЭП

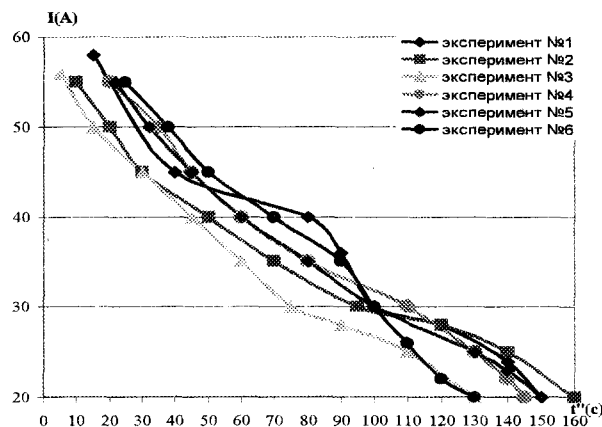


Рисунок 3 – Временные зависимости тока в электродах ЭЭП на условно нижнем уровне воды в котле ($V^{ку}=10,0-11,4 \text{ дм}^3$) при парообразовании

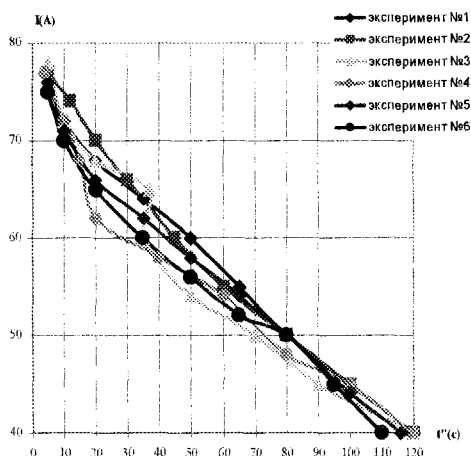


Рисунок 4 – Временные зависимости тока в электродах ЭЭП на условно среднем уровне воды в котле ($V^{ку}=10,6-12,12 \text{ дм}^3$) при парообразовании

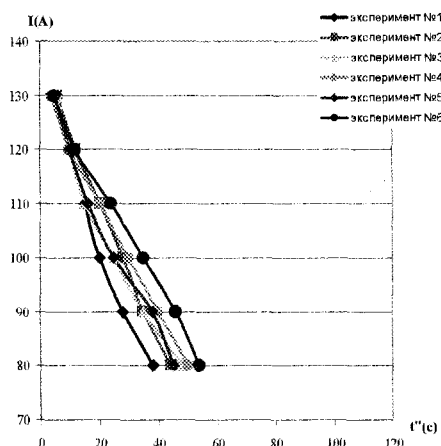


Рисунок 5 – Временные зависимости тока в электродах ЭЭП на условно верхнем уровне воды в котле ($V^{ку}=12,26-13,12 \text{ дм}^3$) при парообразовании

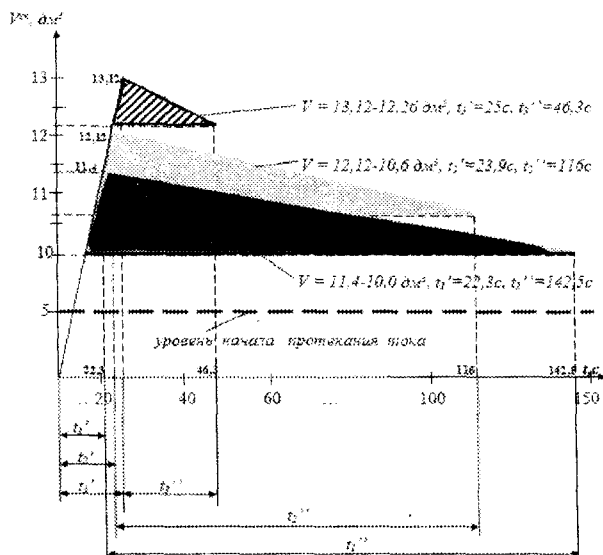


Рисунок 6 – Усредненные временные характеристики парообразования в ЭЭП на трех уровнях воды, где t_1' – время набора воды, t_1'' – время парообразования ($i=1,2,3$)

Реальная система управления ЭЭП, разработанная нами на основе предложенного метода, защищена патентом на изобретение, внедрена в поточной линии производства бараночно-сушечных изделий в ООО «Воплощение» и будет рассмотрена в следующих публикациях.

ВЫВОДЫ

1. Уровень (объем) воды в ЭЭП возможно регулировать, используя в качестве датчика уровня измеренные значения тока через электроды, но настройка регулятора зависит от конкретных конструктивных параметров ЭЭП и удельного электрического сопротивления воды с растворенными в ней солями, которое является непостоянным, а в области больших токов носит нелинейный характер;
2. Время набора воды в исследуемом ЭЭП до максимального уровня не превышает 25 с, а время парообразования до следующего набора воды резко изменяется в зависимости от верхнего значения уровня и колеблется в пределах 38-150 с;
3. Удельное электрическое сопротивление раствора воды при изменении уровня от минимального до максимального значения изменяется в сторону уменьшения (в эксперименте от 2,89 Ом·м до 0,65 Ом·м) со средним значением 1,85 Ом·м, что на наш взгляд связано с фазными токами утечки, увеличивающимися с повышением уровня воды и неучтенными в расчетах;
4. Полученные экспериментальные зависимости тока через электроды от объема (уровня) воды в парогенераторе позволяют автоматизировать процесс регулировки уровня воды без датчиков уровня, используя в качестве обратной связи измеренные значения тока через электроды парогенератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроллер управления парогенератором. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mx-omsk.ru/content/view/15/243/>
2. Парогенераторы электрические промышленные: электродные и тэновые. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.strela.punkt.ru>
3. Патент РФ № 2449215 на изобретение. Способ управления температурой паровоздушной смеси в камере опшаривания при производстве бараночно-сушечных изделий / А.И. Суздальцев, Н.А. Сафронова, В.О. Андреев, П.Е. Сафронов. – Опубл. 27.04.2012. Бюл. №12.
4. Суздальцев, А.И. Об одном методе оценки качества технических систем, характеризующихся различными свойствами и показателями качества / А.И. Суздальцев, С.П. Петров, Н.А. Сафронова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 1. – С. 120-124.
5. Подмастерьев, К.В. Фазогенераторный датчик контроля приближения токопроводящего объекта / К.В. Подмастерьев, Н.Н. Милошин // *Датчики и системы*. – 2009. – № 9. – С. 61-67.
6. Мишин, В.В. Исследование работы подшинника по параметрам электрического сопротивления / В.В. Мишин, К.В. Подмастерьев, В.В. Семенов, М.В. Майоров, В.Н. Чернышев, А.В. Селихов, К.В. Шаталов // *Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 5-2. – С. 108-116.
7. Чернышев, В.Н. Экспериментальное исследование сигнала активного сопротивления подшинника в режиме сухого трения / В.Н. Чернышев, В.В. Мишин, М.В. Майоров // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 1. – С. 145-151.
8. Подмастерьев, К.В. Прогнозирующий контроль радиоэлектронной аппаратуры с адаптивными интервалами времени. Часть 1. Теоретические основы и модели. характеристики дрейфа параметров / К.В. Подмастерьев, С.А. Моисеев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 3-2.(293) – С. 135-144.

Суздальцев Анатолий Иванович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»

Россия, 302028 г.Орёл, ул. М. Горького 41, кв. 34

Тел.: (4862)762862

E-mail: aist39@yandex.ru

Сафронова Наталья Анатольевна

Академия ФСО России

ст. преподаватель кафедры № 12

Адрес: Россия, 302040 г.Орёл, ул. 50 лет Октября, 9, кВ.117

Тел.: (4862)704124

E-mail: sna_19@mail.ru

PARAMETER DEFINITION FOR WATER-LEVEL INDIRECT CONTROL IN ELECTRIC ELECTRODE STEAM GENERATOR

The procedure for carrying out and results of experiments for the parameter definition of water-level in the boiler of an electric electrode steam generator upon current running through its electrodes are presented.

Keywords: *electrical electrode steam-boiler, current in electrodes, water-level.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kontroller upravljenija parogeneratorom. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://mx-omsk.ru/content/view/15/243/>
2. Parogeneratory jelektricheskie promyshlennye: jelektrodnye i tjenovyje. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.strela.punkt.ru>
3. Patent RF № 2449215 na izobrenenie. Sposob upravljenija temperaturaj parovozdusnoj smesi v ka-mere oshparivanija pri proizvodstve baranochno-sushechnyh izdelij / A.I. Suzdal'cev, N.A. Safronova, V.O. Andreev, P.E. Safronov. – Opubl. 27.04.2012. BJul. №12.
4. Suzdal'cev, A.I. Ob odnom metode ocenki kachestva tehniceskix sistem, harakterizujushih raznorodnymi svojstvami i pokazateljami kachestva / A.I. Suzdal'cev, S.P. Petrov, N.A. Safronova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – № 1. – S. 120-124.
5. Podmaster'ev, K.V. Fazogeneratoryj datchik kontrolja priblizhenija tokoprovodjashhego ob#ekta / K.V. Podmaster'ev, N.N. Miljushin // Datchiki i sistemy. – 2009. – № 9. – S. 61-67.
6. Mishin, V.V. Issledovanie raboty podshipnika po parametram jelektricheskogo soprotivlenija / V.V. Mishin, K.V. Podmaster'ev, V.V. Semenov, M.V. Majorov, V.N. Chernyshev, A.V. Selihov, K.V. Shatalov // Izve-stija OrelGTU. Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – № 5-2. – S. 108-116.
7. Chernyshev, V.N. Jeksperimental'noe issledovanie signala aktivnogo soprotivlenija podshipnika v rezhime subogo trenija / V.N. Chernyshev, V.V. Mishin, M.V. Majorov // Fundamental'nye i prikladnye pro-blemy tehniki i tehnologii. – 2013. – № 1. – S. 145-151.
8. Podmaster'ev, K.V. Prognozirujushij kontrol' radiojelektronnoj apparatury s adaptivnymi in-tervalami vremeni. Chast' 1. Teoreticheskie osnovy i modeli, harakteristiki drejfa parametrov / K.V. Podmaster'ev, S.A. Moiseev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – № 3-2.(293) – S. 135-144.

Suzdal'tsev Anatolij Ivanovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Ph.D., professor of "Electronics, Computer Sciences and Information Security"

Tel.: (4862)762862

E-mail: aist39@yandex.ru

Safronova Nataliya Anatol'evna

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol

Art. Lecturer, Department number 12

Tel.: (4862)704124

E-mail: sna_19@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 621.787:621.91

В.И. НЕКРАСОВ, В.В. МИШИН, А.В. ЖИДКОВ

МЕТОД И СРЕДСТВО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭНДОПРОТЕЗОВ СУСТАВОВ С ПАРОЙ ТРЕНИЯ МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛ НА СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА

В статье рассмотрена проблема диагностирования эндопротезов суставов на стадии производства, представлена классификация методов диагностирования пары трения эндопротезов суставов. Исходя из анализа методов диагностирования, выбран электрорезистивный метод диагностики эндопротезов суставов с металлической парой трения, описана экспериментальная установка для проверки и применения предложенного метода.

Ключевые слова: диагностика, эндопротез, сустав, трение, трибосопряжение, износ, устройство.

ВВЕДЕНИЕ

Эндопротезирование суставов считается наиболее эффективным методом восстановления подвижности суставов путем их частичной или полной замены искусственными компонентами. Ежегодно в мире проводится более чем 800 000 операций эндопротезирования. Более того, только в США около 25 миллионов человек имеют внедренные эндопротезы, а в Великобритании каждый год проводится около 40 000 операций по эндопротезированию тазобедренных суставов и 18 000 операций по замене коленных суставов [1].

Необходимость в повторной операции эндопротезирования может возникнуть из-за следующих факторов: перелома эндопротеза, попадания инфекции в процессе операции эндопротезирования, износа, разрушения крепления компонентов эндопротеза [2]. Одним из факторов, влияющих на срок службы эндопротеза, является износ его трибосопряжений. Продукты износа трибосопряжений эндопротеза, попадая на контактную поверхность кость-имплантант, воспринимаются иммунной системой человека как чужеродные объекты и атакуются иммунными клетками. Вследствие этого происходит развитие асептической нестабильности компонентов эндопротеза вследствие процесса резорбции костной ткани агрессивной грануляционной тканью, образующейся в ответ на продукты износа трущихся поверхностей [3].

Кроме того, отклонения от формы, дефекты поверхности трибосопряжений протеза сустава ведут к возникновению сильных болей при движении человека, снижению стабильности конструкции эндопротеза, повреждению мышц и связок. Крупные международные компании, специализирующиеся на изготовлении эндопротезов суставов, проводили отзывные кампании, связанные с высоким трением и, как следствие, быстрым износом эндопротезов суставов, например компания Johnson&Johnson в 2010 году [4].

Высокое трение и преждевременный износ, а также дефекты изготовления и конструкторские просчеты приводят к тому, что возникает риск повторного эндопротезирования, что в свою очередь крайне нежелательно для пациента. В связи с вышесказанным возникает проблема диагностирования трибосопряжений эндопротезов суставов на стадии производства.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

С момента возникновения первого стендового оборудования для диагностики трибосопряжений эндопротезов и в настоящий момент существуют определенные трудности, связанные с измерением износа трибосопряжений эндопротезов суставов, которые обусловлены следующими причинами:

- объем износа, как правило, мал;
- компоненты протеза монтированы в крепления комплекса для испытания, что затрудняет доступ к ним;
- современные эндопротезы и их части имеют сложную форму.

На сегодняшний день существуют следующие методы испытаний эндопротезов суставов.

Методы диагностирования эндопротезов суставов по внутренним параметрам:

– гравиметрический метод, основанный на измерении износа трибосопряжений эндопротезов суставов по объему износа (данный метод является наиболее часто используемым и рекомендован стандартами, например ГОСТ Р ИСО 9326-2005 [5]);

- измерение линейных размеров деталей до и после испытаний;
- профилографирование поверхностей деталей до и после испытаний.

