



Научный журнал  
Орловского государственного  
технического университета

Выходит четыре раза в год

№ 4/272(550) 2008

# ИЗВЕСТИЯ ОрелГТУ

Серия «Фундаментальные и прикладные  
проблемы техники и технологии»

<b>Редакционный совет:</b> Голенков В.А., <i>председатель</i> Радченко С.Ю., <i>зам. председателя</i> Борзенков М.И. Колчунов В.И. Попова Л.В. Степанов Ю.С.
<b>Главный редактор серии:</b> Степанов Ю.С.
<b>Заместители главного редактора серии:</b> Гордон В.А. Киричек А.В. Константинов И.С. Подмастерьев К.В.
<b>Редколлегия:</b> Бабичев А.П. Вдовин С.И. Дмитриев А.М. Емельянов С.Г. Еременко В.Т. Зубарев Ю.М. Зубчанинов В.Г. Иванов Б.Р. Иванников А.Д. Колесников К.С. Корндорф С.Ф. Коськин А.В. Малинин В.Г. Осадчий В.Я. Панин В.Е. Поляков А.А. Распопов В.Я. Смоленцев В.П. Сотников В.В.
<b>Ответственный за выпуск:</b> Разина Е.В.
<b>Адрес редколлегии серии:</b> 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29 (4862) 43-48-90, 41-98-48 www.ostu.ru E-mail: nmu@ostu.ru
Зарег. в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации. Свидетельство: ПИ № 77-15496 от 20 мая 2003 года
Подписной индекс <b>29504</b> по объединенному каталогу «Пресса России»
© ОрелГТУ, 2008

## Содержание

### Естественные науки

<b>Гордон В.А., Семенова Г.А.</b> Влияние радиальных осесимметричных колебаний ствола на начальные внешнебаллистические характеристики.....	3
<b>Ешуткин Д.Н., Полянский А.В., Горин А.В.</b> О соответствии характеристик насосных станций и гидравлических молотков.....	8
<b>Морев П.Г.</b> Зависимость от времени границы поверхности контакта деформируемого тела с абсолютно жестким телом.....	12
<b>Никольская Т.А., Никольский Д.Н.</b> Математическое моделирование плоской задачи о конусообразовании методом дискретных вихревых пар.....	17
<b>Петракова О.А., Колинько Е.А., Фоминова О.В.</b> Управляемая виброзащитная система с динамическим гасителем.....	23
<b>Потураева Т.В.</b> Переходный динамический процесс в стержневой конструкции при внезапном изменении условий опирания.....	27

### Машиностроение и металлообработка

<b>Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Силантьев С.А.</b> Контактная выносливость после деформационного упрочнения статико-импульсной обработкой.....	32
<b>Смоленцев В.П., Гребенщиков А.В., Уваров М.А.</b> Импульсно-вибрационная очистка деталей от загрязнений.....	38
<b>Хромов В.Н., Кузнецов И.С., Петрашов А.С.</b> Упрочнение электроискровой обработкой противорезающих пластин пальцев режущего аппарата жатки зерноуборочного комбайна.....	45
<b>Катунин А.В.</b> Уменьшение вибраций при прерывистом точении.....	49

### Приборостроение и системы управления

<b>Подмастерьев К.В., Мишин В.В., Семенов В.В., Моисеев П.П., Щепилина О.В.</b> Общие подходы к комплексированию при диагностировании опор качения и частное решение для электрических и вибрационных параметров.....	53
<b>Марков В.В.</b> Теоретические исследования источников первичной информации о состоянии фрикционного контакта.....	60
<b>Пахолкин Е.В., Анцифорова Е.В.</b> Мониторинг восстановительных свойств смазочных материалов с ремонтно-восстановительными составами.....	69
<b>Багров Г.В.</b> Приборы для исследования коэффициента трения при воздействии внешних полей.....	75
<b>Кондратович В.В.</b> Оценка трибологических свойств фрикционной муфты.....	80
<b>Яковенко М.В., Егоров Б.А.</b> Теоретические аспекты проблемы аппаратного контроля ударного объема в условиях косвенного токового нагружения неизолированного сердца.....	83
<b>Хроника</b> 15-й Международный конгресс по звуку и вибрации.....	87

<i>Editorial council:</i> <b>Golenkov V.A., president</b> <b>Radchenko S.Y., vice-president</b> <b>Borzenkov M.I.</b> <b>Kolchunov V.I.</b> <b>Popova L.V.</b> <b>Stepanov Y.S.</b>
<i>Editor-in-chief</i> <b>Stepanov Y.S.</b>
<i>Editor-in-chief Assistants:</i> <b>Gordon V.A.</b> <b>Kirichek A.V.</b> <b>Konstantinov I.S.</b> <b>Podmasteryev K.V.</b>
<i>Editorial Committee</i> <b>Babichev A.P.</b> <b>Vdovin S.I.</b> <b>Dmitriev A.M.</b> <b>Emelyanov S.G.</b> <b>Eremenko V.T.</b> <b>Zubarev Y.M.</b> <b>Subchaninov V.G.</b> <b>Ivanov B.R.</b> <b>Ivannikov A.D.</b> <b>Kolesnikov K.S.</b> <b>Korndorf S.F.</b> <b>Koskin A.V.</b> <b>Malinin V.G.</b> <b>Osadchy V.Ya.</b> <b>Panin V.E.</b> <b>Polyakov A.A.</b> <b>Raspopov V.Ya.</b> <b>Smolenzev V.P.</b> <b>Sotnikov V.V.</b>
<i>Responsible for edition:</i> <b>Razina E.V.</b>
<i>Address</i> 302020 Orel, Naugorskoye Chaussee, 29 (4862) 43-48-90, 41-98-48 <a href="http://www.ostu.ru">www.ostu.ru</a> E-mail: nmu@ostu.ru
Journal is registered in State Committee of Russian Federation on printing. The certificate of registration ПИ № 77-15496 from 20.05.03
Index on the catalogue of the « <b>Pressa          Rossi</b> » <b>29504</b>
© OSTU, 2008

## Contents

### Natural Sciences

<b>Gordon V.A., Semenova G.A.</b> Influence of the radial axisymmetrical vibration of barrel on the initial extraballistic characteristics.....	3
<b>Eshutkin D.N., Polyansky A.V., Gorin A.V.</b> About conformity of characteristics of pump stations and hydraulic hammers .....	8
<b>Morev P.G.</b> A Ttime dependence of contact surface boundary when a deformable body contacts with a rigid one.....	12
<b>Nikolskya T.A., Nikolsky D.N.</b> Mathematical modeling of a flat problem about formation of a cone by a method discrete vertical pairs.....	17
<b>Petrakova O.A., Kolinko E.A., Fominova O.V.</b> The controlling vibro-protection system with dynamical damper.....	23
<b>Poturaeva T.V.</b> Transient dynamic process in the rod with a sudden change in support conditions.....	27

### Engineering

<b>Kirichek A.V., Soloviev D.L., Barinov S.V., Silantiev S.A.</b> Contact endurance after deformation hardening by static impulse processing.....	32
<b>Smolentsev V.P., Grebenshchikov A.V., Uvarov M.A.</b> Impulsive- vibration removal of the pollution from components.....	38
<b>Chromov V.N., Kuznetsov I.S., Petrashov A.S.</b> Hardening by electrospark processing of cutting plates of fingers of the cutting device of the harvester of the combine harvester.....	45
<b>Katunin A.V.</b> Decrease of vibrations during the intermittent grinding.....	49

### Instrument Engineering

<b>Podmasteriev K.V., Mishin V.V., Semenov V.V., Moiseev P.P., Shchepilina O.V.</b> The general approaches to the complex diagnosing of rolling support and the private decision for electric and vibrating parameters.....	53
<b>Markov V.V.</b> The theoretical researches the sources of primary information on the condition the friction contact.....	60
<b>Pakholkin E.V., Antsiforova E.V.</b> Monitoring of regenerative properties of lubricants with repair-regenerative structures.....	69
<b>Bagrov G.V.</b> Devices for research of factor of friction at influence of external fields.....	75
<b>Kondratovich V.V.</b> Appraisal the thibological properties of friction muff.....	80
<b>Yakovenko M.V., Egorov B.A.</b> Theoretical aspects of problem device's control of systolic volume on indirect influence of current of non-isolated heart.....	83
<b>Chronicle</b> The 15-th International Congress on Sound and Vibration.....	87

УДК 539.3

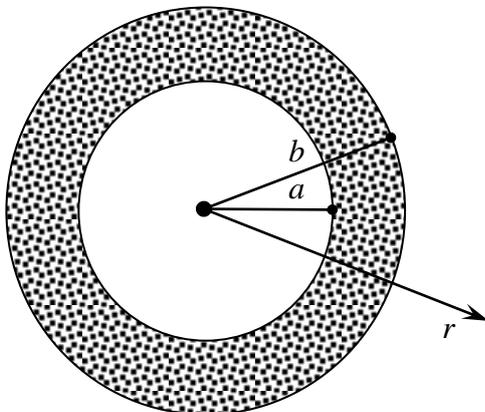
В.А. ГОРДОН, Г.А. СЕМЕНОВА

## ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ СТВОЛА НА НАЧАЛЬНЫЕ ВНЕШНЕБАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Исследуется влияние радиальных осесимметричных колебаний ствола на скорость прохождения снаряда по стволу. При этом ствол рассматривается как длинный толстостенный цилиндр, находящийся под воздействием переменного внутреннего давления и температурного поля. Получены данные, позволяющие говорить о зависимости скорости вылета снаряда от того, в какой фазе колебаний происходит выстрел, и от величины, характеризующей перепад модуля упругости внутреннего и наружного слоев ствола.*

*An influence radial axisymmetrical fluctuation of barrel for speed of passage of a shell on barrel is investigated. Thus the barrel is considered as the long thick-walled cylinder which is taking place under influence of variable internal pressure and a temperature field. The data are received, allowing to speak about dependence of speed of start of shell what phase of fluctuations there is a shot, and from the size describing difference of the module of elasticity of internal and external layers of barrel.*

При исследовании влияния осесимметричных колебаний ствола на начальные внутрибаллистические характеристики оружия этот ствол удобно рассматривать как длинный толстостенный цилиндр (рисунок 1), находящийся под воздействием переменных внутреннего давления  $P(t)$  и температурного поля  $T(r, t)$ . Ниже предполагается, что неравномерное распределение температуры по толщине стенки ствола влияет на величину модуля упругости, то есть модуль упругости  $E$  является сложной функцией координаты  $r$



**Рисунок 1** – Расчетная схема сечения ствола

Ниже предполагается, что неравномерное распределение температуры по толщине стенки ствола влияет на величину модуля упругости, то есть модуль упругости  $E$  является сложной функцией координаты  $r$

$$E = E [T(r, t)].$$

Так как картина деформаций в осевом направлении постоянна (плоская деформация), то уравнение движения имеет вид [1]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_r, \sigma_\theta$  – радиальное и тангенциальное напряжения.

Безразмерные радиальное  $\bar{\sigma}_r$  и тангенциальное  $\bar{\sigma}_\theta$  напряжения связаны с радиальными безразмерными перемещениями соотношениями

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{E_*} = \frac{\bar{E}}{1 - \nu^2} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + \nu \frac{\bar{u}}{a + \xi} \right), \quad \bar{\sigma}_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_*} = \frac{\bar{E}}{1 - \nu^2} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + \frac{\bar{u}}{a + \xi} \right), \quad (2)$$

где  $\bar{u} = \frac{u}{h}$  – радиальное безразмерное перемещение;

$h$  – толщина цилиндра;

$E_*, \rho_*$  – некоторые характерные значения модуля упругости и плотности;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\bar{E} = \frac{E}{E^*}$  – переменный модуль упругости;

$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho^*}$  – переменная плотность материала;

$$\xi = \frac{r-a}{b-a}, \quad \tau = \frac{t\sqrt{E^*}}{h\sqrt{(1-\nu^2)\rho^*}}, \quad \bar{a} = \frac{a}{h}.$$

Исключением напряжений из уравнения (1) с помощью соотношений (2) получено уравнение движения в перемещениях в безразмерном виде

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \xi^2} + q_1(\xi) \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + q_2(\xi) \bar{u} - q_3(\xi) \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \tau^2} = 0, \quad (3)$$

где

$$q_1(\xi) = \frac{\bar{E}'(\xi)}{\bar{E}(\xi)} + \frac{1}{\bar{a} + \xi}, \quad q_2(\xi) = \left( \nu \cdot \frac{\bar{E}'(\xi)}{\bar{E}(\xi)} - \frac{1}{\bar{a} + \xi} \right) \frac{1}{\bar{a} + \xi}, \quad q_3(\xi) = \frac{\bar{\rho}(\xi)}{\bar{E}(\xi)},$$

штрих означает дифференцирование по  $\xi$ .

Граничные условия – силовые

$$\bar{\sigma}_r(0, \tau) = -\bar{d}(\tau), \quad \bar{\sigma}_\theta(1, \tau) = 0, \quad (4)$$

где  $\bar{d}(\tau)$  – переменное внутреннее давление.

Для решения поставленной задачи функция  $\bar{u} = \bar{u}(\xi, \tau)$  представлена в виде суммы двух функций

$$\bar{u}(\xi, \tau) = u_A(\xi, \tau) + u_T(\xi, \tau), \quad (5)$$

одна из которых, например,  $u_T = u_T(\xi, \tau)$ , выбирается так, чтобы вторая функция  $u_A = u_A(\xi, \tau)$  удовлетворяла однородным граничным условиям

$$u_T(\xi, \tau) = -\frac{\bar{a}(1-\nu)}{\nu \bar{E}(0)} (\nu(1-\xi) + \bar{a} + 1) \bar{d}(\tau).$$

Полагая собственное движение гармоническим, переменные в уравнении и граничных условиях для функции  $u_A = u_A(\xi, \tau)$  разделены с помощью представления

$$u_A(\xi, \tau) = \bar{y}(\xi) \sin(p\tau), \quad (6)$$

где  $p$  и  $\bar{y} = \bar{y}(\xi)$  – соответственно частота и форма собственных колебаний.

Получено уравнение для форм осесимметричных колебаний

$$\bar{y}'' + q_1(\xi) \bar{y}' + (q_2(\xi) + p^2 q_3(\xi)) \bar{y} = 0 \quad (7)$$

и граничные условия

$$\bar{y}'(0) + \frac{\nu}{\bar{a}} \bar{y}(0) = 0, \quad \bar{y}'(1) + \frac{\nu}{\bar{a} + 1} \bar{y}(1) = 0. \quad (8)$$

Для получения общего решения уравнения (7) воспользовались асимптотическим методом [2], предложенным авторами для решения дифференциальных уравнений различных порядков с переменными коэффициентами.

В результате применения этого метода к уравнению (7) с учетом граничных условий (8) построены формы собственных колебаний  $\bar{y}_n = \bar{y}_n(\xi)$

$$\bar{y}_n = \left( \frac{L(0)}{L(\xi)} \right)^{1/4} e^{-\frac{1}{2} \int_0^\xi q_1(z) dz} \cdot \left( \cos \left( p_n \int_0^1 L^{1/2}(z) dz \right) + \frac{\frac{L'(0)}{4L(0)} + \frac{q_1(0)}{2} - \frac{v}{\bar{a}}}{L^{1/2}(0)p_n} \sin \left( p_n \int_0^1 L^{1/2}(z) dz \right) \right),$$

$$n = 1, 2, \dots, \infty,$$

где  $L(\xi) = q_3(\xi) + \frac{1}{p^2} \left( q_2(\xi) - \frac{1}{4} q_1^2(\xi) - \frac{1}{2} q_1'(\xi) \right)$  и формулы для вычисления собственных частот  $p_n$

$$p_n = \frac{\pi n}{\int_0^1 L^{1/2}(z) dz} - \frac{1}{\pi n} \cdot \left( \frac{1}{4} \left( \frac{L'(1)}{L^{3/2}(1)} - \frac{L'(0)}{L^{3/2}(0)} \right) + \frac{1}{L^{1/2}(1)} \left( \frac{q_1(1)}{2} - \frac{v}{\bar{a} + 1} \right) - \frac{1}{L^{1/2}(0)} \left( \frac{q_1(0)}{2} - \frac{v}{\bar{a}} \right) \right).$$

Так как каждый корень  $p_n$  дает решение для формы собственных колебаний  $\bar{y}_n = \bar{y}_n(\xi)$ , то полное решение однородной задачи может быть представлено в виде бесконечной суммы

$$u_A(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( C_{1n} \cos p_n \tau + C_{2n} \sin p_n \tau + \frac{1}{p_n} \int_0^\tau R_n(\eta) \sin p_n(\tau - \eta) d\eta \right) \bar{y}_n(\xi), \quad (9)$$

где  $C_{1n}, C_{2n}$  – произвольные постоянные, определяемые из начальных условий.

Таким образом, учитывая представление (5),

$$\bar{u}(\xi, \tau) = u_T(\xi, \tau) + \sum_{n=1}^{\infty} \left( C_{1n} \cos p_n \tau + C_{2n} \sin p_n \tau + \frac{1}{p_n} \int_0^\tau R_n(\eta) \sin p_n(\tau - \eta) d\eta \right) \bar{y}_n(\xi). \quad (10)$$

Постоянные интегрирования в уравнениях (9) и (10) определяются из начальных условий  $\bar{u}(\xi, 0) = \phi(\xi), \frac{\partial \bar{u}(\xi, 0)}{\partial \tau} = \psi(\xi)$  с помощью формул

$$C_{1k} = \frac{\int_0^1 q_3(\xi) \phi(\xi) \bar{y}_k(\xi) d\xi}{\int_0^1 q_3(\xi) \bar{y}_k^2(\xi) d\xi} - \frac{\int_0^1 u_T(\xi, 0) q_3(\xi) \bar{y}_k(\xi) d\xi}{\int_0^1 q_3(\xi) \bar{y}_k^2(\xi) d\xi}, \quad (11)$$

$$C_{2k} = \frac{\int_0^1 q_3(\xi) \psi(\xi) \bar{y}_k(\xi) d\xi}{p_n \int_0^1 q_3(\xi) \bar{y}_k^2(\xi) d\xi} - \frac{\int_0^1 \dot{u}_T(\xi, 0) q_3(\xi) \bar{y}_k(\xi) d\xi}{p_n \int_0^1 q_3(\xi) \bar{y}_k^2(\xi) d\xi}.$$

Уравнение (10) вместе с формулами (11) дает полное решение задачи для радиальных перемещений произвольного слоя трубы.

Отмечено, что первые слагаемые в формулах (11) отвечают за свободные колебания и не зависят от прикладываемой нагрузки  $\bar{d}(\tau)$ , между тем особый интерес представляют вынужденные перемещения, то есть вторые слагаемые формул (11). Поэтому будем считать, что  $\phi(\xi) = 0, \psi(\xi) = 0$ , а нагрузка  $\bar{d}(\tau)$  носит импульсный характер

$$d(\tau) = \psi \cos(\tau) \left( \sum_{k=0}^{\infty} \eta(\tau - kT_0) - \eta((\tau - kT_0) - \tau_0) \right),$$

где  $\eta(\tau)$  – функция Хевисайда;  
 $\tau_0$  – время действия импульса;  
 $T_0$  – периодичность стрельбы.

Предполагалось, что модуль упругости линейно зависит от радиуса слоя (на практике зависимость может иметь более сложный аналитический вид)

$$\bar{E}(\xi) = \left( 1 - \frac{1}{\mu} \right) \xi + \frac{1}{\mu},$$

где  $\mu$  – коэффициент, который характеризует перепад модулей упругости.

В процессе осесимметричных колебаний внутренний радиус  $\bar{u}(0, \tau)$  ствола периодически изменяется, что приводит к аналогичному изменению силы трения снаряда о ствол

$$F_{\text{тр}}(\tau) = F_0 + k_0 u_0(\tau),$$

где  $F_0$  – сила трения без учета радиальных колебаний;  
 $k_0$  – коэффициент трения, то есть при движении по стволу снаряд испытывает «притормаживания».

В безразмерном виде уравнение перемещения  $\bar{v}(\tau)$  снаряда по стволу имеет вид

$$\frac{d^2 \bar{v}}{d\tau^2} = \bar{d}(\tau) - \bar{F}_0 - \bar{k}_0 u_0(\tau),$$

где

$$\tau = \frac{t\sqrt{E_*}}{h\sqrt{(1-v^2)\rho_*^2}}, \quad u_0(\tau) = u \left( 0, \frac{h\sqrt{(1-v^2)\rho_*^2}}{\sqrt{E_*}} \tau \right),$$

$$\bar{k}_0 = \frac{h^2(1-v^2)\rho_*^2}{mE_*} k_0, \quad \bar{F}_0 = \frac{h^2(1-v^2)\rho_*^2}{mE_*} F_0,$$

$$\bar{d}(\tau) = \frac{h^2(1-v^2)\rho_*^2}{mE_*} d(t);$$

$m$  – масса снаряда;

$l$  – длина ствола.