Методы диагностирования эндопротезов суставов по выходным параметрам:

1) По параметрам, характеризующим продукты трения и износа:

- изучение концентрации продуктов износа в смазывающей жидкости;
- изучение изменения свойств смазывающей жидкости;
- радиологический метод контроля износа, заключающийся в поверхностной активации радиоактивным излучением одной или обеих трущихся поверхностей (износ поверхностей может быть определен по количеству радиоактивных частиц в смазывающей жидкости [6]).

2) По параметрам, характеризующим работу трибосопряжения эндопротеза сустава:

- вибрационные методы, основанные на измерении и анализе сигналов виброскорости или виброускорения;
- тепловые методы, основанные на измерении температуры в области контакта деталей трибосопряжения или температуры смазывающей жидкости;
- электрические методы, основанные на измерении электрических параметров трибосопряжения.

В свою очередь существующие электрические методы делятся на:

- методы, основанные на измерении трибоЭДС;
- электромагнитные методы, которые позволяют судить о величине смазочного слоя по ЭДС электромагнитной индукции;
- электрорезистивный метод, позволяющий получить информацию о состоянии трибосопряжения, исходя из анализа электрического сопротивления в зоне трения.

К достоинствам электрорезистивного метода можно отнести следующее: не требуются специальные первичные преобразователи; можно исследовать состояние трибосопряжения в эксплуатационных или имитирующих их условиях; осуществляется комплексная оценка состояния объекта, контроль макрогеометрии и поиск дефектов рабочих поверхностей; можно получить количественную оценку режима смазки в зонах трения; возможно исследование объектов со сложной геометрией без дополнительных затрат [7]. Недостаток метода заключается в том, что необходим электрический контакт с исследуемым трибосопряжением и, как следствие природы метода, им можно диагностировать только эндопротезы с парой трения металл-металл.

В существующих работах, посвященных диагностированию эндопротезов суставов с помощью электрорезистивного метода, используются исследования на постоянном электрическом токе [8]. Процессы, происходящие в зоне трения эндопротеза сустава, имеют малую длительность, например время микроконтактирования может составлять от 10^{-6} с и менее, поэтому использование переменного тока позволило бы получить большее количество информации и повысить ее качество, т.к. измерения на переменном токе в целом обладают лучшей чувствительностью, чем измерения на постоянном токе.

Под действием нагрузки при испытаниях смазочная жидкость выдавливается из зоны трения эндопротеза сустава, изменяется ее толщина и происходит смена режимов трения от жидкостного к смешанному и граничному. Сопротивление контактной зоны определяется по выражению:

$$Z(t) = R(t) + jX(t), \tag{1}$$

где $Z(t)$ – полное комплексное сопротивление, Ом;

$R(t)$ – активное сопротивление, Ом;

$X(t)$ – реактивное сопротивление, Ом.

Полное комплексное сопротивление при жидкостной (2) и полужидкостной смазке (3) описывается следующими выражениями:

$$Z(t) = \frac{R_c}{1 + (R_c \cdot \omega \cdot C_c)^2} - j \frac{R_c^2 \cdot \omega \cdot C_c}{1 + (R_c \cdot \omega \cdot C_c)^2}; \tag{2}$$

$$Z(t) = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} + j\omega C_c \right)^{-1}, \tag{3}$$

где R_c – сопротивление смазочного слоя, Ом;

C_c – емкость смазывающего слоя, Ф;

ω – циклическая частота приложенного напряжения, Гц;

R_1 – сопротивление контакта металл-металл, Ом;

R_2 – сопротивление смазочного слоя при граничном трении.

При этом, согласно выражениям (4) и (5):

$$R_c = \rho \cdot \frac{d}{S}; \tag{4}$$

$$C_c = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}; \tag{5}$$

где S – площадь поверхности, м²;

d – расстояние между поверхностями, м;

ρ – удельная электропроводность, Ом·м;

ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками, ед.

Анализируя числитель реактивной части выражения (2) получим (6):

$$R_c^2 \cdot \omega \cdot C_c = R_c \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \rho. \tag{6}$$

Подставляя известные значения ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; для силиконового масла $\varepsilon_r = 2,2$ ед.; $\rho = 10^{13}$ Ом·м) и сравнивая активную и реактивную части полного сопротивления получим:

$$R_c \leq 194,7 \cdot R_c \cdot \omega. \tag{7}$$

Выражение (7) верно для частот, где $\omega \geq \frac{1}{194,7}$ Гц. Таким образом, на исследователь-

ских частотах $10^3 - 10^5$ Гц значение реактивного сопротивления будет намного больше значения активного сопротивления.

При жидкостном режиме трения флуктуации временной функции электрического сопротивления $Z(t)$ незначительны. При переходе к полужидкостному режиму трения возникают микроконтакты деталей в зоне трения. Это приводит к резкому снижению реактивной составляющей комплексного сопротивления $X(t)$ и дополнительным флуктуациям функции $Z(t)$. Если состояние контактирующих поверхностей в зоне трения эндопротеза худшего качества, то соприкосновение поверхностей происходит чаще и микроконтакты более длительны. Такие процессы происходят в режиме граничного трения, когда смазочный материал практически вытесняется из зоны трения и функция комплексного электрического сопротивления определяется в основном активным сопротивлением $R(t)$. К флуктуациям функции $Z(t)$ также будут приводить местные (локальные) неоднородности поверхности трения (задиры, зацепы, результаты адгезионных взаимодействий контактирующих поверхностей, загрязне-

ние смазочного материала (синовиальной жидкости) и изменение реологических свойств смазочного материала.

В качестве диагностического параметра предлагается использовать нормированное интегральное время электрического контактирования, K :

$$K = \frac{1}{T_{и}} \sum_{i=1}^{n_T} (t_{ki} - t_{ni}), \quad (8)$$

где $T_{и}$ – время измерения, с;

n_T – число отрезков в трибосопряжении эндопротеза, соответствующих $R(t) - X(t) \geq 0$ за время $T_{и}$, ед;

$t_{к(н)i}$ – время начала (конца) i -го отрезка, соответствующего условию $R(t) - X(t) \geq 0$, с.

Изменяясь от 0 при жидкостной смазке до 1 при граничной смазке, параметр K является статистической оценкой вероятности микроконтактирования в трибосопряжении эндопротеза сустава.

По полученному значению K делается вывод о режиме трения в эндопротезе, о состоянии макро- и микрогеометрии контактирующих деталей, о вероятности дальнейшего использования эндопротеза или его забраковке. Контрольные значения K для эндопротезов определяются на основании статистической обработки результатов ресурсных испытаний для эндопротезов различных типоразмеров.

Сущность метода поясняется чертежами, приведенными на рисунках 1-3.

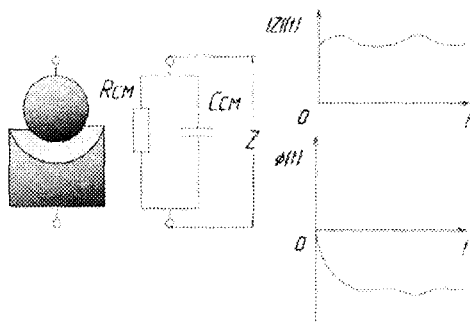


Рисунок 1 – Схема контактирования поверхностей эндопротеза при жидкостном режиме трения

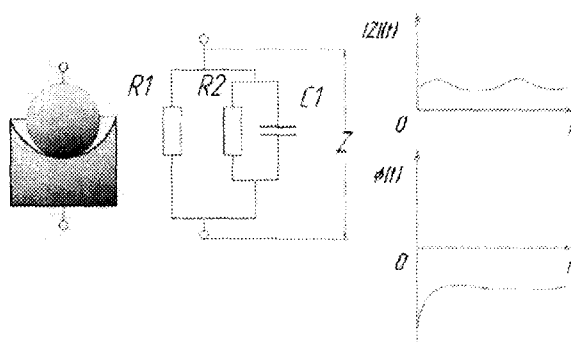


Рисунок 2 – Схема контактирования поверхностей эндопротеза при смешанном режиме трения

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

На рисунке 4 представлена структурная схема для испытаний эндопротезов суставов. Эндопротез сустава, состоящий из металлической суставной чаши 3 и ножки 1 с бедренной головкой 2, устанавливают в испытательный стенд, который представляет собой контейнер 5, выполненный из непроводящего материала и заполненный диэлектрической жидкостью 4, разделяющей контактирующие поверхности эндопротеза сустава. Суставную чашу эндопротеза 3 закрепляют в держателе 5, который вращается с помощью электропривода 7, имитируя вращательные движения сустава.

Нагружение осуществляют регулируемой осевой силой (значение которой изменяется в зависимости от типа и размера эндопротеза), прикладываемой перпендикулярно поверхности основания. Для создания такой нагрузки используется устройство нагружения 13, позволяющее в ручном режиме устанавливать значение действующей осевой силы. Токосъемник 12 подключен к ножке эндопротеза 1, снимаемый сигнал передается на делитель 10.

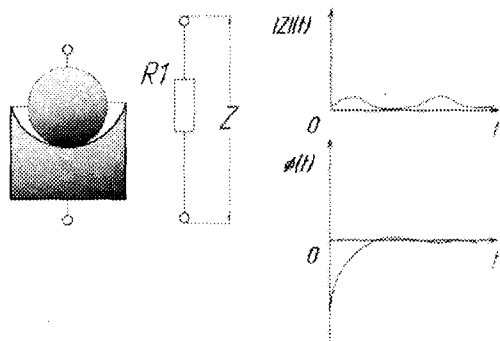


Рисунок 3 – Схема контактирования поверхностей эндопротеза при граничном режиме трения

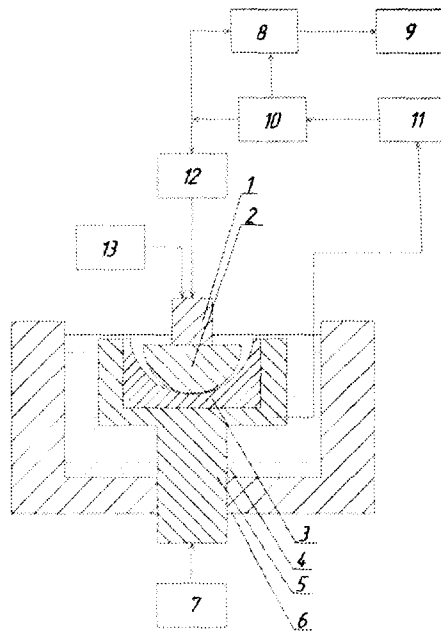


Рисунок 4 – Структурная схема стенда для испытаний эндопротезов суставов

Временная функция напряжения на делителе 10 пропорциональна электрическому сопротивлению зоны трения и отражает реальный процесс микроконтактирования в зоне трения эндопротеза. Напряжение на делитель подается с генератора 11, а с делителя поступает на цифровой осциллограф 8, который в свою очередь связан с ЭВМ 9.

Внешний вид испытательной установки представлена на рисунке 5.

Электродвигатель 1 соединен через переходник 2 с ножкой эндопротеза 6, которая вставлена в чашку 7, соединенную через пружину 5 с корпусом 9. Гайки 4 болтов 3 позволяют регулировать осевую силу с помощью тарированной пружины 5. Таким образом, планируется получить первые экспериментальные сигналы, подтверждающие теоретические расчеты.

Предлагаемый подход к диагностированию эндопротезов на стадии испытаний позволит значительно упростить контроль качества производимых эндопротезов и поднять конкурентоспособность данного направления отечественной медицинской промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе теоретические зависимости, позволяют разработать метод диагностирования эндопротеза, основанный на измерении комплексного электрического сопротивления работающего эндопротеза с учетом факторов, характеризующих его параметры и качество. Рассмотренное экспериментальное оборудование может использоваться при выявлении корреляционных связей диагностических параметров и характеристик поверхностей эндопротеза в зоне трения.

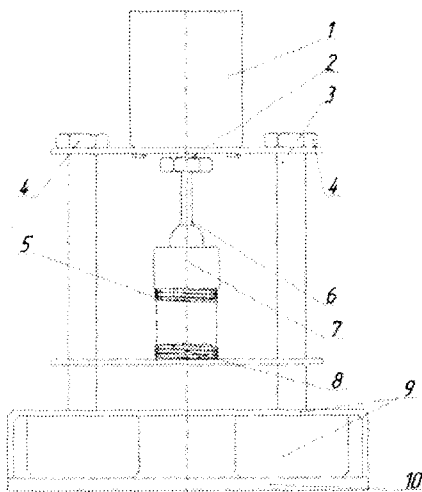


Рисунок 5 – Внешний вид испытательной установки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Whitby R.D. Tribological problems with medical implants // Worldwide. Tribology & Lubrication technology. – 2011. – № 1.
2. JianHua Z., Hua Z., ShiHu S. A bionic artificial joint system and investigation of tribological performance // Chinese Scientific Bulletin. – 2009. – 599-607 с.
3. Pinchuk L.S., Nikolaev V.I., Tsvetkova E.A., Goldade V.A. Tribology and biophysics of artificial joints. – GB: Elsevier B.V. – 2006. – 361 с.
4. J&J Hip Failure Rate as High as 49 Percent, U.K. Doctors Say [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.bloomberg.com/news/2011-03-09/j-j-hip-replacement-failure-rate-may-be-49-u-k-orthopedists-group-says.html>, свободный.
5. ГОСТ Р ИСО 9326-2005. Имплантаты для хирургии. Эндопротезы тазобедренного сустава частичные и тотальные. Лабораторные оценки изменения формы опорных поверхностей [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/40/4054.shtml>, свободный.
6. Bhushan B. I. Modern tribology handbook. – CRC Press LLC. – 2001. – 423 с.: ил. ISBN 0-8493-8403-6.
7. Подмастерьев, К.В. Электрические методы неразрушающего контроля и диагностики: учебное пособие / К.В. Подмастерьев, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачев, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева. – Орел: ОГТУ, 2005. – 316 с.: ил.
8. Способ диагностирования эндопротезов тазобедренных суставов с металлической парой трения [Текст]: пат 2435551 С1 RU: МПК А61F2/32 В.В. Мишин, О.С. Щепилина; заявл. 30.03.2010; опубл. 10.12.2011. Бюль. №34. – 7 с.: ил.