Отсюда, с учетом начальных условий  $\bar{v}(0) = 0$ ,  $\dot{\bar{v}}(0) = 0$ ,

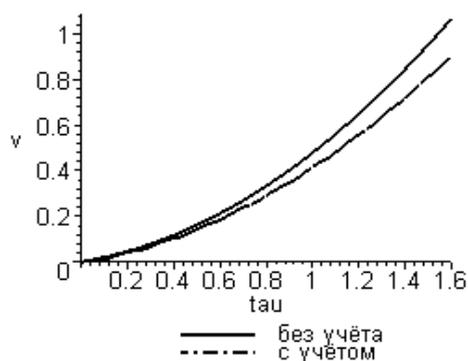
$$\dot{\bar{v}}(\tau) = \int \bar{d}(\tau) d\tau - \bar{k}_0 \int u_0(\tau) d\tau + \bar{F}_0 \tau + C_1,$$

$$\bar{v}(\tau) = \int \left( \int \bar{d}(\tau) d\tau \right) d\tau - \bar{k}_0 \int \left( \int u_0(\tau) d\tau \right) d\tau + \bar{F}_0 \frac{\tau^2}{2} + C_1 \tau + C_2,$$

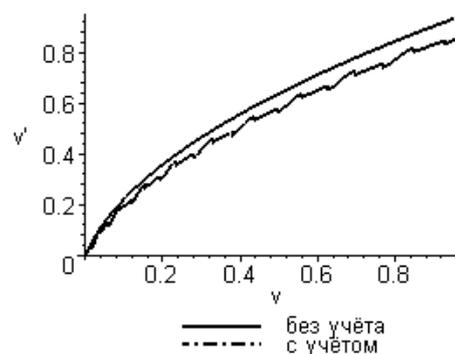
где

$$C_1 = - \left( \int (\bar{d}(\tau) - \bar{k}_0 u_0(\tau)) d\tau \right) \Big|_{\tau=0}, \quad C_2 = - \left( \int \left( \int (\bar{d}(\tau) - \bar{k}_0 u_0(\tau)) d\tau \right) d\tau \right) \Big|_{\tau=0}.$$

На рисунках 2, 3 представлены перемещение  $\bar{v}$  снаряда в стволе во времени, а также зависимость скорости снаряда  $\dot{\bar{v}}$  от перемещения  $\bar{v}$ .



**Рисунок 2** – Перемещения  $\bar{v}$  снаряда по стволу без учёта осесимметричных колебаний и с их учетом



**Рисунок 3** – Зависимость скорости снаряда  $\dot{\bar{v}}$  от перемещения  $\bar{v}$  по стволу без учёта осесимметричных колебаний и с их учетом

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что в результате «притормаживаний» скорость снаряда на вылете  $\dot{\bar{v}}(\tau_1)$ , где  $\tau_1: \bar{v}(\tau_1) = 1$ , уменьшается в среднем на 10,47%, причем влияние радиуса отверстия ствола  $a$  на «притормаживания» практически отсутствует, гораздо более существенные изменения происходят при увеличении коэффициента  $\mu$ , который характеризует перепад модулей упругости во внутреннем и наружном слоях.

Кроме того, скорость вылета снаряда зависит, в том числе, и от того, в какой фазе осесимметричных колебаний произведен выстрел.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колтунов, М.А. Упругость и прочность цилиндрических тел [Текст]/ М.А. Колтунов, Ю.Н. Васильев, В.А. Черных. – М.: Высшая школа, 1975. – 526 с.
2. Гордон, В.А. Метод решения задач механики неоднородных тел [Текст]: монография / В.А. Гордон, В.С. Шоркин, М.И. Борзенков. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – 161 с.

### Гордон Владимир Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Высшая математика»  
 Тел. (4862) 41-98-48  
 E-mail: [gordon@ostu.ru](mailto:gordon@ostu.ru)

### Семенова Галина Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»  
 Тел. (4862) 43-67-43  
 E-mail: [greece\\_g@rambler.ru](mailto:greece_g@rambler.ru)

Д.Н. ЕШУТКИН, А.В. ПОЛЯНСКИЙ, А.В. ГОРИН

## О СООТВЕТСТВИИ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МОЛОТКОВ

*Изучение характеристик насосных станций и гидравлических молотков позволит сделать вывод о соответствии параметров.*

*Studying of characteristics of pump stations and hydraulic hammers will allow drawing a conclusion on conformity of parameters.*

Гидравлические насосные станции предназначены для привода отбойных молотков, бетоноломов, пил, гайковертов и других механизмов. Нами рассмотрены и проанализированы различные модели гидравлических насосных станций и гидравлических молотков ведущих отечественных и зарубежных производителей: Lifton, Горный инструмент, JCB.

LIFTON выпускает различные модели [1] компактных гидравлических станций: LP8 P/D/E – облегченные портативные, с бензиновым, дизельным или электрическим приводом для работы с гидравлическими молотками, для которых требуется расход жидкости до 20 л/мин и давление до 14 МПа (например, LH10, LH18S, LH18E); LP11 P/DE; средней массы для работы с гидравлическими молотками, для которых требуется расход жидкости до 30 л/мин и давление до 14 МПа (например, LH21S, LH21E, LH25S, LH25E); LP11-40 и LP11Twin, которые объединяют в себе преимущества двух гидростанций LP8. Таким образом, производительность увеличивается до 40 л/мин. Их, по мнению разработчиков, можно применять для работы с двумя гидравлическими молотками, для которых требуется расход жидкости до 20 л/мин., одновременно или с одним гидравлическим молотком, требующим расхода до 40 л/мин.

**Таблица 1** – Характеристики гидравлических молотков компании «Lifton» (Англия)

Модель	Масса $M$ , кг	Расход жидкости $Q$ , л/мин.	Рабочее давление $P$ , МПа	Частота ударов $n$ , уд./мин.	Энергия удара $T$ , Дж	Ударная мощность, кВт	КПД, $\eta$
LH10	13,9	18-22	7-9	2400	42	1,5	0,34
LH18S	22,5	18-22	9-11	1600	65	1,7	0,5
LH18E	22,9	18-22	9-11	1600	65	1,7	0,5
LH21S	24,7	18-30	10,5-12,5	1450	85	2	0,5
LH21E	25,1	18-30	10,5-12,5	1450	85	2	0,5
LH25S	30,6	18-30	10,5-12,5	1270	110	2,3	0,5
LH25E	31,0	18-30	10,5-12,5	1270	110	2,3	0,5

Нами произведена оценка эффективности использования мощности насосных станций (таблица 2) при работе различных молотков (таблица 1), результаты анализа приведены в таблице 3. Из таблицы 3 следует, что коэффициент использования мощности насосных станций низок, так, для молотков типа LH-10 он изменяется в диапазоне  $0,15 \div 0,3$ , для молотков LH-18 S/E –  $0,17 \div 0,34$ , для молотков LH-21 S/E –  $0,13 \div 0,4$ , для молотков LH-25 S/E –  $0,15 \div 0,46$ .

**Таблица 2** – Характеристики гидравлических станций компании «Lifton» (Англия)

Модель	Двигатель	Мощность двигателя, кВт	Производительность, л/мин.	Рабочее давление, МПа	Масса, кг	Размеры, мм
LP 8 P	Honda GX270 (Б)	6,8	20	14	65	680×525×585
LP 8 D	Yanmar (Д)	5	20	14	72	680×525×585
L P8 E	Электрический, 380В	5,5	20	14	70	680×525×585
LP 11 P	Honda GX 390 (Б)	9,8	20-28	14	91	745×600×705
LP 11 DE	Yanmar (Д)	6,8	20	14	116	745×700×720
LP 11-40	Vanguard (Д)	15,5	20-40	15,5	110	745×700×720
LP 11 PE TWIN	Vanguard (Б)	15,5	40	15,5	110	745×700×720

**Таблица 3** – Коэффициент использования мощности насосных станций при работе молотков различных моделей «Lifton»

Модель молотка	Коэффициент использования мощности насосной станции						
	LP 8 P	LP 8 D	L P8 E	LP 11 P	LP 11 DE	LP 11-40	LP 11 PE TWIN
LH10	0,22	0,3	0,27	0,15	0,22	–	–
LH18S	0,25	0,34	0,31	0,17	0,25	–	–
LH18E	0,25	0,34	0,31	0,17	0,25	–	–
LH21S	0,3	0,4	0,36	0,2	0,3	0,13	0,13
LH21E	0,3	0,4	0,36	0,2	0,3	0,13	0,13
LH25S	0,34	0,46	0,42	0,23	0,34	0,15	0,15
LH25E	0,34	0,46	0,42	0,23	0,34	0,15	0,15

Гидравлические станции компании «Горный инструмент» представлены тремя моделями [2,3] с бензиновыми двигателями Honda и Vanguard, а также двумя моделями с электроприводом от сети 380 и 660 В (таблица 5). Основную станцию MC-20 комплектуют гидравлическим отбойным молотком МГЗ-40-2. Следует отметить, что рабочей жидкостью молотков компании «Горный инструмент» могут быть как минеральные масла, так и водная эмульсия.

**Таблица 4** – Характеристики гидравлических молотков компании «Горный инструмент» (Россия)

Модель	Масса М, кг	Расход жидкости Q, л/мин	Рабочее давление P, МПа	Частота ударов n, уд./мин	Энергия удара T, Дж	Ударная мощность, кВт	КПД, η
МГЗ-40-1	10	18	9-32	1450	40-60	0,97	0,54
МГЗ-40-2	10	18	9-32	1450	40-60	0,97	0,54
МГЗ-18	10,8	18-22	7-9	2400	18	0,72	0,32
МГЗ-45	19	18-22	9-11	1600	65	1,7	0,5
МГЗ-85	21	18-30	10,5-12,5	1450	85	2,0	0,65÷0,35
МГЗ-110	25,2	18-30	10,5-12,5	1270	110	2,3	0,74÷0,37

**Таблица 5** – Характеристики гидравлических станций компании «Горный инструмент» (Россия)

Модель	Двигатель	Мощность двигателя, кВт	Производительность, л/мин.	Давление макс., МПа	Масса с маслом, кг	Размеры, мм
MC-20	Honda (Б)	6,8	20	14	68	710×560×580
MC-20э	Электрический, 380 В	5,5	20	14	70	710×560×580
MC-20вэ	Электрический, 380-660 В	5,5	20	14	100	710×560×580
MC-30	Honda (Б)	9,8	20-28	15,5	91	705×600×745
MC-2×20, 1×40	Vanguard (Б)	15,5	40	15,5	110	705×600×745

В таблице 6 приведены рассчитанные нами значения коэффициентов использования мощности насосных станций компании «Горный инструмент». Анализ таблицы 6 показывает, что мощность станций «Горный инструмент» также значительно превышает мощность, необходимую для работы молотков.

**Таблица 6** – Коэффициент использования мощности насосных станций при работе молотков различных моделей «Горный инструмент»

Модель молотка	Коэффициент использования мощности насосной станции				
	МС-20	МС-20э	МС-20вэ	МС-30	МС-2×20, 1×40
МГЗ-40-1	0,14	0,18	0,18	0,1	0,12*
МГЗ-40-2	0,14	0,18	0,18	0,1	0,12*
МГЗ-18	0,1	0,13	0,13	0,08	0,1*
МГЗ-45	0,25	0,31	0,31	0,18	0,23*
МГЗ-85	0,3	0,36	0,36	0,2	0,13
МГЗ-110	0,3	0,42	0,42	0,22	0,15

\* – при работе одновременно двух молотков

Гидравлические станции JCB (Англия) представлены моделями – Multiflow, Beaver, Trojan, Compact и Micro [4], которые комплектуют дизельными и бензиновыми двигателями. Beaver может работать с молотками и другим инструментом, рассчитанным на расход до 20 л/мин. Для своих станций компания JCB выпускает несколько моделей молотков серии 929 массой 12...29 кг (таблица 7).

**Таблица 7** – Характеристики гидравлических молотков компании «JCB Hydra Power» (Англия)

Модель	Масса $M$ , кг	Расход жидкости $Q$ , л/мин.	Рабочее давление $P$ , МПа	Частота ударов $n$ , уд./мин.	Энергия удара $T$ , Дж	Ударная мощность, кВт	КПД, $\eta$
929/92500	21	18-22	6,9-8,6	1500	44	1,1	0,4
929/92600	22	18-22	6,9-8,6	1500	44	1,1	0,4
929/92400	25	18-22	9,0-11,0	1500	52	1,3	0,4
929/92700	29	18-22	9,0-11,0	1500	52	1,3	0,4
929/92900	29	28-32	9,0-11,0	1450	56	1,4	0,42
929/12900	12	15-22	5,0-6,5	1500	36	0,9	0,4
929/30800	12	15-22	5,0-6,5	1500	36	0,9	0,4
929/30900	14	15-22	5,0-6,5	1500	36	0,9	0,4

**Таблица 8** – Характеристики гидравлических станций компании «JCB Hydra Power» (Англия)

Модель	Двигатель	Мощность, кВт	Давление, МПа	Производительность, л/мин.	Масса, кг	Размеры, мм
Micro	Honda GX160 (Б)	5,5	8,7	20	33	480×435×630
Compact	Honda GX160 (Б)	5,5	8,7	20	40	505×495×630
Beaver	Lombardini 15LD315 (Д)	6,8	13,8	20	83	655×640×780
Beaver	Honda GX340 (Б)	11	13,8	20	60	610×530×720
Trojan	Honda GX340 (Б)	11	13,8	20	85	735×590×810
Trojan	Honda GX390 (Б)	13	13,8	30	87	735×590×810
Multiflow	Vanguard	18	13,8	20, 30, 40	93	735×590×810

В таблице 9 приведены рассчитанные нами коэффициенты использования мощности насосных станций (таблица 8) компании «JCB Hydra Power».

**Таблица 9** – Коэффициент использования мощности насосных станций при работе молотков различных моделей «JCB Hydra Power»

Модель молотка	Коэффициент использования мощности насосной станции						
	Micro	Compact	Beaver (Д)	Beaver (Б)	Trojan 340	Trojan 390	Multiflow
929/92500	0,2	0,2	0,16	0,1	0,1	0,09	0,12*
929/92600	0,2	0,2	0,16	0,1	0,1	0,09	0,12*
929/92400	0,23	0,23	0,19	0,12	0,12	0,1	0,14*
929/92700	0,23	0,23	0,19	0,12	0,12	0,1	0,14*
929/92900	0,24	0,24	0,2	0,13	0,13	0,11	0,15*
929/12900	0,34	0,34	0,13	0,08	0,08	0,07	0,1*
929/30800	0,16	0,16	0,13	0,08	0,08	0,07	0,1*
929/30900	0,16	0,16	0,13	0,08	0,08	0,07	0,1*

\* – при работе одновременно двух молотков

Следует отметить, что в соответствии с санитарными нормами из приведенных типов молотков к ручным машинам ударного действия (по массе) могут быть отнесены лишь молотки МГЗ-40-1 и МГЗ-40-2. Все другие необходимо считать переносными машинами (бетоноломы).

Кроме того, санитарные нормы ограничивают усилие нажатия (не более 200 Н) и виброскорость (не более 100 м/с). Исходя из этого, ударная мощность ручных машин не может превышать 1 кВт.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что мощности выпускаемых насосных станций существенно завышены, что приводит как к излишним потерям, так и к излишней массе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ЕООД «Lifton» [Электронный ресурс]; адрес доступа <http://www.liftong.com>.
2. Котылев, Ю.Е. Прикладная теория гидравлических машин ударного действия [Текст]: монография / Ю.Е. Котылев, Д.Н. Ешуткин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 176 с., ил.
3. ООО «Горный инструмент» [Электронный ресурс]; адрес доступа <http://www.mtools.ru>.
4. «JCB» [Электронный ресурс]; адрес доступа <http://www.jcb.com>.

### **Ешуткин Дмитрий Никитович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»  
 Тел. (4862) 41-98-46

### **Полянский Александр Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 Аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
 Тел. (4862) 41-98-46

### **Горин Андрей Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 Зав. лабораторией кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
 Тел. (4862) 41-98-46

## ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ВРЕМЕНИ ГРАНИЦЫ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА С АБСОЛЮТНО ЖЕСТКИМ ТЕЛОМ

*Рассматривается кинематика контактирующих поверхностей при конечном деформировании. На поверхности абсолютно жесткого тела вводится подвижная система координат, связанная с границей контактной зоны. С ее помощью дается простое и естественное определение скорости перемещения замкнутой кривой по искривленной поверхности. Опираясь на это и ряд других определений, вычисляется скорость границы контакта. Рассматриваются два случая: 1) гладкая поверхность деформируемого тела; 2) эта поверхность имеет излом на границе контакта. Оказывается, в обоих случаях перемещение границы контакта обусловлено двумя независимыми явлениями: «наплывом-откатом» материала деформируемого тела и скольжением деформируемого тела по поверхности абсолютно жесткого тела.*

*Kinematics of contacting surfaces under finite strain is addressed. A moving coordinate system is introduced on a rigid body surface. That system is linked with a contact zone boundary. By this a simple and nature definition of closed curve velocity is given when a curve is moving along a surface. Starting with that and other definitions the formulae for velocity of contact zone boundary are deduced. Two cases are considered: 1) a deformable body surface is smooth; 2) that surface has a jog at the contact zone boundary. In both cases it appears that a contact zone boundary displacement is caused by two independent phenomena: inflow-rollback of deformable body and sliding in contact.*

Контактные задачи механики твердого тела в вычислительном отношении являются одними из самых сложных краевых задач математической физики. Связано это, в первую очередь, с тем, что ни граничные условия на поверхности контакта, ни сама эта поверхность в большинстве случаев заранее не известны. В программах численного решения контактных задач, основанных, как правило, на методе конечных элементов, поверхность контакта отыскивается в процессе пошагового расчета путем проверки состояний граничных узлов КЭ сетки, определяемых по величине зазора между поверхностями контактирующих тел и величине нормальной составляющей силы реакции в зоне контакта [1-3]. Уравнение эволюции поверхности контакта в явном виде не решается и даже не рассматривается. В этой связи вывод такого уравнения представляет самостоятельный интерес, чему и посвящена данная работа. Его практическая ценность состоит в том, что появляется дополнительная возможность контролировать точность вычислительного процесса в численных методах.

Примем соглашения об использовании двух видов скобок: круглые скобки (...) – для обозначения функциональных зависимостей и наборов независимых переменных; фигурные скобки {...} – для обозначения координат точки на какой-либо поверхности или в пространстве.

Начнем с того, что дадим естественное определение скорости перемещения замкнутой кривой  $\gamma(t)$  по гладкой искривленной поверхности. Пусть  $A$  – произвольная точка  $\gamma(t)$  в произвольный момент времени  $t$ , а  $\gamma'$  – положение этой кривой в близкий момент времени  $t + \Delta t$ . Проведем на рассматриваемой поверхности через точку  $A$  перпендикулярно кривой  $\gamma(t)$  геодезическую линию  $\Gamma$ . Пусть  $A' = \gamma' \cap \Gamma$  (если таких точек  $A'$  несколько, то берем из них ближайшую к точке  $A$ ). Тогда скоростью перемещения кривой  $\gamma(t)$  в точке  $A$  называем предел

$$v_{\gamma}(A) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|AA'|}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $|AA'|$  – длина отрезка геодезической  $\Gamma$  между точками  $A$  и  $A'$ . Скорости  $v_{\gamma}(A)$

приписываем знак «+» или «-» в зависимости от того, в какую сторону относительно области, охваченной замкнутой кривой  $\gamma(t)$ , нужно двигаться по геодезической, чтобы попасть из точки  $A$  в точку  $A'$ : извне или внутрь.