Некрасов Вадим Игоревич

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», Орёл
Аспирант кафедры ПМиС, научный сотрудник НОЦ «Диатрансприбор»
Тел.: (4862) 47-08-73;
E-mail: bea1231@yandex.ru

Мишин Владислав Владимирович

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», Орёл
Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «ПМиС»
E-mail: vlad89290@gmail.com

Жидков Алексей Владимирович

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», Орёл
Студент, научный сотрудник НОЦ «Диатрансприбор»
Тел.: +79536186827; E-mail: alexik1991@mail.ru

V.I. NEKRASOV, V.V. MISHIN, A.V. JIDKOV

**METHOD AND MEANS FOR DIAGNOSIS OF JOINTS
ENDOPROSTHESIS WITH A PAIR OF FRICTION METAL-ON-METAL
ON THE STAGES OF PRODUCTION**

The article deals with the problem of diagnosing joint endoprosthesis in the production phase, the classification of methods of diagnosing a pair of friction joints prostheses was submitted. Based on the analysis of the methods of diagnosis, selected electrical resistance method for diagnosis of joint prostheses with metal friction pair, describes the experimental device for testing and application of the proposed method.

Keywords: diagnosis, arthroplasty, joint friction, tribounit, wear the device.

BIBLIOGRAPHY

1. Whitby R.D. Tribological problems with medical implants // Worldwide. Tribology & Lubrication technology. – 2011. – № 1.
2. JianHua Z., Hua Z., ShiHu S. A bionic artificial joint system and investigation of tribological performance // Chinese Scientific Bulletin. – 2009. – 599-607 с.

3. Pinchuk L.S., Nikolaev V.I., Tsvetkova E.A., Goldade V.A. Tribology and biophysics of artificial joints. – GB: Elsevier B.V. – 2006. – 361 s.

4. J&J Hip Failure Rate as High as 49 Percent. U.K. Doctors Say [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.bloomberg.com/news/2011-03-09/j-j-hip-replacement-failure-rate-may-be-49-u-k-orthopedists-group-says.html>, svobodnyj.

5. GOST R ISO 9326-2005. Implantaty dlja hirurgii. Jendoprotezy tazobedrennogo sustava chastichnye i total'nye. Laboratornye ocenki izmenenija formy opornyh poverhnostej [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://vsegost.com/Catalog/40/4054.shtml>, svobodnyj.

6. Bhushan B. I. Modern tribology handbook. -- CRC Press LLC. – 2001. – 423 s.: il. ISBN 0-8493-8403-6.

7. Podmaster'ev, K.V. Jelektricheskie metody nerazrushajushhego kontrolja i diagnostiki: uchebnoe posobie / K.V. Podmaster'ev, S.F. Korndorf, T.I. Nogachev, E.V. Paholkin, L.A. Bondareva. – Orel: OGTU, 2005. – 316 c.: il.

8. Sposob diagnostirovanija jendoprotezov tazobedrennyh sustavov s metallicheskoj paroj trenija [Tekst]: pat 2435551 S1 RU: MPK A61F2/32 V.V. Mishin, O.S. Shhepilina; zajavl. 30.03.2010; opubl. 10.12.2011, Bjul'. №34. – 7 s.: il.

Nekrasov Vadim Igorevich

State University -- Education Science Production Complex, Orel
Aspirant of cathedra PMIS, research associate NOC "Diatranspibor"
Phone: (4862) 47-08-73; E-mail: bca1231@yandex.ru

Mishin Vladislav Vladimirovich

State University -- Education Science Production Complex, Orel
Candidate of Technical Sciences, professor of "Instrumentation, Metrology and Certification" chair
E-mail: vlad89290@gmail.com

Jidkov Alexey Vladimirovich

State University -- Education Science Production Complex, Orel
Student. Research associate NOC "Diatranspibor"
Phone: +79536186827; E-mail: alexik1991@mail.ru

М.В. ЛУНИН

СПОСОБ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ С КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРОВ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

*Рассмотрен способ исследования процесса развития микроорганизмов на питательной среде. Предложена математическая модель и средство измерения позволяющие контролировать динамику процесса развития микроорганизмов на питательной среде. Проведено экспериментальное исследование развития молочнокислых бактерий *Lactobacillus plantarum* на питательной среде.*

Ключевые слова: развитие бактерий; контроль процесса; реология среды; безопасность продуктов.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Существует множество способов культивирования и хранения штаммов микроорганизмов в лабораторных условиях. Например, известен метод хранения под минеральным маслом. Данный метод заключается в следующем: культуру микроорганизмов выращивают на благоприятной агаризованной питательной среде и заливают стерильным вазелиновым маслом, что замедляет скорость обменных процессов микроорганизмов и предохраняет поверхность среды от высыхания. Покрытые маслом культуры хранят в холодильнике при определенной температуре. При таком способе хранения, дрожжи и мицелиальные грибы рекомендуется пересевать через 2 – 3 года. Очевидно, на процесс развития микроорганизмов влияет множество факторов, что приводит к субъективности оценки времени посева той или иной культуры [1].

Несмотря на большое количество работ по исследованию развития клеток микроорганизмов на питательных средах, отсутствуют средства, обеспечивающие контроль параметров среды культивирования. По современным сведениям, более 99 % микроорганизмов, обитающих в окружающей среде, плохо культивируются в искусственных условиях. Это так называемые некультивируемые микроорганизмы, исследование которых сопряжено с необходимостью их сохранения. Так, например, при реализации способа хранения микроорганизмов под минеральным маслом, существует важный недостаток, связанный с отсутствием средства контроля свойств питательной среды и покрывающего слоя масла при его длительном хранении [1].

Таким образом, работы направленные на получение более четких представлений по управлению процессами культивирования и хранения конкретных микроорганизмов сохраняют свою актуальность. Что обеспечивает вклад в проблему сохранения все увеличивающегося биологического разнообразия.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДЛАГАЕМОГО СПОСОБА

Основными параметрами, влияющими на интенсивность развития микроорганизмов, являются физико-химические свойства питательной среды, которые обуславливаются концентрацией и степенью дисперсности её составных компонентов. Их можно разделить на свойства, на которые существенно влияют частицы всех дисперсных фаз, и свойства, зависящие от истинно растворимых составных компонентов питательной среды. Одно из таких свойств – вязкость.

Существуют различные методы определения вязкости жидкостей: с помощью падающего шарика (метод Стокса), истечения жидкости через капилляр (метод Пуазейля), определение вязкости с помощью ротационных вискозиметров (вискозиметр Воларовича, вискозиметр Шведова) [2]. Известен принцип измерения реологических свойств жидкости, основанный на использовании пузырька газа, сформированного на выходе сопла. При его реализа-

ции измеряется время прохождения пузырьком определенных участков, расположенных на траектории его подъема, с определением динамической вязкости по косвенным зависимостям и метрологической оценкой результатов измерения [3].

При описании поведения пузырька газа при различных температурах и давлениях использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса. Объем газа в пузырьке определим по формуле:

$$V_G = \frac{m_G}{\rho_G} \cdot \frac{p_N \cdot (V_M - b)}{R \cdot T}, \quad (1)$$

где T – температура газа в пузырьке;

R – универсальная газовая постоянная;

b – константа Ван-дер-Ваальса;

m_G – масса газа;

ρ_G – плотность газа при нормальных условиях;

p_N – нормальное давление;

V_M – молярный объем газа.

На движущийся в вязкой жидкости пузырёк газа действуют силы, для которых справедливо соотношение:

$$F_A - F_{TR} - m_G \cdot d\nu/dt = 0, \quad (2)$$

где F_A – сила Архимеда;

F_{TR} – сила трения;

$m_G \cdot d\nu/dt$ – сила, действующая на движущийся с ускорением пузырёк (при равномерном движении сила равна нулю).

При этом для предельных значений скорости ν_0 справедливо выражение Стокса:

$$F_{TR} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R_S \cdot \nu_0, \quad (3)$$

где ν_0 – предельное значение скорости при равномерном движении;

R_S – радиус шара, движущегося в жидкости;

η – динамическая вязкость жидкости.

Сила Архимеда определяется выражением:

$$F_A = m_L \cdot g = \rho_L \cdot V_G \cdot g, \quad (4)$$

где ρ_L – плотность вязкой жидкости;

g – ускорение свободного падения.

Учитывая силы, действующие на сферический пузырёк, запишем:

$$V_G = \sqrt{\frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot T}{\rho_L \cdot g \cdot p_N \cdot (V_M - b)} \cdot \nu_0 \right)^3}. \quad (5)$$

Перепишем уравнение (5), получим зависимость изменения вязкости от скорости движения пузырька газа:

$$\eta(\nu_0) = \frac{\sqrt[3]{\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot V_G^2 \cdot (\rho_L \cdot g \cdot p_N \cdot (V_M - b))}}{6 \cdot \pi \cdot R \cdot T \cdot \nu_0}. \quad (6)$$

Формула (6) справедлива учитывая, что процесс развития микроорганизмов происходит при постоянной температуре ($T = \text{const}$, тогда $V_G = \text{const}$ и $\rho_L = \text{const}$).

При этом возможно решение задачи контроля температуры вязкой среды [4, 5], в которой происходит развитие микроорганизмов, для этого воспользуемся формулой Пуазейля:

$$\eta = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R_S^2 \cdot t}{4 \cdot l^2} \cdot \left(\frac{R_C^2}{R_S^2} - 1 \right), \quad (7)$$

где t – время прохождения пузырьком пути l (учитывая предельное значение скорости, справедливо: $v_0 = l/t$);

R_C – радиус измерительной кюветы.

Разность давлений $(p_1 - p_2)$ определим по формуле:

$$(p_1 - p_2) = \rho_L \cdot g \cdot (h_1 - h_2), \quad (8)$$

где h_1 и h_2 – высоты столбов вязкой среды.

Для учета молярного объема воспользуемся формулой Бачинского:

$$\eta = \frac{c}{V_M - b}, \quad (9)$$

где c – коэффициент Бачинского.

Учитывая (5), (7), (8) и (9) получим зависимость температуры от времени всплывания пузырька $T(t)$ в виде:

$$T(t) = \frac{16}{6 \cdot \pi} \cdot \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \pi}{3 \cdot V_G} \cdot \frac{V_G \cdot P_N \cdot c \cdot l}{\rho_L \cdot g \cdot R_C^4 \cdot R \cdot t}}. \quad (10)$$

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ И РЕАЛИЗУЮЩЕЕ ЕГО УСТРОЙСТВО

Способ контроля вязкости питательной среды заключается в следующем:

- 1) в вязкой питательной среде формируется газовый зонд (плотность которого много меньше плотности среды);
- 2) обеспечивается его свободное всплывание и контролируется скорость прохождения им определенных участков траектории движения;
- 3) определяется вязкость среды по формуле (6).

Для реализации предлагаемого способа разработано устройство, принцип которого поясняется функциональной схемой представленной на рисунке 1.

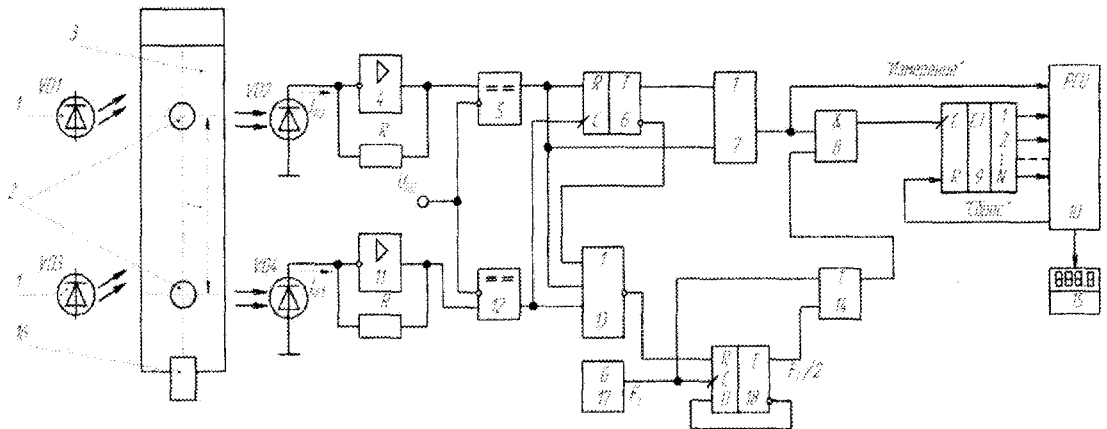


Рисунок 1 – Функциональная схема устройства контроля реологии среды

Устройство на рисунке 1 работает следующим образом. При движении пузырька газа 2 вдоль оси цилиндра вязкой жидкости сначала повышается ток $I_{\Phi 1}$ и напряжение на выходе усилителя 11 становится больше опорного $U_2 = I_{\Phi 1} R > U_{Op}$. При этом срабатывает компаратор 12, сравнивающий напряжения U_2, U_{Op} и формирует импульс длительностью $T_{п1}$. Затем повышается напряжение на выходе усилителя 4 и срабатывает компаратор 5, формирующий импульс с длительностью $T_{п2}$. Триггер 6 срабатывает по фронту импульса напряжения U_4 на выходе компаратора 12 и возвращается в исходное состояние по фронту импульса U_3 на выходе компаратора 5, поступающего на R-вход триггера 6. К выходам компараторов 5, 12 под-

ключен элемент 7 типа 2ИЛИ для формирования интервала измерения T_1 , а также элемент 13 типа 3ИЛИ-НЕ, которым выделяется интервал $\Delta T_1 = T_1 - T_{11} - T_{12}$ времени между выходными импульсами компараторов 5, 12.