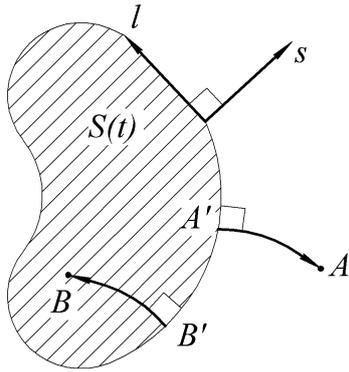


Рисунок 1 – Координаты  $(l, s)$

Введем на (гладкой) поверхности  $\Omega$  абсолютно жесткого тела криволинейную систему координат, привязанную к замкнутой кривой  $\gamma = \partial S(t)$ , являющейся границей области контакта  $S(t)$  (рисунок 1). Для этого сначала естественно параметризуем кривую  $\gamma$ . Затем из каждой точки этой кривой выпускаем под прямым углом пару геодезических (локально кратчайших) линий на  $\Omega$ : одну – наружу области  $S$ , другую – внутрь. Очевидно, что если кривая  $\gamma$  гладкая, то эти геодезические линии покроют некоторую область поверхности  $\Omega$ , содержащую  $\gamma$ , не пересекаясь друг с другом. Это позволяет ввести

криволинейную систему координат на  $\Omega$ . Координаты  $(l, s)$  определяем следующим образом. Находим на поверхности  $\Omega$  геодезическую линию, выпущенную под прямым углом из некоторой точки  $A' \in \gamma$  (пусть ей соответствует натуральный параметр  $l = l(A')$ ) и попадающую в точку  $A$ . Пусть  $s = |AA'|$  – ее длина (точнее, длина соответствующего отрезка), причем для геодезической линии, выпущенной извне области  $S$ , берем эту длину со знаком «+», а для геодезической, выпущенной внутрь этой области, – со знаком «-». Тогда в качестве криволинейных координат точки  $A$  берем пару  $\{l, s\}$ . Например, на рисунке 1 следует положить  $s(A) > 0, s(B) < 0$ . Заметим, что, в силу замкнутости кривой  $\gamma = \partial S$ , координата  $l$  – циклическая.

Приведенный способ определения координат  $\{l, s\}$  не гарантирует ни их существования, ни единственности для произвольной точки  $A \in \Omega$ . Однако, если точка  $A$  расположена достаточно близко от кривой  $\gamma$ , оба эти требования выполняются.

Дадим теперь определения различных  $\varepsilon$ -окрестностей кривой  $\gamma$  (здесь  $\varepsilon > 0$ ). Положительной  $\varepsilon$ -окрестностью  $\gamma_{+\varepsilon}$  кривой  $\gamma$  назовем множество точек  $A\{l, s\} \in \Omega$ , удовлетворяющих условию  $0 < s < \varepsilon$ . Отрицательной  $\varepsilon$ -окрестностью  $\gamma_{-\varepsilon}$  кривой  $\gamma$  назовем множество точек  $A\{l, s\} \in \Omega$ , удовлетворяющих условию  $-\varepsilon < s < 0$ . Наконец,  $\varepsilon$ -окрестностью  $\gamma_\varepsilon$  кривой  $\gamma$  назовем множество точек  $A\{l, s\} \in \Omega$ , удовлетворяющих условию  $-\varepsilon < s < \varepsilon$ . Очевидно, что для достаточно малых  $\varepsilon$  все эти множества точек существуют.

Систему координат  $(l, s)$  дополним третьей координатой  $h$ , отсчитываемой от поверхности  $\Omega$  в направлении внешней нормали, и получим 3-мерную криволинейную систему координат  $(l, s, h)$ . Очевидно, что для точек пространства, находящихся достаточно близко от кривой  $\gamma$ , отображение  $(x^1, x^2, x^3) \rightarrow (l, s, h)$  является диффеоморфизмом.

Опираясь на сделанные определения, приступим к вычислению скорости движения границы контакта. Рассмотрим по отдельности случаи упругопластического упрочняющегося (в частности, упругого) материала и идеально пластического материала.

*Случай 1.* Считаем поле скорости непрерывным по пространственным координатам, а поверхности контактирующих тел – гладкими в любой момент времени (это справедливо, в частности, для упругого материала). Обозначим  $\omega$  поверхность деформируемого тела. Ясно, что вблизи границы контакта  $\gamma = \partial S$  эта поверхность задается некоторой функцией  $h = h(l, s)$ . При этом для достаточно малого  $\varepsilon > 0$

$$h(l, s) \equiv 0 \text{ при } A\{l, s\} \in \gamma_{-\varepsilon} \text{ (условие контактирования)}$$

$$h(l, s) > 0 \text{ при } A\{l, s\} \in \gamma_{+\varepsilon} \text{ (условие непроникновения).}$$

Будем считать, что функция  $h(l, s)$  принадлежит не только классу  $C^1(\gamma_\varepsilon)$ , но и классу

$C^2(\gamma_{+\varepsilon})$  и непрерывна вплоть до границы  $\gamma$  области  $\gamma_{+\varepsilon}$  вместе со своими производными до второго порядка. При переходе через границу  $\gamma$  области  $\gamma_{+\varepsilon}$  вторая производная по  $s$  функции  $h(l, s)$  терпит разрыв ввиду условия контактирования  $h(l, s) \equiv 0$  при  $A\{l, s\} \in \gamma_{-\varepsilon}$ . Таким образом, функция  $h(l, s)$  в области  $\gamma_{+\varepsilon}$  представима разложением

$$h(l, s) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 h_0}{\partial s^2} s^2 + o(s^2) \text{ при } A\{l, s\} \in \gamma_{+\varepsilon}, \text{ где } \frac{\partial^2 h_0}{\partial s^2} = \frac{\partial^2 h}{\partial s^2} \Big|_{\{l, +0\}}. \quad (2)$$

Следующим шагом получим выражение для поля скорости точек поверхности  $\omega$ . Как было сказано выше, поле скорости точек деформируемого тела непрерывно по пространственным координатам, поэтому поле скорости  $(\dot{l}, \dot{s}, \dot{h})$  точек поверхности  $\omega$  будет непрерывной функцией координат  $(s, l)$  в достаточно малой окрестности  $\gamma_\varepsilon$ . Обратим внимание на то, что здесь рассматривается (относительная) скорость точек поверхности деформируемого тела по отношению к поверхности абсолютно жесткого тела. Будем считать вертикальную компоненту скорости  $\dot{h}(s, l)$  гладкой в  $\gamma_{+\varepsilon}$  вплоть до границы  $\gamma$ . При переходе через границу  $\gamma$  производная  $\frac{\partial \dot{h}}{\partial s}$ , вообще говоря, терпит разрыв ввиду условия контактирования  $h(l, s) \equiv 0$  при  $A\{l, s\} \in \gamma_{-\varepsilon}$ . Таким образом, функция  $\dot{h}(l, s)$  в области  $\gamma_{+\varepsilon}$  представима разложением

$$\dot{h}(l, s) = \frac{\partial \dot{h}_0}{\partial s} s + o(s) \text{ при } A\{l, s\} \in \gamma_{+\varepsilon}, \text{ где } \frac{\partial \dot{h}_0}{\partial s} = \frac{\partial \dot{h}}{\partial s} \Big|_{\{l, +0\}}. \quad (3)$$

Для вычисления скорости кривой  $\gamma$  поступим следующим образом. В произвольный момент времени  $t_0$  фиксируем произвольную точку  $A\{l_0, 0\}$  на кривой  $\gamma$  (рисунок 2).

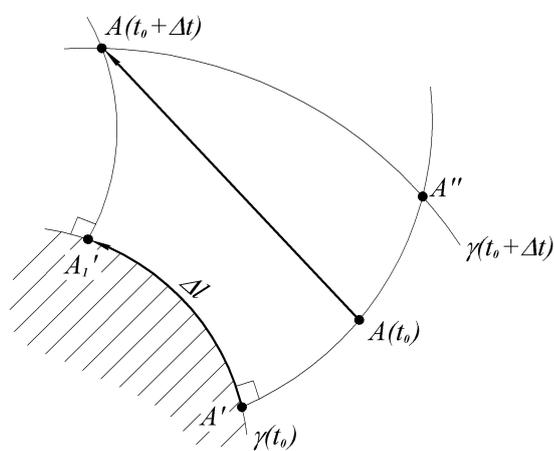


Рисунок 2 – К выводу (13) и (14)

Фиксируем также точку  $A\{l_0, s_0\} \in \Omega$ , где произвольное  $s_0 > 0$  достаточно мало. Пусть  $A(t)$  есть материальная точка поверхности  $\omega$  деформируемого тела, совпадающая в момент времени  $t = t_0$  с точкой  $A\{l_0, s_0\}$ . В момент  $t_0 + \Delta t$  касания поверхности  $\Omega$  абсолютно жесткого тела точка  $A(t)$  имеет нулевую компоненту вертикальной скорости:  $\dot{h}(A(t_0 + \Delta t)) = 0$ . Исходя из закона движения точки  $A(t)$  по координате  $h$  при  $t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$ , имеем

$$h(t_0 + \Delta t) = h_0 + \dot{h}_0 \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{h}_0 (\Delta t)^2 + o((\Delta t)^2) = 0, \quad (4)$$

$$\dot{h}(t_0 + \Delta t) = \dot{h}_0 + \ddot{h}_0 \Delta t + o(\Delta t) = 0, \quad (5)$$

где  $h_0 = h(A(t_0)) = h(l_0, s_0, t_0)$ ,  $\dot{h}_0 = \dot{h}(A(t_0)) = \dot{h}(l_0, s_0, t_0)$ ,  $\ddot{h}_0 = \ddot{h}(A(t_0)) = \ddot{h}(l_0, s_0, t_0)$ .

Из (5) находим

$$\ddot{h}_0 \Delta t = -\dot{h}_0 + o(\Delta t)$$

и подставляем в (4), учитывая, что слагаемое  $(1/2)o(\Delta t)\Delta t$  войдет в слагаемое  $o((\Delta t)^2)$

$$h(t_0 + \Delta t) = h_0 + \frac{1}{2} \dot{h}_0 \Delta t + o((\Delta t)^2) = 0. \quad (6)$$

Но, согласно (3),

$$\dot{h}_0 = \frac{\partial \dot{h}_0}{\partial s} s_0 + o(s_0). \quad (7)$$

Теперь заметим, что  $\Delta t = \Delta t(s_0)$ , причем  $\Delta t$  и  $s_0$  – переменные одного порядка малости (это вытекает из естественного требования существования и конечности предела  $\lim_{s_0 \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{s_0}$ ). Следовательно,  $o(\Delta t)$  можно заменить на  $o(s_0)$ . Поэтому, подставляя (7) в (6), а

также учитывая разложение (2), получим

$$\Delta t = -2 \frac{h(l_0, s_0, t_0)}{\dot{h}(l_0, s_0, t_0)} + o(\Delta t) = -\frac{\partial^2 h_0 / \partial s^2}{\partial \dot{h}_0 / \partial s} s_0 + o(s_0). \quad (8)$$

Обратим внимание, что возможно как  $\Delta t > 0$  (если поверхность деформируемого тела  $\omega$  приближается к поверхности абсолютно жесткого тела  $\Omega$  в точке  $A(t_0)$ , т.е. момент касания  $t_0 + \Delta t$  следует за моментом  $t_0$ ), так и  $\Delta t < 0$  (если поверхность деформируемого тела  $\omega$  удаляется от поверхности абсолютно жесткого тела  $\Omega$  в точке  $A(t_0)$ , т.е. момент касания  $t_0 + \Delta t$  предшествует моменту  $t_0$ ).