При появлении на инверсном выходе триггера 6 нулевого уровня напряжения и наличии нулевых сигналов на выходах компараторов 5 и 12 появляется высокий (единичный) уровень напряжения на выходе элемента 13 типа 3ИЛИ-НЕ, выходным сигналом U_7 которого устанавливает в нулевое состояние триггер 18. При этом на выходе логического элемента 14 типа 2ИЛИ формируются импульсы с частотой F_T , а в остальное время частота этих импульсов уменьшается вдвое до уровня $0,5F_T$.

С выхода элемента 14 типа 2ИЛИ импульсы напряжения U_{10} переключаемой частоты через логический элемент 8 типа 2И поступают на счетный вход счетчика 9. Элемент типа 2ИЛИ 7 применен для выделения времени измерения T_1 и формирует сигнал U_6 при появлении высокого уровня напряжения на выходах триггера 6 или компаратора 5. Этот сигнал U_6 также поступает на микропроцессор 10 как команда "Измерение", вначале которой микропроцессор 10 формирует короткий импульс, подаваемый на R-вход счетчика импульсов 9 для его установки в нулевое состояние. Поэтому счетчик 9 реализует операцию цифрового измерения интервала времени T_1 посредством его заполнения тактовыми импульсами с переключаемой частотой F_T и $0,5F_T$. При этом число импульсов, поступающих с выхода элемента 8 на счетчик 9 в течение интервала одного измерения, определяется формулой:

$$N_{11} = 0,5F_T \cdot (T_{11} + T_{12}) + F_T \cdot \Delta T_1. \quad (11)$$

По окончании цикла измерения полученный код N_{11} с выходов счетчика 9 записывается в оперативное запоминающее устройство микропроцессора 10. Далее определяют и запоминают температуру вязкой жидкости по формуле (4). Полученное значение выводится на цифровой индикатор 15 [6].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ

Рассмотрим процесс развития молочнокислых бактерий *Lactobacillus plantarum* на питательной среде. Вязкость молока определяется его составными компонентами, находящимися в эмульгированном и коллоидном состояниях. Физико-химические свойства, в том числе вязкость, все больше используются для оценки качества питательных сред в целом и молока в частности.

Вязкость молока можно представить как сумму вязкости воды и приращений вязкости от дисперсной фазы (белки, жиры углеводы) и структурных связей. Структурная составляющая вязкости исчезает при температуре более 34 °С в связи с плавлением молочного жира и интенсивным тепловым движением самих элементов структуры. На вязкость молока влияют эмульгированные и коллоидно растворимые частицы, в частности, жира, казеина, а также наличие агломератов жировых шариков, состояния казеина (гидратация, величина мицелл), сывороточных белков, режим и способ обработки молока. При 20 °С вязкость цельного молока может изменяться от 0,0013 до 0,0035 Па·с. При развитии в молоке молочнокислых бактерий углеводы, белки, биологически активные вещества используются микроорганизмами в пищу. Ферменты микроорганизмов катализируют гидролиз сложных биополимеров молока, снижается их концентрация, в то же время концентрация низкомолекулярных продуктов метаболизма бактерий увеличивается. В результате жизнедеятельности молочнокислых бактерий динамическая вязкость сложной дисперсной системы – молока уменьшится, что может быть критерием оценки его качества, как питательной среды.

На рисунке 2 показано изменение вязкости молока в зависимости от продолжительности развития молочнокислых бактерий *Lactobacillus plantarum* 8P-A3 с учетом среднеквадратического отклонения. В течение 52 мин бактерии не изменяли вязкость молока, что характерно для лаг-фазы развития микробной культуры. Затем микроорганизмы вступают в лог-фазу, которая характеризуется интенсивным потреблением питательных веществ и размножением. На 117 минуте наступает стационарная фаза развития микробной культуры, динамическая вязкость молока снизилась до 0,0005 Па·с и более не изменялась.

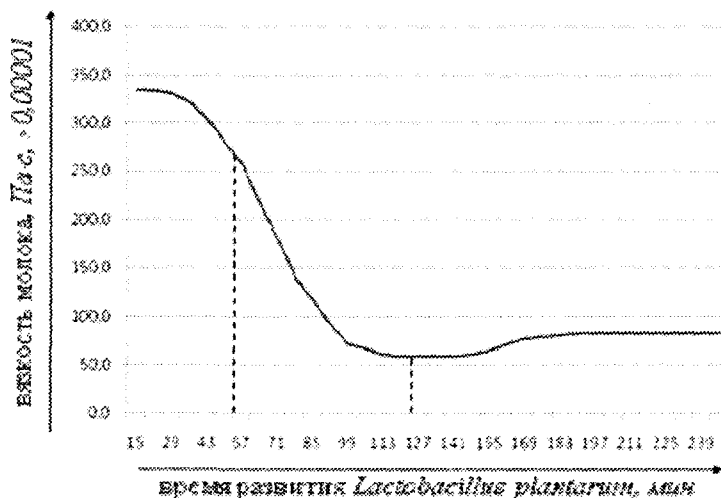


Рисунок 2 – Влияние продолжительности развития *Lactobacillus plantarum* 8P-A3 на показатель динамической вязкости молока при постоянной температуре

ВЫВОД

Предложенный принцип измерения динамической вязкости жидкости, в частности молока, основанный на движении пузырька газа в жидкости позволяет осуществлять контроль за качеством цельного молока и контролировать в нем процесс развития молочнокислых бактерий. Подобное средство измерения может найти применение в различных биотехнологиях. Например, в технологии пищевых продуктов, где проводят инструментальный контроль концентрации растворов компонентов, для настройки дозаторов и получения полуфабриката с определенными реологическими свойствами [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колпакова, С.Д. Разработка методики применения фотоэлектроколориметра в микробиологических исследованиях / С.Д. Колпакова, Г.А. Колпакова // Труды конференции. «III международная школа-семинар». – Санкт-Петербург. – 2001. – С. 108-111.
2. Доня, Д.В. Инженерная реология: учебное пособие / Д.В. Доня, А.А. Леонов. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – 2008.
3. Лунин, М.В. Дискретный пузырьковый метод и средство измерения малых расходов газа с учётом параметров среды, используемой для барботажа / М.В. Лунин // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 2. – С. 66-68.
4. Лунин, М.В. Метод и средство контроля температуры вязких жидкостей / М.В. Лунин, М.С. Костин, А.Ю. Медведева // Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 3-2/275(561). – С. 66-72.
5. Лунин, М.В. Анализатор для определения концентрации компонентов биологических жидкостей в диагностике раннего рака / М.В. Лунин, М.В. Яковенко, А.В. Жидков, А.М. Телешев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 6(290). – С. 66-72.
6. Лунин, М.В. Система контроля концентрации вещества в однокомпонентных растворах / М.В. Лунин, Е.О. Позднякова // Современные материалы, техника и технология: материалы 2-й Международной научно-практической конференции (25 декабря 2012 года) / редкол.: Горохов А.А. – Курск: Юго-Зап. Гос. Ун-т. – 2012.
7. Лунин, М.В. Информационно-измерительная система контроля концентраций оптически прозрачных растворов / М.В. Лунин, В.Я. Черных, А.В. Артамонов, А.В. Шумов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 5.

Лунин Максим Викторович

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», г.Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроения метрологии и сертификации»

Тел. 8(910)309-84-02

E-mail: maksixAM@yandex.ru

M.V. LUNIN

METHOD OF RESEARCH DEVELOPMENT PROCESS OF MICROORGANISMS WITH CONTROL PARAMETERS OF NUTRITIONAL ENVIRONMENT

*Provides a method for studying the process of the development of microorganisms in a nutrient medium. A mathematical model and a measurement tool to monitor the dynamics of the growth of microorganisms in a nutrient medium. An experimental study of the development of lactic acid bacteria *Lactobacillus plantarum* on nutrient.*

Keywords: development of bacteria; control process; rheology environment; safety products.

BIBLIOGRAPHY

1. Kolpakova, S.D. Razrabotka metodiki primeneniya fotojelektrokolorimetra v mikrobiologicheskikh issledovaniyah / S.D. Kolpakova, G.A. Kolpakova // Trudy konferencii. «III mezhdunarodnaja shkola-seminar». – Sankt-Peterburg. – 2001. – S. 108-111.
2. Donja, D.V. Inzhenernaja reologija: uchebnoe posobie / D.V. Donja, A.A. Leonov. – Kemerovo: Kemerovskij tehnologicheskij institut pishhevoj promyshlennosti. – 2008.
3. Lunin, M.V. Diskretnyj puzyr'kovyj metod i sredstvo izmereniya malyh rashodov gaza s uchjotom parametrov sredy, ispol'zuej dlya barbotazha / M.V. Lunin // Kontrol'. Diagnostika. – 2010. – № 2. – S. 66-68.
4. Lunin, M.V. Metod i sredstvo kontrolja temperatury vjazkih zhidkostej / M.V. Lunin, M.S. Kostin, A.Ju. Medvedeva // Izvestija Orel'-GTU. Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2009. – № 3-2/275(561). – S. 66-72.
5. Lunin, M.V. Analizator dlja opredelenija koncentracii komponentov biologicheskikh zhidkostej v diagnostike rannego raka / M.V. Lunin, M.V. Jakovenko, A.V. Zhidkov, A.M. Telepnev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2011. – № 6(290). – S. 66-72.
6. Lunin, M.V. Sistema kontrolja koncentracii veshhestva v odnokomponentnyh rastvorah / M.V. Lunin, E.O. Pozdnjakova // Sovremennye materialy, tehnika i tehnologija: materialy 2-j Mezhdunarodnoj nauch-no-prakticheskoi konferencii (25 dekabnja 2012 goda) / redkol.: Gorohov A.A. – Kursk: Jugo-Zap. Gos. Un-t. – 2012.
7. Lunin, M.V. Informacionno-izmeritel'naja sistema kontrolja koncentracii opticheski prozrachnyh rastvorov / M.V. Lunin, V.Ja. Chernyh, A.V. Artamonov, A.V. Shumov // Hranenie i pererabotka sel'hozsy'r'ja. – 2012. – № 5.

Lunin Maxim Victorovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

PhD in Technical Sciences, Assistant Professor of Faculty - Instrument engineering, metrology and certification

Phone: (4862) 419876

E-mail: pms35@ostu.ru

УДК 504.61

В.А. ГОЛЕНКОВ, С.А. ВОРОБЬЕВ, Д.З. КОЗЛОВ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ БИОИНДИКАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Статья посвящена вопросу применения методов биоиндикации различных пород городских зеленых насаждений для оценки качества городской среды на примере участков города Орла, характеризующихся различными уровнями антропогенного воздействия.

Ключевые слова: биоиндикация; качество городской среды; городские зеленые насаждения.

Проблема сохранения и развития природной окружающей среды в условиях глобального экологического кризиса широко представлена в большом количестве исследований зарубежных и отечественных авторов, начиная с 70-х годов прошлого века возникла задача осмыслить сложившиеся тенденции эколого-экономического развития и разработать принципиально новую концепцию развития. На сегодняшний день проблема сохранения окружающей среды базируется на положениях концепции устойчивого развития, принятой во всем мире, послужившей основой для разработки стратегий охраны окружающей среды большинства стран мира, в том числе и России [1]. Не смотря на огромную положительную роль концепции устойчивого развития в международном сотрудничестве в области охраны окружающей среды (соглашение об ограничении эмиссии парниковых газов), ужесточении экологического законодательства, развитии ресурсо-энергоэффективности строительства и городского хозяйства [2], пока не существует научно обоснованного подхода к созданию полностью биосферосовместимого хозяйства. В этой связи особый интерес вызывает концепция биосферной совместимости, предложенная вице-президентом РААСН, д-ром техн. наук, проф. В.А. Ильичевым [3]. Согласно этой концепции для расчета баланса био- и техносферы в качестве показателей загрязнений окружающей среды могут быть использованы традиционные и нормируемые сегодня величины промышленных выбросов в сравнении с ПДК, площади озеленения, интенсивность очищения окружающей среды различными рекреационными зонами и другие показатели оценки антропогенного воздействия на биосферу [4, 5, 6, 7, 8]. Общая концепция и иерархия связей представлена в матрице преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека [3], на основе, которой нами предлагается матрица развития урбанизированной территории на основе гомеостаза (самоподдержания) баланса Биотехносферы (табл. 1).

Реализация второй клетки данной матрицы невозможна без текущей оценки качества окружающей городской среды, как отправной точки для прогнозирования развития урбанизированной территории и разработки природоохранных мероприятий. В качестве одного из перспективных методов оценки качества окружающей среды выступают методы биоиндикации, которые выгодно отличаются от традиционных лабораторных методов исследования основных сред (атмосфера, почва, водные объекты) простотой, скоростью выполнения работ и их низкой стоимостью. Использование методов биоиндикации не требует специального узкого образования и позволяет оценивать окружающую среду непосредственно инженеру-градостроителю.

В качестве тест-объектов для исследования методами биоиндикации целесообразно применять зеленые насаждения. Городские зеленые насаждения широко применяются при формировании городских ландшафтов, выполняя множество полезных функций, важнейшей из которых является средозащитная [9]. В тоже время, на аккумулирующую способность зеленых насаждений оказывает влияние множество факторов от метеорологических условий, до видового состава. В результате одни и те же породы зеленых насаждений не одинаково аккумулируют загрязняющие вещества в разных географических зонах, а значит и их средозащитная способность проявляется неодинаково [10,11]. Кроме того, растения поглощая загрязняющие вещества сами подвергаются неблагоприятному воздействию, в результате нарушаются протекающие в них физиологические процессы, что сказывается в итоге на их

способности аккумулировать и иммобилизовывать загрязнители [12,13]. Поэтому возникает необходимость определения оптимального видового состава городских зеленых насаждений для конкретных географических и антропогенных условий.

Таблица 1 – Матрица развития урбанизированной территории на основе гомеостаза баланса Биотехносферы

1. Гармоничное сосуществование урбанизированных территорий и окружающей природы	4. Нормативно-правовое обеспечение поддержания баланса Биотехносферы	7. Функции города, обеспечивающие развитие урбанизированной территории
2. Анализ взаимодействия компонентов городской экосистемы (выбросы техносферы, биологические объекты, человек)	5. Знания как основа управления биотехносферными процессами в городских экосистемах	8. Надежность – программа развития урбанизированного поселения на основе концепции биосферной совместимости
3. Баланс Биотехносферы - Тройственный баланс демографических, техносферных и биологических показателей городской экосистемы	6. Прогресс, сопоставление планируемых параметров городской экосистемы с фактическими	9. Познание – новые подходы к формированию городской среды и развитию урбанизированных территорий

Целью нашего исследования являлась оценка качества окружающей городской среды такими методами биоиндикации как определение площади листьев городских зеленых насаждений, вычисление коэффициента флуктуирующей асимметрии и исследование токсичности почвы путем проращивания семян кресс-салата на водных вытяжках из почвы, на примере сходных по своим градостроительным параметрам участков г. Орла, как типичного областного центра Европейской части России, а также определение наиболее устойчивой к проявлению антропогенного воздействия породы городских зеленых насаждений для условий северной подзоны лесостепной зоны.

Для выявления антропогенного воздействия на городские экосистемы нами были определены участки городской территории сходные по параметрам биосферы (площадь и видовой состав зеленых насаждений), техносферы (источники загрязнения), демографическим (количество жителей) и градостроительным (тип застройки, близость промышленных предприятий, автодорог и т.д.) факторам [14]. В качестве таких территорий нами были выбраны следующие участки: территория, прилегающая к корпусу №7 (ул. Московская 77) Госуниверситета-УНПК (участок 1), парковый ландшафт главного корпуса ОГУ (остановка «м-н Чайка») (участок 2), территория, прилегающая к музею писателей-орловцев (участок 3). Все эти участки характеризуются одинаковой застройкой (преобладание пятиэтажных зданий, отсутствие высотной застройки, ровный рельеф), характеристиками антропогенного воздействия (преобладание выбросов автотранспорта, из-за расположения в непосредственной близости крупных автомагистралей, отсутствия крупных предприятий и квартальных котельных), одинаковой площадью (около 4 га), одинаковым составом зеленых насаждений (основными древесными породами являются дуб черешчатый, клен остролистный и береза бородавчатая, растения одинакового возраста и размера), одинаковым количеством жителей (около 14000 человек). Таким образом, все указанные участки характеризуются одинаковым качественным проявлением факторов антропогенного воздействия и разной степенью количественного проявления этих факторов. В качестве контрольного участка, не испытывающего на себе воздействия указанных факторов, нами был выбран участок Медведевского леса (участок 4).

В качестве основного источника загрязнения на всех исследуемых участках был выбран автотранспорт, так как на его долю приходится значительная часть всех выбросов в атмосферу в г. Орле [15]. Для определения количества автомобилей, для последующего вычис-

ления объемов выбросов, на исследуемых участках проводился подсчет в час пик, в течение года два раза в месяц. Отмечалось количество автомобилей за 30 мин с последующим пересчетом за 1 час. Автомобильный поток разбивался по категориям: легковой автомобильный транспорт; грузовой, с дизельным двигателем; грузовой, с карбюраторным двигателем; автобусный, с дизельным двигателем; автобусный с карбюраторным двигателем; троллейбусный; микроавтобусы. Разделение было произведено для более точной оценки экологической нагрузки, т.к. каждая из приведенных категорий характеризуется специфическим набором выбросов.

Нагрузка автотранспорта составила 2067, 1528, 1231 ам/ч, для участков 1, 2 и 3 соответственно.

Листья деревьев городских зеленых насаждений отбиралась по принятым методикам в нижней части кроны на расстоянии вытянутой руки со стороны, обращенной к проезжей части [16, 17]. Использовались только средневозрастные растения. Листья отбирались одного, среднего для данного вида размера.

В ходе исследования были получены следующие данные (табл. 2):

Таблица 2 – Площадь листьев зеленых насаждений.

Место отбора проб	Площадь листьев деревьев городских зеленых насаждений, см ² .		
	Дуб черешчатый	Клен ясенелистный	Липа сердцевидная
Участок 1	15,20,15	20,70,27	14,50,12
Участок 2	19,70,21	25,30,34	16,050,16
Участок 3	26,30,18	36,70,26	20,30,17
Участок 4 (контроль)	27,50,24	44,30,52	24,20,25

К общим для всех исследуемых пород тенденциям относится, тот факт, что величина листьев с уменьшением количества автотранспорта увеличивается и является наибольшей у растений контрольных групп. У всех трех исследуемых пород наибольшая, после контрольной группы, площадь листьев отмечается на участке №3, далее участке №2 и наименьшая на участке №1. Таким образом, проявляется влияние выбросов автотранспорта на исследуемые растения, которое выше на тех участках, где больше автонагрузка. Но у каждой исследуемой породы есть и свои различия.

Площадь листьев клена ясенелистного является наибольшей среди исследуемых пород городских зеленых насаждений, что связано с видовыми особенностями данной породы. Наибольшая площадь листьев приходится на растения контрольной группы (участок №4), далее следуют растения участка №3, №2 и наименьшая площадь приходится на растения участка №1. Разница между наибольшим и наименьшим значением составила 2 раза.

Таким образом, прослеживается зависимость между количеством автотранспорта и величиной площади листьев исследуемых растений. Эту зависимость подтверждает коэффициент корреляции, составляющий $r=-0,92$.

Средние величины площади листьев дуба черешчатого меньше, чем клена ясенелистного, но больше липы сердцевидной, что также связано с видовыми особенностями. Наибольшие значения площади листьев приходятся также на растения контрольной группы (участок №4), далее, как и в предыдущем случае идут растения участков №3, №2, №1. Разница между наибольшими и наименьшими значениями составляет также 2 раза.

Коэффициент корреляции величины площади листьев дуба черешчатого и количества транспорта на исследуемых участках составляет $r=-0,96$ и указывает на ярко выраженную обратную зависимость.

Средние величины площади листьев липы сердцевидной наименьшие среди исследуемых пород городских зеленых насаждений. Но это также указывает на видовые особенности данной породы, а не на большую чувствительность к условиям окружающей среды по срав-

нению с другими растениями. Наибольшие значения площади листьев у данной породы также приходится на растения контрольной группы (участок №4) и вся динамика распределения площади листьев липы сердцевидной по исследуемым участкам выглядит также как и в двух предыдущих случаях. Различия между средними величинами площади на исследуемых участках не такие крупные, как у других исследуемых пород городских зеленых насаждений и составляют 10 см. Этот факт говорит о большей устойчивости данной породы по сравнению с другими породами.

Для оценки флуктуирующей асимметрии используется величина соответствующей дисперсии (дисперсия относительного различия между сторонами), основанная на оценке величины дисперсии различий между сторонами не от нуля (строгой симметрии), а от некоторого различия между сторонами, имеющего место в рассматриваемой выборке и рассчитывается по формуле:

$$\sigma_d^2 = \frac{\sum (d_{i-r} - M_d)^2}{n-1} \quad (1)$$

где

$$M_d = \frac{\sum d_{i-r}}{n} \text{ - среднее различие между сторонами,} \quad (2)$$

$$d_{i-r} = \frac{2(d_i - d_r)}{d_i + d_r} \text{ - различие значений признаков,} \quad (3)$$

d_i – значение признака на левой стороне,

d_r – значение признака на правой стороне,

n – численность выборки.

Обработка выборки растений при определении величины коэффициента флуктуирующей асимметрии заключается в измерении длин жилок на листовой пластинке справа и слева [17].

Измерение жилок проводилось в зависимости от особенностей анализируемого вида: 1) у листьев липы сердцевидной измеряется первая пара жилок снизу (от основания черешка); 2) у листьев клена ясенелистного измеряется средние жилки боковых листочков сложного листа слева и справа; 3) у листьев дуба черешчатого измеряется вторая пара жилок от вершины листа. Измерение проводится в миллиметрах с точностью до 1 мм.

Показатель асимметрии указывает на неоптимальность среды обитания. Это может быть химическое загрязнение, изменение температуры, а также обитание биологического объекта на краю ареала и др. Результаты по определению коэффициента флуктуирующей асимметрии приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициента флуктуирующей асимметрии.

Место отбора проб	Значения коэффициента флуктуирующей асимметрии			
	Клен	ясенелистный	Дуб черешчатый	Липа сердцевидная
Участок 1	0,025		0,020	0,017
Участок 2	0,023		0,017	0,015
Участок 3	0,020		0,014	0,010
Участок 4 (контроль)	0,006		0,005	0,005

Наибольшие значения показателя флуктуирующей асимметрии наблюдаются у растений клена по всем трем точкам, затем следуют растения дуба и наименьшие наблюдаются у липы. У растений всех трех исследуемых пород городских зеленых насаждений наибольшие значения показателя асимметрии отмечаются на участке №1, далее на участке №2, на участке №3 и наименьшие на участке №4. В контрольных образцах значения показателя асимметрии на порядок меньше, чем в образцах на исследуемых участках, и их различия не настолько очевидны, что связано с тем, что в относительно благоприятных с экологической точки зрения условиях растения не подвергаются стрессу как в городских условиях, где проявляются

особенности видовой адаптации. Динамика распределения значения показателя флуктуирующей асимметрии совпадает с динамикой распределения автомобилей по исследуемым участкам.

Исследования токсичности почвы позволяют оценить влияние выбросов транспорта на ее биологическую активность. Используемый нами экспресс-метод определения токсичности путем проращивания семян кресс-салата на водных вытяжках из изучаемых почв показал следующие результаты (рис. 1).

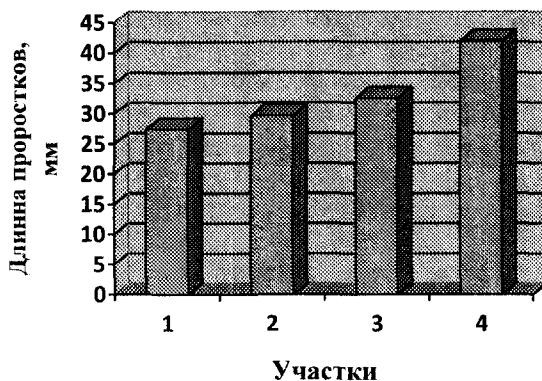


Рисунок 1 – Распределение проростков токсичности почвы на исследуемых участках

Средняя длина проростков, полученных на водной вытяжке из почвы участка № 1 составила – $27,5 \pm 0,32$ мм, участка № 2 – $29,7 \pm 0,34$ мм, участка № 3 – $32,6 \pm 0,34$ мм, участка № 4 – $42 \pm 0,32$ мм, на дистиллированной воде – $39,3 \pm 0,28$ мм. Таким образом, наименьшее значение биологической активности почвы отмечается на участке № 1, по сравнению с контрольной почвой ее значение уменьшилось на 34,5%. На участке с максимальной нагрузкой электротранспорта (участок № 3) и низкой общей загруженностью биологическая активность почвы снизилась на 22,4%. Таким образом, прослеживается обратная зависимость между количеством автомашин и токсичностью почвы. Коэффициент корреляции длины проростков и интенсивности транспортной нагрузки составил $r = -0,94$, что указывает на высокий уровень обратной зависимости.

Таким образом, анализируя данные по площади листьев городских зеленых насаждений и значениям коэффициента флуктуирующей асимметрии, необходимо отметить, что на всех исследуемых участках, кроме контрольного, растения испытывают стресс от воздействия выбросов автотранспорта. Наблюдается ярко выраженная зависимость биологических параметров зеленых насаждений и количества автотранспорта (а значит и количества выбросов), на что указывают высокие значения коэффициента корреляции этих факторов. Из трех исследуемых, наиболее типичных для условий г. Орла, пород зеленых насаждений наиболее устойчивой является липа сердцевидная, что указывает на нее как на оптимальный вид в специфических условиях антропогенного воздействия и географо-климатических условиях северной подзоны лесостепной зоны. Методы биоиндикации предоставляют достоверную картину качества окружающей среды, на основе оценки отклика живых организмов на антропогенное воздействие, что подтверждается математическими методами. Дальнейшие исследования будут связаны с разработкой методики учета биологических показателей городских зеленых насаждений на интегральный показатель биосферной совместимости урбанизированных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ № 440 от 1 апреля 1996 г.