Таким образом, в момент касания  $t = t_0 + \Delta t$  точка  $A(t)$  лежит на поверхности  $\Omega$  и через нее проходит граница  $\gamma(t_0 + \Delta t)$  новой области контакта  $S(t_0 + \Delta t)$ . Пусть координаты точки  $A(t)$  в этот момент равны

$$l_1 = l_0 + \Delta l, s_1 = s_0 + \Delta s.$$

Проведем через точки  $A'$  и  $A(t_0)$  геодезическую линию  $A'A(t_0)$  до пересечения с кривой  $\gamma(t_0 + \Delta t)$  и пусть  $A'' = A'A(t_0) \cap \gamma(t_0 + \Delta t)$ . Если  $A'_1 \in \gamma(t_0)$  есть точка с координатами  $(l_1, 0)$ , то, по определению, геодезическая на поверхности  $\Omega$ , пущенная под прямым углом из  $A'_1$ , попадет в точку  $A(t_0 + \Delta t)$  (рисунок 2). Сравним длины отрезков геодезических  $|A'A''|$  и  $|A'_1 A(t_0 + \Delta t)|$ . Предполагая существование скорости перемещения  $v_\gamma(A)$  (т.е. предела (1))  $\forall A \in \gamma(t_0)$  и ее непрерывную зависимость от натурального параметра  $l$ , имеем

$$|A'A''| = v_\gamma(l_0)\Delta t + o(\Delta t), \quad (9)$$

$$|A'_1 A(t_0 + \Delta t)| = v_\gamma(l_1)\Delta t + o(\Delta t). \quad (10)$$

В силу непрерывности  $v_\gamma(l)$  как функции  $l$

$$v_\gamma(l_1) = v_\gamma(l_0) + o((\Delta l)^0),$$

где  $\Delta l = l_1 - l_0$ , а  $o((\Delta l)^0)$  – то же самое, что и  $o(1)$ . Но  $\Delta l$  и  $\Delta t$  – переменные одного порядка малости, зависящие от  $s_0$ , поэтому

$$v_\gamma(l_1) = v_\gamma(l_0) + o((\Delta t)^0).$$

Подставив это в (10) и сравнив с (9), видим, что  $|A'A''| = |A'_1 A(t_0 + \Delta t)| + o(\Delta t)$ , и при работе с определением (1) можно заменить отрезок  $A'A''$  отрезком  $A'_1 A(t_0 + \Delta t)$

$$v_\gamma(l_0) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|A'A''|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|A'_1 A(t_0 + \Delta t)|}{\Delta t}. \quad (11)$$

Далее находим, что по определению

$$|A'_1 A(t_0 + \Delta t)| = s_0 + \Delta s, \quad (12)$$

а также

$$\Delta s = \dot{s}(l_0, s_0, t_0)\Delta t + o(\Delta t) = (\dot{s}_0 + o((s_0)^0))\Delta t + o(\Delta t).$$

(Здесь введено обозначение  $\dot{s}_0 = \dot{s}(l_0, 0, t_0)$ ) ввиду непрерывности поля скорости. Учитывая, что  $\Delta s$  и  $\Delta t$  – переменные одного порядка малости с переменной  $s_0$ , от которой они зависят, из последнего равенства имеем

$$\Delta s = \dot{s}_0 \Delta t + o(\Delta t).$$

Отсюда, а также из (8)-(12), заключаем

$$v_\gamma(l_0) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|A'_1 A(t_0 + \Delta t)|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{s_0}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = -\frac{\partial \dot{h}_0 / \partial s}{\partial^2 h_0 / \partial s^2} + \dot{s}_0.$$

Здесь снова использовалась равносильность условий  $\Delta t \rightarrow 0$  и  $s_0 \rightarrow 0$ . Выпишем полученный результат, переобозначая  $l_0 \rightarrow l, s_0 \rightarrow s, h_0 \rightarrow h$ :

$$v_\gamma(l) = -\frac{\partial \dot{h} / \partial s}{\partial^2 h / \partial s^2} + \dot{s}. \quad (13)$$

*Случай 2.* При переходе через границу контактной области поле скорости точек деформируемого тела может иметь разрыв, а поверхность деформируемого тела  $\omega$  – излом (это справедливо для идеально пластического материала). Будут достаточны более грубые по сравнению с предыдущим случаем аппроксимации поверхности  $\omega$ , задаваемой функцией

$$h(l, s) = \frac{\partial h_0}{\partial s} s + o(s) \text{ при } A \{l, s\} \in \gamma_{+\varepsilon}, \text{ где } \frac{\partial h_0}{\partial s} = \left. \frac{\partial h}{\partial s} \right|_{\{l, +0\}}$$

и поля скорости

$$\dot{h}(l, s) = \dot{h}_0 + o(s^0) \text{ при } A \{l, s\} \in \gamma_{+\varepsilon}, \text{ где } \dot{h}_0 = \dot{h}(l, +0).$$

В остальном техника вывода повторяет предыдущий случай, поэтому сразу приведем окончательный результат

$$v_\gamma(l) = -\frac{\dot{h}}{\partial h / \partial s} + \dot{s}. \quad (14)$$

Анализируя выражения (13) и (14), легко заметить, что скорость перемещения границы области контакта обусловлена двумя независимыми эффектами: «наплывом-откатом» материала деформируемого тела и скольжением деформируемого тела по поверхности абсолютно жесткого тела.

Полученные результаты предполагается использовать в пакете программ ШТАМП-2, созданном на кафедре АВТОПЛАСТ ОрелГТУ и ориентированном на контактные задачи механики твердого тела.

Автор благодарит профессора механико-математического факультета Тульского государственного университета А.А. Маркина за постановку задачи и обсуждение результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов, В.С. Метод реализации модели контактного взаимодействия в МКЭ при решении задач о формоизменении сплошных сред [Текст] / В.С. Давыдов, Е.Н. Чумаченко // Известия РАН. Серия «Механика твердого тела». – 2000. – № 4. – С. 53-63.
2. Бурого, Н.Г. Обзор контактных алгоритмов [Текст] / Н.Г. Бурого, В.Н. Кукуджанов // Известия РАН. Серия «Механика твердого тела». – 2005. – №1. – С. 45-47.
3. Морев, П.Г. Вариант метода конечных элементов для контактных задач с трением [Текст] / П.Г. Морев // Известия РАН. Серия «Механика твердого тела». – 2007. – №4. – С. 168-182.

**Морев Павел Геннадьевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат физико-математических наук, ведущий инженер лаборатории новых материалов

Тел. (4862) 41-98-59

E-mail: [paulorel@mail.ru](mailto:paulorel@mail.ru)

Т.А. НИКОЛЬСКАЯ, Д.Н. НИКОЛЬСКИЙ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ О КОНУСООБРАЗОВАНИИ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕВЫХ ПАР

*Исследовано влияние параметров совместно фильтрующихся жидкостей и дебита скважины на характер конусообразования. Задача решается численно методом дискретных вихревых пар в рамках модели Лейбензона-Маскета («поршневое» вытеснение). Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант № МК-491.2008.1) и РФФИ (грант № 06-01-96303).*

*Influence of parameters of in common filtered liquids, capacities of a bore hole on character of formation of a cone is investigated. The problem dares numerically a method of discrete vortical pairs within the limits of model of Lejbenzona-Masketa. Work is executed with financial support of the President of the Russian Federation (the grant number МК-491.2008.1) and the Russian Fund of Basic Researches (the grant number 06-01-96303)*

### ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации нефтяных пластов с водонапорным режимом требуется контролировать положение контура нефтеносности  $\Gamma_t$  – границы водонефтяного контакта (рисунок 1). После введения в эксплуатацию горизонтальной скважины контур нефтеносности деформируется и в зависимости от параметров жидкостей, скважины и пласта может занять некоторое устойчивое положение или достигнуть контура скважины  $L_s$ . В случае, если контур нефтеносности занимает устойчивое положение, нефтяной пласт может эксплуатироваться продолжительное время. А в случае, если контур нефтеносности достигнет контура скважины, подошвенная вода будет прорываться в скважину, что приведет к ее отключению. При этом возникает необходимость в мониторинге оседания контура нефтеносности.

Целью работы является: мониторинг эволюции контура нефтеносности  $\Gamma_t$ ; исследование влияния параметров жидкостей, пласта на критический дебит скважины  $q^*$ , при котором контур нефтеносности  $\Gamma_t$  занимает устойчивое положение; изучение характера прорыва и опускания контура нефтеносности  $\Gamma_t$ .

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование конусообразования проведем в рамках модели Лейбензона-Маскета, в которой полагается, что одна жидкость вытесняет другую полностью («поршневое» вытеснение). При этом контур нефтеносности  $\Gamma_t$  считается резким и моделируется гладкой кривой (класса  $C^{(2)}$ ). Область фильтрации  $D$  делится контуром нефтеносности  $\Gamma_t$  на части  $D^+$  (внешняя) и  $D^-$  (внутренняя), занятые водой и нефтью, вязкости и плотности которых  $\mu_1, \rho_1$  и  $\mu_2, \rho_2$ , соответственно. Нормаль  $\vec{n}$  к контуру  $\Gamma_t$  направим во внешнюю область  $D^+$ , а направление обхода выберем таким образом, чтобы двойка векторов  $(\vec{\tau}, \vec{n})$  была правой.

Скорость фильтрующихся жидкостей будем искать в виде  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}^*$ , где  $\vec{v}_0$  – скорость стока, возбуждающего течение,  $\vec{v}^*$  – скорость возмущения, вызванного внесением

в область протекания процесса  $D$  контура нефтеносности  $\Gamma_t$ .

Вне контуров  $\Gamma_t$  и  $L_s$  выполняется закон Дарси  $\vec{v} = \text{grad}\phi$ ,  $\phi = \mu^{-1}(\rho\Pi - p)$ ,  $p$  – давление,  $\mu = \mu_1$  и  $\rho = \rho_1$  в области  $D^+$ ,  $\mu = \mu_2$  и  $\rho = \rho_2$  в области  $D^-$ ,  $\Pi$  – потенциал массовых сил, и уравнение неразрывности  $\text{div}\vec{v} = 0$ . На контуре  $\Gamma_t$  выполняются условия непрерывности давления и расхода жидкостей  $p^+ = p^-$  и  $v_n^+ = v_n^-$ .