2. Вайцеккер, Э. Фактор четыре [Текст] / Э.Вайцеккер, Э.Б. Ловинс, Л.Х.Ловинс. - М.: Прогресс.-2002

3. Ильичев, В.А. Может ли город быть биосферосовместимым и развивать человека? [Текст] / В.А. Ильичев // *Архитектура и строительство Москвы.-Москва, 2009. - №2. - С.12-58.*
4. Бакаева, Н.В. Критерий экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства на основе биосферосовместимых технологий [Текст] / Н.В. Бакаева, И.В. Шишкина // *Строительство и реконструкция. - № 1(45) – 2013 г. – С. 37-46.*
5. Голенков, В.А. Основные направления обеспечения экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства на основе биосферосовместимых технологий [Текст] / В.А. Голенков, Н.В. Бакаева, И.В. Шишкина // *Строительство и реконструкция. - № 2 – 2012 г. – С. 55-62.*
6. Воробьев, С.А. Мониторинг качества окружающей среды с позиции концепции биосферной совместимости на примере парковых ландшафтов г. Орла [Текст] / С.А. Воробьев, А.Л. Поздняков, Д.З. Козлов // *Строительство и реконструкция. - № 4 – 2009 г. – С. 44-47.*
7. Воробьев, С.А. Влияние структурных компонентов городских экосистем на расчет показателя биосферной совместимости [Текст] / С.А. Воробьев // *Строительство и реконструкция. - № 5 – 2009 г. – С. 18-21.*
8. Скобелева, Е.А. Вопросы проектирования быстровозводимых ресурсо-, энергоэффективных зданий дошкольных учреждений с позиции концепции биосферной совместимости [Текст] / Е.А. Скобелева, Н.В. Ключева, Н.Б. Андросова // *Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. - №3 – 2009 г. – С. 60-67.*
9. Городков, А.В. Архитектура, проектирование и организация культурных ландшафтов [Текст] / В.А. Городков - БГИТА. - г. Брянск, 2003. – 268 с.
10. Авраменко, И.М. Реконструкция зеленых насаждений в г. Белгороде [текст] / И.М. Авраменко // *Экология центрально-черноземной области РФ. – 2003. - №1. – С. 5-7.*
11. Артемова, С.Н. Антропогенные ландшафты городских территорий и проблемы их использования (на примере г. Пенза) [текст] / С.Н. Артемова // *Проблемы региональной экологии. – 2004. – №5. – С. 31-36.*
12. Базарский, О.В. Геоэкологическая модель простого распределения загрязнения от автомобильного транспорта [текст] / О.В. Базарский, А.А. Межова, С.С. Воронова // *Проблемы региональной экологии. – 2004. - №6. – С. 43-47.*
13. Буторина, Л.К. Цитогенетические нарушения в соматических клетках человека и березы повислой в районах г. Воронежа с различной интенсивностью антропогенного загрязнения [текст] / Л.К. Буторина, В.Н. Калаева, С.С. Карпов // *Экология. – 2002. - №6. – С. 438-441.*
14. Воробьев, С.А. Дифференцированное влияние элементов зеленых насаждений на расчет показателя биосферной совместимости урбанизированных территорий [текст] // С.А. Воробьев, А.В. Городков. *Материалы 1-й международной научно-практической конференции «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах».* Брянск, 2009. – С. 21-26.
15. Воробьев, С.А. Влияние выхлопов автотранспорта на содержание тяжелых металлов в городских экосистемах [текст] / С.А. Воробьев // *Безопасность жизнедеятельности. – 2003. - №10. - С 55-59.*
16. Воробьев, С.А. Влияние содержания тяжелых металлов в почве на распределение Рb в листе зеленых насаждений г. Орла [текст] / С.А. Воробьев // *Вестник Орловского отдела Русского географического общества. Выпуск 1. - Орел, 2002 г. - С. 42-48.*
17. Городков, А.В. Архитектура, проектирование и организация культурных ландшафтов [Текст] / В.А. Городков. - БГИТА. - г. Брянск, 2003. – 268 с.

Голенков Вячеслав Александрович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Доктор технических наук, президент
E-mail: president@ostu.ru

Воробьев Сергей Александрович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры Городское строительство и хозяйство
E-mail: vorser323@rambler.ru

Козлов Дмитрий Захарович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
старший преподаватель кафедры Городское строительство и хозяйство
E-mail: dimoktank@mail.ru

V.A. GOLENKOV, S.A. VOROBIEV, D.Z. KOZLOV

APPLICATION OF METHODS OF BIOINDICATION FOR EVALUATION ENVIRONMENTAL QUALITY

This article is devoted to the application of different breeds bioindication urban green areas to assess the quality of the urban environment on the example of areas of the Orel city, with different levels of human impact.

Keywords: *bioindication, the quality of the urban environment, urban green spaces.*

BIBLIOGRAPHY

1. Ukaz Prezidenta RF № 440 ot 1 aprelya 1996 g.
2. Vajczekker, Je. Faktor chetyre [Tekst]/ Je. Vajczekker, Je.B. Lovins, L.H.Lovins. - M.: Progress,-2002 – 220 s.
3. Il'ichev, V.A. Mozhet li gorod byt' biosferosovmestimym i razvivat' cheloveka? [Tekst]/ V.A. Il'ichev// Arhitektura i stroitel'stvo Moskvyy.-Moskva, 2009. - №2. - S.12-58.
4. Bakaeva, N.V. Kriterij jekologicheskoy bezopasnosti avtotransportnoj infrastruktury gorodskogo hozjajstva na osnove biosferosovmestimyh tehnologij [Tekst] / N.V. Bakaeva, I.V. Shishkina// Stroitel'stvo i rekonstrukcija. - № 1(45) – 2013 g. – S. 37-46.
5. Golenkov, V.A. Osnovnye napravlenija obespechenija jekologicheskoy bezopasnosti avtotransportnoj infrastruktury gorodskogo hozjajstva na osnove biosferosovmestimyh tehnologij [Tekst] / V.A. Golenkov, N.V. Bakaeva, I.V. Shishkina // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. - № 2 – 2012 g. – S. 55-62.
6. Vorob'ev, S.A. Monitoring kachestva okruzhajushhej sredy s pozicii koncepcii biosfernoj sovme-stimosti na primere parkovyh landshaftov g. Orla [Tekst] / S.A. Vorob'ev, A.L. Pozdnjakov, D.Z. Kozlov // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. - № 4 – 2009 g. – S. 44-47.
7. Vorob'ev, S.A. Vlijanie strukturnyh komponentov gorodskih jekosistem na raschet pokazatelja bio-sfernoj sovme-stimosti [Tekst] / S.A. Vorob'ev // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. - № 5 – 2009 g. – S. 18-21.
8. Skobeleva, E.A. Voprosy proektirovanija bystrovozvodimyh resurso-, jenergojefektivnyh zdaniy doshkol'nyh uchrezhdenij s pozicii koncepcii biosfernoj sovme-stimosti [Tekst] / E.A. Skobeleva, N.V. Klju-eva, N.B. Androsova // Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i transport. - №3 – 2009 g. – S. 60-67.
9. Gorodkov, A.V. Arhitektura, proektirovanie i organizacija kul'turnyh landshaftov [Tekst] / V.A. Gorodkov-BGITA. - g. Brjansk, 2003. – 268 s.
10. Avramenko, I.M. Rekonstrukcija zelenyh nasazhdenij v g. Belgorode [tekst] / I.M. Avramenko // Jekologija central'no-černozemnoj oblasti RF. – 2003. - №1. – S. 5-7.
11. Artemova, S.N. Antropogennye landshafty gorodskih territorij i problemy ih ispol'zovanija (na primere g. Penza) [tekst] / S.N. Artemova // Problemy regional'noj jekologii. – 2004. - №5. – S. 31-36.
12. Bazar'skij, O.V. Geojekologičeskaja model' prostogo raspredelenija zagrjaznenija ot avtomobil'nogo transporta [tekst] / O.V. Bazar'skij, A.A. Mezhovala, S.S. Voronova // Problemy regional'noj jekologii. – 2004. - №6. – S. 43-47.
13. Butorina, L.K. Citogeneticheskie narushenija v somaticheskikh kletkah cheloveka i berezy povisloj v rajonah g. Voronezha s razlichnoj intensivnost'ju antropogennogo zagrjaznenija [tekst] / L.K. Butorina, V.N. Kalaevala, S.S. Karpov // Jekologija. – 2002. - №6. – S. 438-441.
14. Vorob'ev, S.A. Differencirovanoe vlijanie jelementov zelenyh nasazhdenij na raschet pokazatelja biosfernoj sovme-stimosti urbanizirovannyh territorij [tekst] // S.A. Vorob'ev, A.V. Gorodkov. Materialy 1-j mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoy konferencii «Problemy innovacionnogo biosferno-sovme-stimogo social'no-jekonomičeskogo razvitiija v stroitel'nom, zhilishhno-kommunal'nom i dorozhnom kompleksah». Brjansk, 2009. – S. 21-26.
15. Vorob'ev S.A. Vlijanie vyhlopov avtotransporta na sodержanie tjazhelyh metallov v gorodskih jekosistemah [tekst] / S.A. Vorob'ev // Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti. – 2003.- №10.- S 55-59.
16. Vorob'ev S.A. Vlijanie sodержanija tjazhelyh metallov v pochve na raspredelenie Pb v listve zele-nyh nasazhdenij g. Orla [tekst] / S.A. Vorob'ev// Vestnik Orlovskogo otdela Russkogo geograficheskogo obshhe-stva. Vypusk 1. - Orel, 2002 g.- S. 42-48.
17. Gorodkov, A.V. Arhitektura, proektirovanie i organizacija kul'turnyh landshaftov [Tekst] / V.A. Gorodkov. - BGITA.- g. Brjansk, 2003. – 268 s.

Golenkov Vyacheslav Aleksandrovich

State University - educational-scientific-production complex, Orel

Doctor of technical Sciences, President

E-mail: president@ostu.ru

Vorob'ev Sergej Aleksandrovich

State University - educational-scientific-production complex, Orel

Candidate of agricultural Sciences, associate Professor of the chair of Urban construction and economy

E-mail: vorser323@rambler.ru

Kozlov Dmitry Zakharovich

State University - educational-scientific-production complex, Orel

senior lecturer of the chair of Urban construction and economy

E-mail: dimoktank@mail.ru

В.И. ВОРОБЬЁВ, В.П. ТИХОМИРОВ, М.А. ИЗМЕРОВ, С.Г. ВОЛОХОВ

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ

Рассмотрены вопросы влияния электрического тока и магнитного поля на коэффициент сцепления колеса локомотива с рельсом. С помощью теории размерностей определены основные факторы, оказывающие значительное воздействие на коэффициент сцепления и получена общая зависимость влияния этих факторов на коэффициент трения в зоне контакта колеса с рельсом, а также приведены данные эксперимента по воздействию электрического тока и магнитного поля на контакт.

Ключевые слова: моделирование, контакт, сцепление колеса с рельсом, теория размерностей.

Для обеспечения возрастающего товарооборота всё острее ставится задачи скоростной транспортировки сырья, товаров и пассажиров, что, несомненно, сказывается на скорости передвижения железнодорожных составов грузового и пассажирского назначения. Увеличение скоростного режима движения предъявляет новые требования к надёжности, безопасности и долговечности машин и механизмов, побуждает к разработке новых материалов с высокими характеристиками и использованию новых механизмов.

Для обеспечения движения железнодорожного состава при возрастающем скоростном режиме, обеспечения безопасности при торможении и транспортировке груза большой массы необходимо достичь максимально большого коэффициента сцепления колёс с рельсом при сохранении прежней долговечности. Самым распространённым и действенным решением повышения сцепления является использование песчаных смесей и их подача в зону контакта при трогании составов. Этот способ имеет множество минусов, и самый главный из них – это повреждение поверхности сопряжённых деталей. При дроблении частиц песка, находящихся в зоне контакта, коэффициент трения увеличивается, но при этом возникают вмятины и царапины на колесе и рельсах, которые со временем превращаются в выщербины, что значительно снижает их долговечность.

Очень интересным и возможно, действенным способом повышения коэффициента сцепления колеса с рельсом является воздействие на контакт электрического тока и магнитного поля, но эти вопросы так до настоящего времени и остаются очень плохо изученными. То, что электрический ток и магнитное поле оказывает влияние на контакт, доказывают многие работы отечественных и зарубежных учёных, среди которых Р. Хольм, А.В. Чичинадзе, Н.К. Мышкин и др. В работе рассматривается разработка модели воздействия электрического тока и магнитного поля на фрикционный контакт колеса с рельсом.

Механизм воздействия электрического тока и магнитного поля на коэффициент сцепления по сих пор пока не ясен. Попыток объяснить это явление было несколько: Ван-Геель основывал свою теорию на автоэлектронной эмиссии, Я.И. Френкель исходил из представлений о туннельном эффекте, О.А. Троицкий, А.Т. Розно указывают на явление скачкообразной деформации металлов, которое получило название электропластический эффект, а японские исследователи С. Хайяши и М. Ямамото отмечают, что переменное магнитное поле облегчает пластическую деформацию и связывают этот эффект с особенностью ферромагнитных материалов. Однако все эти вопросы так и остаются мало изученными.

Для анализа влияния тока и магнитного поля на контакт колеса с рельсом применим метод анализа размерностей [1]. В литературе упоминается более 20 факторов, непосредственно оказывающих влияние на процессы, происходящие в контакте. Рассмотрим $n = 11$ основных независимых факторов, в том числе электрический ток и магнитное поле [2].

1. Нагрузка на контакт Q , Н ($\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$);
2. Скорость движения V , м/с;
3. Площадь контакта Aa , м^2 ;
4. Твердость более мягкого материала HB ($\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$);
5. Шероховатость (среднее квадратическое отклонение Rq , м);
6. Путь трения L , м;
7. Время t , с,
8. Сила тока I , А;
9. Напряженность магнитного поля Φ , А/м;
10. Сила трения F ($\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$);
11. Толщина изношенного слоя h , м.

Геометрические размеры колеса (радиус R) являются зависимыми параметрами, выражаемыми через путь трения, скорость движения и время.

Число основных единиц измерения в нашем случае $r = 4$. Это M, L, T, I ($\text{кг}, \text{м}, \text{с}, \text{А}$). Составим матрицу физических величин и их размерностей (табл. 1).

Таблица 1 – Матрица физических величин и их размерностей

№	Физическая величина	Размерность	Основные единицы измерения			
			$M, \text{кг}$	$L, \text{м}$	$T, \text{с}$	$I, \text{А}$
1	Φ	А/м	0	-1	0	1
2	Q	$\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$	1	1	-2	0
3	V	м/с	0	1	-1	0
4	L	м	0	1	0	0
5	Aa	м^2	0	2	0	0
6	HB	$\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$	1	-1	-2	0
7	Rq	м	0	1	0	0
8	I	А	0	0	0	1
9	F	$\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$	1	1	-2	0
10	h	м	0	1	0	0
11	t	с	0	0	1	0

Матрица составлена таким образом, чтобы детерминант первой квадратной матрицы отличался от 0. Т.к. $r = 4$, то и матрица должна иметь 4 строки. Тогда детерминант квадратной матрицы равен

$$\Delta = \begin{vmatrix} \Phi \\ Q \\ V \\ L \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -1$$

Тогда в соответствии с π -теоремой Букингема число критериев подобия равно:

$$K = n - r = 11 - 4 = 7.$$

Здесь n – число физических величин, r – число основных единиц измерения.

Из таблицы 1 можно записать первых 3 критерия подобия – безразмерные комплексы, они очевидны.

1. Коэффициент трения: $\Pi_1 = F/Q = f$;
2. Интенсивность изнашивания: $\Pi_2 = h/L = k$;
3. Относительная толщина изношенного слоя: $\Pi_3 = h/Rq$;

Таким образом, использованы согласно таблице 1, три строки: 9, 10 и 7. Остальные критерии подобия определяются по формуле, в которой в числителе будет стоять фактор соответствующей строки (8, 5, 6 или 11), а в знаменателе произведение выделенных факторов (детерминант которых не равен 0 – это Φ, Q, V и L), возведённых в некоторую степень. Например, следующий критерий подобия, Π_4 , определим для 8 строки:

$$П_4 = \frac{I}{\Phi a \cdot Q^b \cdot V^c \cdot L^d}$$

Для определения коэффициентов a, b, c и d составим систему уравнений, где столбцы квадратной матрицы умножаются на соответствующие коэффициенты, а результат по строке равен соответствующей размерности фактора:

$$\begin{cases} a \cdot 0 + b \cdot (-1) + c \cdot 0 + d \cdot 1 = 0 \\ a \cdot 1 + b \cdot 1 + c \cdot (-2) + d \cdot 0 = 0 \\ a \cdot 0 + b \cdot 1 + c \cdot (-1) + d \cdot 0 = 0 \\ a \cdot 0 + b \cdot 1 + c \cdot 0 + d \cdot 0 = 1 \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений даёт следующие результаты:

$$a = 1, b = 0, c = 0, d = 1.$$

Тогда окончательно можно записать выражение для четвёртого критерия подобия:

$$П_4 = \frac{I}{\Phi \cdot L^2}$$

Аналогично определим остальные критерии подобия: для критерия $П_5$ используем шестую строку таблицы 1:

$$П_5 = \frac{H B}{\Phi^m \cdot Q^k \cdot V^s \cdot L^l}$$

Система уравнений для отыскания показателей степени критерия $П_5$ будут выглядеть так:

$$\begin{cases} a \cdot 0 + b \cdot (-1) + c \cdot 0 + d \cdot 1 = 1 \\ a \cdot 1 + b \cdot 1 + c \cdot (-2) + d \cdot 0 = (-1) \\ a \cdot 0 + b \cdot 1 + c \cdot (-1) + d \cdot 0 = (-2) \\ a \cdot 0 + b \cdot 1 + c \cdot 0 + d \cdot 0 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix}$$

Отсюда

$$П_5 = \frac{H B}{Q \cdot L^{-2}}$$

Для критерия $П_6$ используем данные пятой строки таблицы 1:

$$П_6 = \frac{A \alpha}{\Phi^m \cdot Q^k \cdot V^s \cdot L^l}$$

Система уравнений для отыскания показателей степени критерия $П_6$ будут выглядеть так:

$$\begin{cases} a \cdot 0 + b \cdot (-1) + c \cdot 0 + d \cdot 1 = 0 \\ a \cdot 1 + b \cdot 1 + c \cdot (-2) + d \cdot 0 = 2 \\ a \cdot 0 + b \cdot 1 + c \cdot (-1) + d \cdot 0 = 0 \\ a \cdot 0 + b \cdot 1 + c \cdot 0 + d \cdot 0 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Отсюда

$$П_6 = \frac{A \alpha}{L^2}$$

Последний критерий подобия $П_7$ определяет кинематику процесса трения двух сопряжённых поверхностей (11 строка табл. 1):

$$П_7 = \frac{t}{\Phi^m \cdot Q^k \cdot V^s \cdot L^l}$$

Система уравнений для отыскания показателей степени критерия $П_7$ будут выглядеть так:

$$\begin{cases} a \cdot 0 + b \cdot (-1) + c \cdot 0 + d \cdot 1 = 0 \\ a \cdot 1 + b \cdot 1 + c \cdot (-2) + d \cdot 0 = 0 \\ a \cdot 0 + b \cdot 1 + c \cdot (-1) + d \cdot 0 = 1 \\ a \cdot 0 + b \cdot 1 + c \cdot 0 + d \cdot 0 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Тогда

$$П_7 = \frac{t}{V^{-1} \cdot L^2}$$

Критериальные уравнения записываются в виде

$$F(\Pi_1; \Pi_2; \Pi_3; \Pi_4; \Pi_5; \Pi_6; \Pi_7) = 0.$$

Учитывая, что Π_1 является коэффициентом трения, то для оценки влияния выбранных факторов на коэффициент трения составим критериальное уравнение в виде

$$\begin{aligned} \Pi_1 = f &= C \cdot \Pi_2^a \cdot \Pi_3^b \cdot \Pi_4^c \cdot \Pi_5^d \cdot \Pi_6^e \cdot \Pi_7^g = \\ &= C \cdot \left(\frac{h}{L}\right)^a \cdot \left(\frac{h}{Rq}\right)^b \cdot \left(\frac{I}{\Phi \cdot L}\right)^c \cdot \left(\frac{Q}{HB \cdot L^2}\right)^d \cdot \left(\frac{Ag}{L^2}\right)^e \cdot \left(\frac{r \cdot V}{L^2}\right)^g \end{aligned}$$

Здесь C – коэффициент пропорциональности, a, b, c, d, e и g – показатели степени, а критерий Π_5 был перевернут в соответствии с физическим смыслом рассматриваемых процессов. Полученное выражение можно немного преобразовать:

$$f = \frac{h^{a+b} \cdot I^c \cdot Q^d \cdot Ag^e \cdot r^g \cdot V^g}{L^{2(a+b+c+d+e+g)} \cdot Rq^b \cdot \Phi^c \cdot HB^d}$$

Из полученной формулы можно получить общее представление о влиянии выбранных параметров на коэффициент трения, но для определения показателей степени необходимо провести как минимум 6 достоверных экспериментов.

Так как целью настоящей статьи было определение влияния электрического тока и магнитного поля на фрикционный контакт колеса с рельсом, то была проведена серия экспериментов [3] на стенде для оценки коэффициента трения для образцов по схеме диск – плоскость (рис. 1).

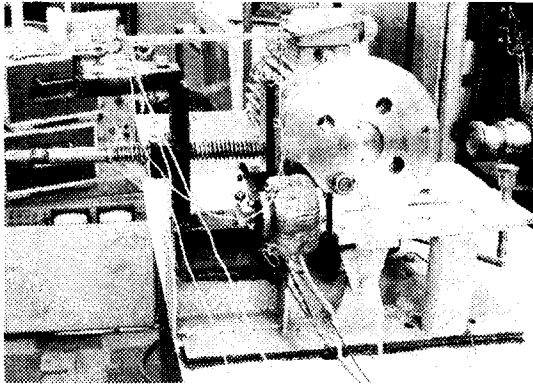


Рисунок 1 – Стенд для оценки коэффициента трения

При проведении эксперимента через образцы, имитирующие фрикционный контакт колеса с рельсом, пропускался электрический ток или оказывалось воздействие магнитным полем с определением коэффициента трения. Для получения достоверных данных опыты повторялись 3 раза для каждого значения изменяемого параметра (электрического тока и магнитного поля) с определением среднего значения. Давление (по Г. Герцу) было принято во всех опытах постоянным и равным 217 МПа, сила тока изменялась от

100 до 200 А, сила тока в магнитной катушке, имеющей 560 витков, равнялась 10, 15, 20 А.

Данные эксперимента представлены в виде графиков на рисунке 2.

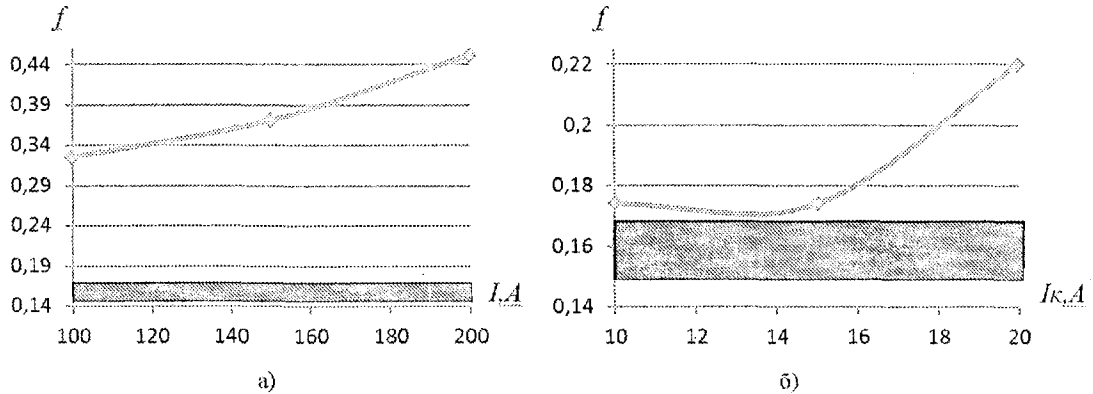


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от:

- а) силы тока, пропускаемого через контакт образцов;
 - б) силы тока в катушке, создающей магнитное поле;
- (заштрихованная область – это коэфф. трения без воздействия электрического тока и магнитного поля – $f = 0,15 \dots 0,17$)

Таким образом, воздействие на контакт электрического тока приводит к увеличению коэффициента трения более чем в 2 раза. Воздействие магнитного поля также повышает коэффициент сцепления. В дальнейшем планируется провести более масштабные эксперименты с учётом большего количества факторов с целью установления более точной зависимости коэффициента сцепления от воздействия электрического тока и магнитного поля на фрикционный контакт, а также конкретизировать область эффективного влияния электрического тока и магнитного поля на триботехнические показатели и определить оптимальные величины указанных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирпичёв, М.В. Анализ размерностей / М.В. Кирпичёв – Известия АН СССР. Отд. техн. наук. – 1953. - №9.
2. Тихомиров, В.П. Применение теории подобия к исследованию характеристик пар трения / В.П. Тихомиров, В.И. Воробьёв, С.Г. Волохов, А.Н. Чвала. – Материалы международной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики» - Тула, 2013. – С. 472 – 476.
3. Тихомиров, В.П. Моделирование сцепления колеса с рельсом / В.П. Тихомиров, В.И. Воробьёв, Д.В. Воробьёв, Г.В. Багров, М.И. Борзенков, И.А. Бутрин – монография - Орёл: ОрёлГТУ, 2007. – 126 с.

Воробьёв Владимир Иванович

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет»
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы»
vladimvorobiev@yandex.ru

Тихомиров Виктор Петрович

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет»
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Детали машин»
dm-bgtu@yandex.ru

Измеров Михаил Александрович

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет»
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Детали машин»
Maik51@yandex.ru

Волохов Станислав Григорьевич

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет»
Инженер кафедры «Детали машин»

V.I. VOROBEV, V.P. TIHOMIROV, M.A. IZMEROV, S.G. VOLOKHOV

EFFECT OF ELECTRIC CURRENT AND MAGNETIC FIELD ON THE COEFFICIENT OF ADHESION WHEEL AND RAIL

Questions of influence of an electric current and magnetic field on coefficient of traction of a wheel of the locomotive with a rail are considered. The major factors making considerable impact on coefficient of traction are defined by the theory of dimensions and the general dependence of influence of these factors on friction coefficient in a zone of contact of a wheel with a rail is received, and also data of experiment on influence of an electric current and a magnetic field on contact are provided.

Keywords: *contact, traction of a wheel with a rail, theory of dimensions.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kirpichjov, M.V. Analiz razmernostej / M.V. Kirpichjov – Izvestija AN SSSR. Otd. tehn. nauk. – 1953. - №9.
2. Tihomirov, V.P. Primenenie teorij podobija k issledovaniju harakteristik par trenija / V.P. Tihomirov, V.I. Vorob'jov, S.G. Volohov, A.N. Chvala. – Materialy mezhdunarodnoj konferencii «Sovremennye problemy matematiki, mehaniki, informatiki» - Tula, 2013. – S. 472 – 476.

3. Tihomirov, V.P. Modelirovanie sčepenija koleśa s rel'som / V.P. Tihomirov, V.I. Vorob'jov, D.V. Vorob'jov, G.V. Bagrov, M.I. Borzenkov, I.A. Butrin – monografija - Orjol: OrjolGTU, 2007. – 126 s.

Vorobiev Vladimir Ivanovich

FGBOU VPO "Bryansk State Technical University"

PhD. Univ. "Locomotives"

vladimvorobiev@yandex.ru

Tikhomirov Viktor Petrovich

FGBOU VPO "Bryansk State Technical University"

Prof., Head. Univ. "Machine Parts"

dm-bgtu@yandex.ru

Izmerov Mikhail Alexandrovich

FGBOU VPO "Bryansk State Technical University"

PhD. Univ. "Machine Parts"

Maik51@yandex.ru

Volohov Stanislav Grigorevich

FGBOU VPO "Bryansk State Technical University"

Engineering Department. "Machine Parts"

ТИН ЧЖО, В.М. ТРОЯНОВСКИЙ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗНОСА ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

Рассмотрена задача обнаружения износа зубчатых колёс от работающего оборудования с помощью неразрушающего контроля на основе акустических методов. Проанализированы свойства акустических сигналов, записанные от реальных лабораторных стендов. Рассмотрены методы выделения сигналов на фоне помех и проведено компьютерное моделирование с помощью Excel + VBA.

Ключевые слова: Обнаружение; дефекты; акустические сигналы; компьютерное моделирование.

Задачи технической диагностики [1] охватывают широкую сферу деятельности в работе военных и гражданских организаций. В данной работе рассматривается задача обнаружения износа зубчатых колёс одним из методов неразрушающего контроля в результате их длительной работы.

Среди известных методов технической диагностики наиболее привлекательны методы неразрушающего контроля на основе акустических методов. Задача получения диагностической информации для обнаружения износа зубчатых колёс была приведена нами к задаче выделения импульсного сигнала на фоне мешающих сигналов и помех [2]. Здесь применение информационных технологий позволяет получить новые результаты за счет применения специальных методов и алгоритмов автоматизированной обработки текущих данных от работающего оборудования.

Запись акустических сигналов от реальных лабораторных стендов на кафедре механики МИЭТ и предварительный анализ этих сигналов (рис.1- рис.3) показали, что они хорошо описываются как смесь гармонических и шумообразных сигналов.