Считаем, что  $\vec{v}_0 = \text{grad}\phi_0$  и  $\vec{v}^* = \text{grad}\phi^*$  во всей области протекания процесса  $D$ , кроме контуров  $\Gamma_t$  и  $L_s$ . Тогда потенциал  $\phi^*$  удовлетворяет уравнению Лапласа:  $\Delta\phi^* = 0$  в  $D^+$  и  $D^-$ , при следующих граничных условиях:  $(\partial\phi^*/\partial n)^+ = (\partial\phi^*/\partial n)^-$ ,  $(1 - \lambda_\mu)\phi^*_+ - (1 + \lambda_\mu)\phi^*_- = f$ , на  $\Gamma_t$ , где  $f = 2\lambda_\mu\phi_0 + 2\lambda_\rho\Pi$ ,  $\lambda_\mu = (\mu_2 - \mu_1)/(\mu_1 + \mu_2)$ ,  $\lambda_\rho = (\rho_1 - \rho_2)/(\mu_2 + \mu_1)$  и  $\phi^* \rightarrow 0$  при  $|\vec{r}| \rightarrow \infty$ .

Потенциал  $\phi^*$  ищем в каждый момент времени  $t$  в виде потенциала двойного слоя  $\phi^*(M, N) = \int_{\Gamma_t} g(N, t)\Omega(M, N)dl_N$  в  $D^+$  и  $D^-$ ,  $\Omega(M, N) = \partial\Phi_1(M, N)/\partial n_N$ ,  $\Phi_1(M, N)$  –

потенциал нормированного стока, с полным расходом, равным  $-1$ . С учетом известных свойств потенциала двойного слоя, условие непрерывности давления на контуре  $\Gamma_t$  приведет к интегральному уравнению [2]

$$g - 2\lambda_\mu G_*g = f \text{ на } \Gamma_t, \quad (1)$$

где в интегральном операторе  $G_*g = \int_{\Gamma_t} g(N, t)\Omega(M, N)dl_N$ , интеграл понимается в смысле

главного значения по Коши.

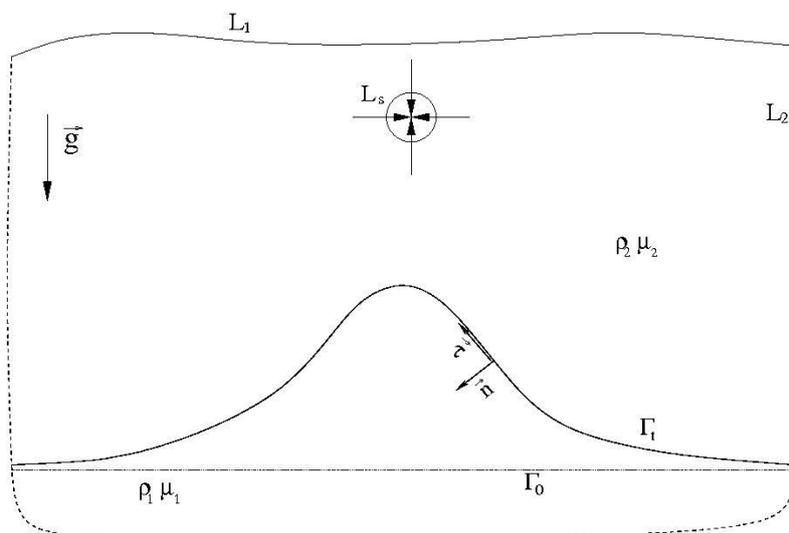


Рисунок 1 – Постановка задачи

Дифференциальное уравнение движения контура  $\Gamma_t$  выпишем, используя известную связь физической скорости  $d\vec{r}_M/dt$  и скорости фильтрации  $\vec{v}$

$$d\vec{r}_M/dt = \vec{v}_0 + \nabla G_*g \text{ на } \Gamma_t. \quad (2)$$

Начальное положение контура  $\Gamma_t$  (в момент времени  $t = 0$ ) зададим параметрически

$$\vec{r}_0 = \vec{r}(0, \zeta), \quad (3)$$

где  $\zeta$  – параметр.

В итоге решение задачи об эволюции контура нефтеносности  $\Gamma_t$  сведено к решению системы интегрального и дифференциального уравнений (1) и (2) при заданном начальном условии (3).

Отметим, что если область протекания процесса безгранична, то потенциал стока  $\Phi_1$  представляет первое фундаментальное решение уравнения Лапласа. В том случае, когда область протекания процесса  $D$  ограничена непроницаемой кривой  $L_1$  или контуром питания  $L_2$ , то потенциал стока представляет собой функцию Грина.

### ДИСКРЕТНАЯ СХЕМА

В работе [1] показано, что при небольших деформациях контура  $\Gamma_t$  наиболее точной является дискретная схема, в которой сингулярный оператор  $\nabla G_*$  вычисляется методом дискретных вихревых пар. Воспользуемся этой схемой для численного решения задачи (1)-(3).

В каждый момент времени  $t_j, j = 0, 1, \dots$ , границу  $\Gamma_t$  разобьем на  $n$  равных частей. В этом случае ее положение будет определяться множеством точек  $\vec{r}_m^j(x_m^j, y_m^j), m = \overline{1, n}, j = 0, 1, \dots$ . Представим интегральный оператор  $G_*$  в виде  $G_*g = - \int_{\Gamma_t} g(N, t) V_{2\tau}(M, N) dl_N$ , где  $V_{2\tau}(M, N)$  – касательная составляющая скорости

нормированного вихря с циркуляцией, равной  $-1$ . Выполним замену интегралов на сумму, а дифференциалов – на их разностные аналоги, получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$g_m^j - 2\lambda_\mu \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq m}}^n g_k^j \Omega_{m,k}^j \Delta l_k^j = f_m^j, \quad m = \overline{1, n}, j = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

и разностный аналог дифференциального уравнения эволюции контура  $\Gamma_t$

$$\Delta \vec{r}_m^j / \Delta t^j = \vec{v}_m^j + \sum_{k=1}^n g_k^j \left( \vec{V}_{2m,k-\frac{1}{2}} + \vec{V}_{2m,k+\frac{1}{2}} \right), \quad m = \overline{1, n}, j = 0, 1, \dots \quad (5)$$

где  $\Delta \vec{r}_m^j = \vec{r}_m^j - \vec{r}_m^{j-1}, \Delta t^j = t^{j+1} - t^j$ . Начальное условие имеет вид

$$\vec{r}_m^0(x_m^0, y_m^0), \quad m = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Таким образом, для вычисления положения контура  $\Gamma_t^{j+1}$  в момент времени  $t^{j+1}$  по известному положению контура  $\Gamma_t^j$  в момент времени  $t^j$  необходимо для момента времени  $t^j$  решить СЛАУ [4], а затем вычислить положение контура  $\Gamma_t^{j+1}$  по формулам [5].

### КОНУСООБРАЗОВАНИЕ В БЕЗГРАНИЧНОМ ГРУНТЕ

Считаем, что границы области фильтрации расположены на таком достаточно большом расстоянии от скважины, что их влиянием можно пренебречь. Рассмотрим безграничный грунт. В этом случае функции  $\varphi_0, \vec{v}_0, \Phi_1, \vec{V}_2$ , входящие в основную систему уравнений (1) и (2), имеют вид [3]

$$\varphi_0 = q/(2\pi) \ln r_{M_S M}, \quad \vec{v}_0 = q/(2\pi) \vec{r}_{M_S M} / r_{M_S M}^2, \quad \Phi_1(M, N) = -1/(2\pi) \ln r_{NM},$$

$$\vec{V}_2 = 1/(2\pi) ((y_M - y_N)\vec{i} - (x_M - x_N)\vec{j}) / r_{NM}^2, \quad \Pi = y_M,$$

где  $\vec{r}_{M_S M} = (x_M - x_1)\vec{i} + (y_M - y_1)\vec{j}$ ,  $\vec{r}_{NM} = (x_M - x_N)\vec{i} + (y_M - y_N)\vec{j}$ . Здесь и далее выбираем характерное расстояние  $L_0$  – расстояние от контура  $\Gamma_0$  до контура скважины  $L_S$  и характерное время  $T_0 = \pi L_0^2 / q$  – время, по истечении которого граница раздела «разноцветных» жидкостей достигнет контура скважины.

На рисунке 2 построены последовательные положения контура  $\Gamma_t$  в моменты времени  $t = 0, t = 1/3T, t = 2/3T, t = T$ . Здесь  $T$  – время, по истечении которого контур нефтеносности достигает устойчивого положения при параметрах  $\lambda_\mu = 0,5$ ,  $\lambda_\rho = 0,1$  и дебите  $q^* = 0,21$ . Максимальная высота, на которую поднимается вода,  $d^* = 0,7$ . Параметры  $\lambda_\mu = 0,5$  и  $\lambda_\rho = 0,1$  соответствуют случаю реальных вязкостей и плотностей нефти и воды. Для исследования использовалась методика определения предельно допустимого дебита, изложенная в работе [4].

Особенностью задачи, изображенной на рисунке 2, является то, что дебит скважины равен предельно допустимому дебиту  $q^*$ . И если при фиксированных параметрах  $\lambda_\mu$  и  $\lambda_\rho$  дебит скважины превышает предельно допустимый  $q > q^*$ , то контур  $\Gamma_t$  достигает скважины. Если  $q < q^*$ , то контур  $\Gamma_t$  достигает устойчивого положения с высотой  $d < d^*$ .