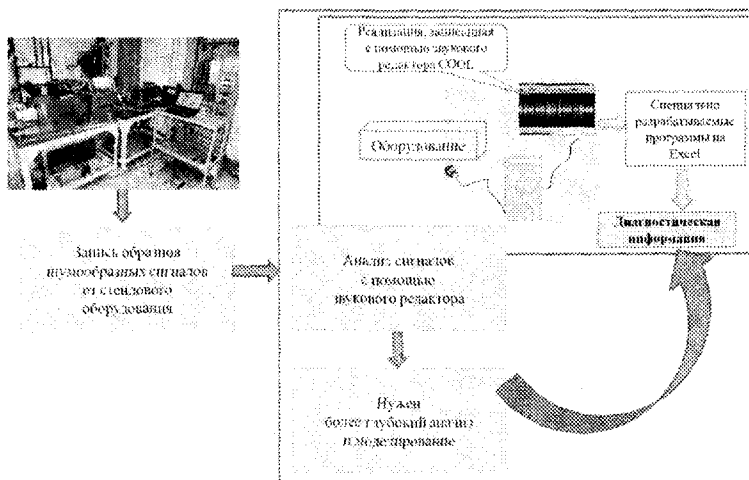


Рисунок 1 – Анализ звуковых шумообразных сигналов

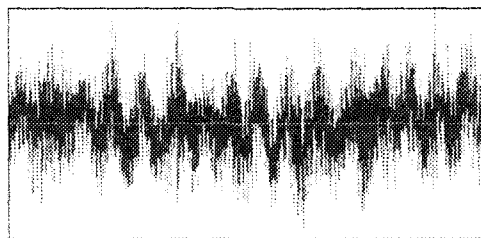


Рисунок 2 – Исходный звуковой сигнал от вращающихся шестерен

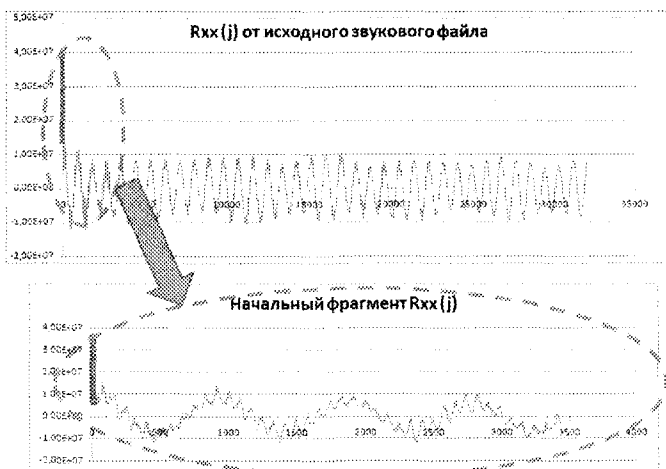


Рисунок 3 – Корреляционная функция звукового сигнала

Методы выделения сигналов на фоне помех хорошо разработаны (см. например [3, 4]). В частности, в [4] показано, что наилучший результат удаётся получить при использовании согласованного фильтра. Однако, для того чтобы им воспользоваться, надо знать положение полезного сигнала внутри комплексного сигнала, содержащего помехи. Для периодических сигналов задача может быть разрешена, если проводить отдельно исследование синусной и косинусной составляющей сигнала фактически с целью определения фазы, а для импульсного сигнала остаётся только сдвигать сигнал в пределах периода, что в любом случае увеличивает объём необходимых вычислений.

Известно [5], что при сложении независимых процессов ковариационная функция их суммы равна сумме ковариационных функций исходных процессов. Поэтому было принято решение перенести поиск полезных компонент из пространства исходных сигналов в пространство их ковариационных функций, опираясь на методы прикладной теории случайных процессов [6].

В случае смеси периодического сигнала и помехи в виде «белого шума» на основе анализа ковариационной функции суммарного сигнала можно сделать следующие выводы.

1. Даже визуально в ковариационной функции суммарного сигнала (см. рис. 3) отчетливо выделяется пик при нулевом значении аргумента (обусловленный δ -функцией ковариационной функции помехи) и следующие за ним вдоль оси временных сдвигов периодические компоненты ковариационной функции полезного сигнала. Казалось бы, при анализе этих компонентов можно сразу «отсечь» влияние помехи, взяв в рассмотрение участок ковариационной функции не от нуля, а некоторого Δt . На самом деле это не так (см. ниже п.4).

2. При работе с ковариационной функции исчезает понятие фазы исходного сигнала. Более того у ковариационной функции периодических сигналов «фаза» всех компонентов отказывается равно нулю. Такая точная привязка к оси временных сдвигов позволяет резко сократить объём настроечных (или поисковых) операций по синхронизации поискового сигнала и исходной реализации.

3. В случае необходимости можно идентифицировать в ковариационной функции суммарного сигнала гармоническую составляющую с известной частотой. Для этого, с учетом п.2, ковариационная функция $K_{xx}(\tau)$ рассматривается как смесь косинусоиды с другими сигналами, и ковариационная процедура позволяет вычислить амплитуду компонента с частотой ω_1 как

$$a_1 = \frac{2m}{N} \int_0^{\frac{N\pi}{\omega_1}} K_{xx}(\tau) \cos(\omega_1 \tau) d\tau.$$

где N – число периодов.

В идеальном случае данный компонент может быть удален (вычтен) из $K_{\text{ш}}(x)$ для повышения эффективности работы с другими компонентами.

4. В реальных условиях существуют погрешности выделения отдельных компонент, связанные с несколькими причинами:

а) остаточные статистические флуктуации компонент помехи вдоль всей оси абсцисс ковариационной функции. Как показано в [7], в случае использования единственной реализации ограниченной длины для вычисления ковариационной функции, их интенсивность составляет σ_x^2/\sqrt{N} , где σ_x^2 - дисперсия помехи, N - число использованных отсчетов;

б) использование интервала интегрирования, не кратного рассматриваемому периоду опорных сигналов;

с) остаточная интерференция опорного сигнала с компонентами, имеющими иную частоту.

Для случая гармонических сигналов погрешности п.п. б) и с) проанализированы в [8].

5. Рассматривая искомый сигнал от поврежденного зубца шестерни как периодический импульсный сигнал, можно ожидать, что в корреляционной функции суммарного сигнала появятся соответствующие периодические импульсы с точной привязкой к оси времени. Остается отделить эти импульсы от смеси δ -функции помехи и регулярных косинусных компонент, соответствующих акустическим сигналам самих шестерен.

С целью проверки высказанного предположения было проведено компьютерное моделирование, схема которого представлена на рисунке 4. В процессе моделирования создавались два гармонических сигнала и помеха, а также импульсный сигнал, моделирующий дефект одного зуба. Параметры всех сигналов можно регулировать.

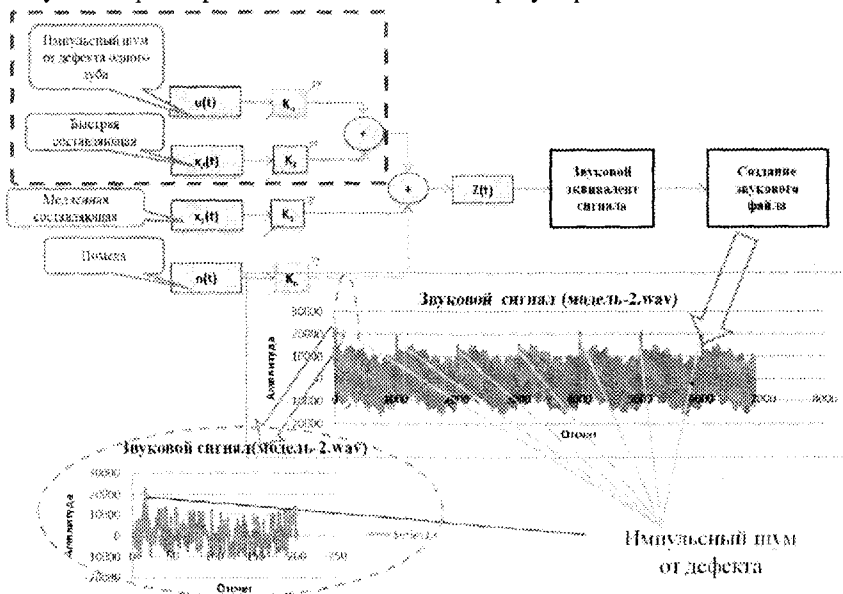


Рисунок 4 – Схема моделирования сигналов при дефекте одного зуба шестерни

Обработка корреляционной функции для полученных сигналов показала следующее:

- корреляционная процедура позволяет существенно подавлять влияние помехи;
- с помощью дополнительной обработки в самой корреляционной функции удастся идентифицировать и устранить гармоническую составляющую с известной частотой (см. выше п. 3);

- по мере роста моделируемой величины дефекта (с помощью коэффициента k_n , рис. 4) возрастает коэффициент корреляции между остаточным сигналом и корреляционной функцией импульсного сигнала помехи.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о работоспособности предложенного подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Информационные технологии позволяют повысить эффективность диагностики технических устройств с помощью методов неразрушающего контроля.
2. Рассмотрена задача обнаружения износа зубчатых колес и предложен алгоритм её решения на основе анализа акустических сигналов от работающего оборудования с привлечением теории случайных процессов.
3. Проведено компьютерное моделирование, подтвердившее перспективность предложенного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978, 240 с.
2. Тин Чжо Применение информационных технологий в задаче обнаружения износа зубчатых колёс // Актуальные вопросы науки: Материалы IX Международной научно-практической конференции. - М.: Издательство «Спутник +», 2013. - С. 86-88.
3. Вайнштейн, Л.А. Выделение сигналов на фоне случайных помех / Л.А. Вайнштейн, В.Д. Зубаков. -- М.: Сов. радио, 1960.
4. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский, В.П. Демин. – М.: Сов. радио, 1994. - 672 с.
5. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / учебник для вузов, изд. 7 / Е.С. Вентцель. - М.: Высшая школа, 2002 – 380 с.
6. Трояновский, В.М. Информационно-управляющие системы и прикладная теория случайных процессов: учебное пособие / В.М. Трояновский. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 304 с.
7. Aung Phyo Winn, Serdyuk O.A., Troyanovskiy V.M. Transformation of the structure and parameters of a shaping filter into confidence intervals for correlation function estimate // Preprints of the 2013 IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, June 19-21, 2013 / РФФИ, Project 13-08-06040. - P.P. 1860-1865.
8. Aung Phyo Winn, Dr. V.M. Troyanovskiy. A New Algorithmic Approach for Detecting Hidden Periodicity of Noisy Signals in Technically Complicated Systems // Ninth International Conference on Computer Application (ICCA 2011), Yangon, 2011, P. 103-108.

Трояновский Владимир Михайлович

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Зеленоград
Доктор технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем (ИИОБС)
124498, МИЭТ, Москва, г. Зеленоград, Россия
Тел. 79160432314
Email: troy40@mail.ru

Тин Чжо

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Зеленоград
Аспирант кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем (ИИОБС)
124498, МИЭТ, Москва, г. Зеленоград, Россия
Тел. 89637240941
E-mail: mgnyeinae@gmail.com

TING ZHOU, V.M. TROYANOVSKIИ

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR THE DETECTION OF WEAR ON THE GEAR WHEELS

The problem of detecting gear wheels wearing from the operating equipment with using non-destructive testing based on acoustic methods is considered. Acoustic signals properties recorded from the real laboratory stands are analyzed. Methods of abstraction signals against the background interference are considered and computer simulation using Excel + VBA is performed.

Keywords: Detection, defects, acoustic signals, computer simulation.

BIBLIOGRAPHY

1. Birger, I.A. Tehnicheskaja diagnostika / I.A. Birger. – M.: Mashinostroenie, 1978, 240 s.
2. Tin Chzho Primenenie informacionnyh tehnologij v zadache obnaruzhenija iznosa zubchatyh koljos // Aktual'nye voprosy nauki: Materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. - M.: Izda-tel'stvo «Sputnik +», 2013. - S. 86-88.
3. Vajnshtejn, L.A. Vydelenie signalov na fone sluchajnyh pomeh / L.A. Vajnshtejn, V.D. Zubakov. – M.: Sov. radio, 1960.
4. Gonorovskij, I.S. Radiotehnicheskie cepi i signaly / I.S. Gonorovskij, V.P. Demin. – M.: Sov. ra-dio. 1994. - 672 s.
5. Ventcel', E.S. Teorija verojatnostej / uchebnik dlja vuzov, izd. 7 / E.S. Ventcel'. - M.: Vysshaja shkola, 2002 – 380 s.
6. Trojanovskij, V.M. Informacionno-upravljajushhie sistemy i prikladnaja teorija sluchajnyh processov: uchebnoe posobie / V.M. Trojanovskij. – M.: Gelios ARV, 2004. – 304 s.
7. Aung Phyo Winn, Serdyuk O.A., Trojanovskij V.M. Transformation of the structure and parameters of a shaping filter into confidence intervals for correlation function estimate // Preprints of the 2013 IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, June 19-21, 2013 / RFFI, Project 13-08-06040. - P.P. 1860-1865.
8. Aung Phyo Winn, Dr. V.M. Trojanovskij. A New Algorithmic Approach for Detecting Hidden Periodicity of Noisy Signals in Technically Complicated Systems // Ninth International Conference on Computer Application (IC-CA 2011). Yangon, 2011, P. 103-108.

Trojanovsky Vladimir Mikhailovich

National research University «Moscow», Zelenograd

Doctor of technical Sciences, Professor of Department of computer science and software of computing systems (IPOS)
124498, Moscow, Moscow, Zelenograd, Russia

Tel. 79160432314

Email: troy40@mail.ru

Ting Zhou

National research University «Moscow», Zelenograd

Postgraduate student of Department of computer science and software of computing systems (IPOS)
124498, Moscow, Moscow, Zelenograd, Russia

Tel. 89637240941

E-mail: mgnyeinae@gmail.com