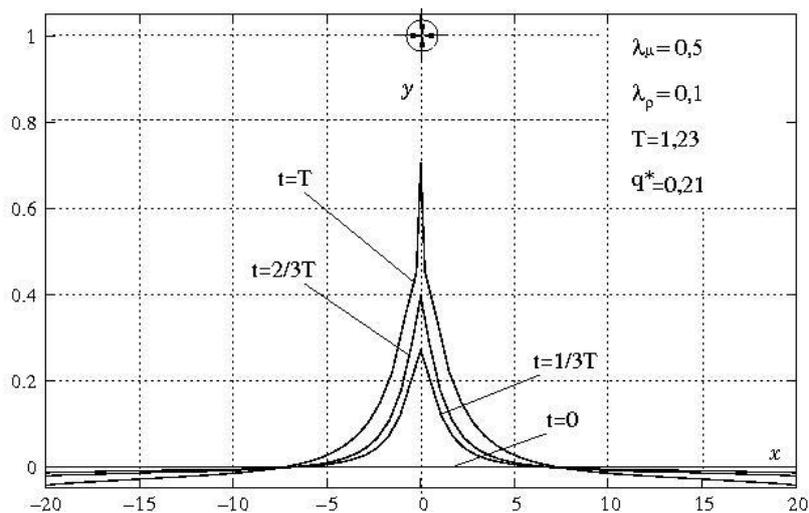


Рисунок 2 – Достижение устойчивого положения

Выберем дебит скважины  $q = 10q^*$  и проследим за эволюцией контура нефтеносности. На рисунке 3 построены последовательные положения контура нефтеносности  $\Gamma_t$  в моменты времени  $t = 0, t = 1/3T, t = 2/3T, t = T$ . При этом время достижения контуром нефтеносности контура скважины  $L_S$   $T = 0,7$ . Для того, чтобы вода не поступала в скважину, ее отключают, и контур нефтеносности  $\Gamma_t$  оседает. Динамика оседания контура нефтеносности  $\Gamma_t$  представлена на рисунке 4. На рисунке 4 время  $T = 12,6$  – время уменьшения высоты конуса нефтеносности в десять раз  $d = 0,1$ . Сопоставляя время оседания контура нефтеносности и время его прорыва в скважину, замечаем, что время оседания больше времени прорыва в 18 раз.

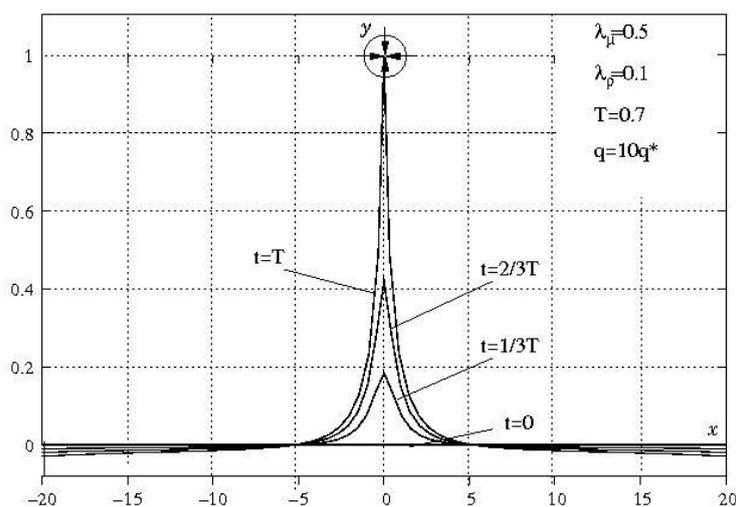


Рисунок 3 – Прорыв воды в скважину

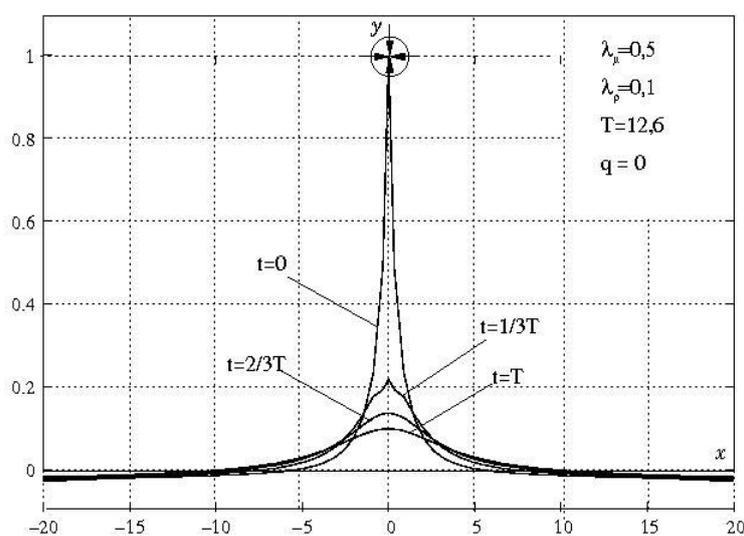


Рисунок 4 – Оседание конуса нефтеносности

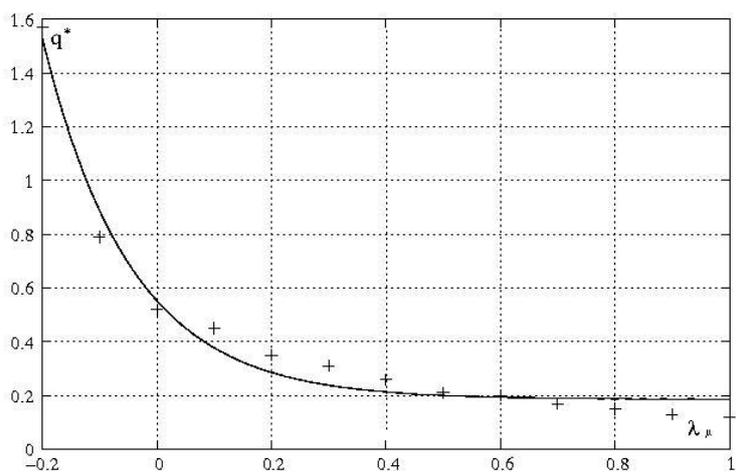


Рисунок 5 – Влияние вязкостей жидкостей на дебит  $q^*$

На рисунке 5 представлена зависимость допустимого дебита  $q^*$  от параметра  $\lambda_\mu$ . Видим, что с ростом параметра  $\lambda_\mu$  предельно допустимый дебит уменьшается, т.к. с увеличением параметра  $\lambda_\mu$  «язык воды», перемещающийся к скважине, становится более

узким. Зависимость дебита  $q^*$  от параметра  $\lambda_\rho$  представлена на рисунке 6. Из этого рисунка видим, что с ростом  $\lambda_\rho$  дебит  $q^*$  увеличивается. Причиной этого является увеличение разности плотностей жидкостей  $\rho_1 - \rho_2$ .

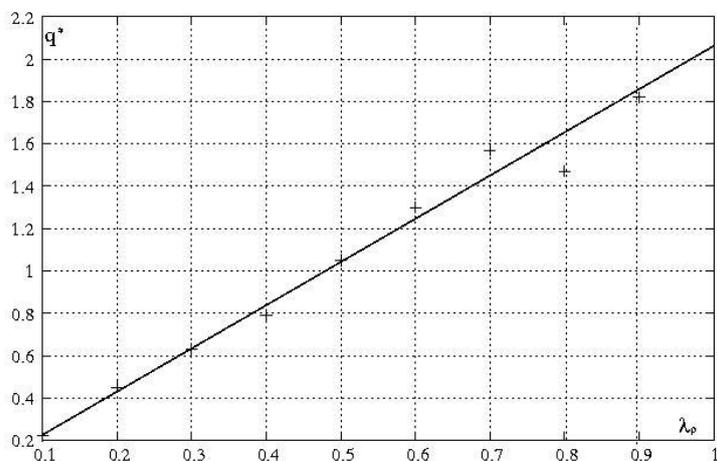


Рисунок 6 – Влияние плотностей жидкостей на дебит  $q^*$

Кривые на рисунках 5 и 6 построены методом наименьших квадратов Маркарта-Левенберга [5]. Крестиками на этих рисунках отмечены экспериментальные точки, а аппроксимирующие функции изображены сплошными линиями и имеют вид:  $q^* = a \exp(b\lambda_\mu) + c$ ,  $a = 0,366466$ ,  $b = -6,49323$ ,  $c = 0,1860$  на рисунке 5, и  $q^* = d\lambda_\rho + f$ ,  $d = 2,04$ ,  $f = 0,022$  на рисунке 6. Вес всех экспериментальных точек одинаков и равен единице.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Никольский, Д.Н. К вопросу построения дискретной схемы для плоской задачи эволюции границы раздела различных жидкостей [Текст]/ Д.Н. Никольский // Вычислительные технологии 2008. – Том 13. – № 4. – С. 89-94.
2. Lifanov I.K., Nikolsky D.N., Piven' V.F. Mathematical modelling of the work of the system of wells in a layer with the exponential law of permeability variation and the mobile liquid interface// Russian Journal Numerical Analysis and Mathematica Modelling, 2002. – Vol.17. – No.4. – P. 381-391.
3. Голубева, О.В. Курс механики сплошных сред [Текст]/ О.В. Голубева. – М.: Наука, 1971. – 368 с.
4. Никольская, Т.А. Определение критического дебита скважины в задаче эволюции границы раздела жидкостей к горизонтальной скважине [Текст]/ Т.А. Никольская // Вестник науки. Сборник научных работ преподавателей, аспирантов и студентов физико-математического факультета ГОУ ВПО «ОГУ». – Выпуск 6. – Орел: Издательство ОГУ, полиграфическая фирма «Картуш», 2007. – С. 103-107.
5. Thomas Williams, Colin Kelley. Gnuplot an interactive plotting program, раздел Fit // <http://www.gnuplot.info/docs/node180.html>.

### Никольская Татьяна Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Ассистент кафедры «Высшая математика»  
E-mail: [NikolskyaTA@mail.ru](mailto:NikolskyaTA@mail.ru)

### Никольский Дмитрий Николаевич

Орловский государственный университет, г. Орел  
Кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой «Информатика»  
Тел. (4862) 76-49-62  
E-mail: [NikolskyDN@mail.ru](mailto:NikolskyDN@mail.ru)

УДК 534.1

О.А. ПЕТРАКОВА, Е.А. КОЛИНЬКО, О.В. ФОМИНОВА

## УПРАВЛЯЕМАЯ ВИБРОЗАЩИТНАЯ СИСТЕМА С ДИНАМИЧЕСКИМ ГАСИТЕЛЕМ

*Приведены результаты анализа динамических свойств управляемой виброзащитной системы с динамическим гасителем.*

*The results of the examination of dynamical characteristics of the controlling vibro-protection system with the dynamical damper were adduced.*

Дополнительные массы, упруго присоединенные к действующей виброзащитной системе, используются для реализации метода динамического гашения колебаний, основанного на увеличении реактивного сопротивления системы в определенном диапазоне частот. Такие упруго присоединенные массы принято называть динамическими гасителями. Положительный эффект виброзащиты достигается только в случае синхронизации колебаний присоединенной массы и защищаемого объекта на частоте собственных колебаний динамического гасителя. На этой частоте проявляются антирезонансные свойства системы с двумя степенями свободы, т.е. амплитуды колебаний защищаемого объекта уменьшаются и в идеале, при отсутствии демпфирования, стремятся к нулю. Данный процесс приводит к появлению достаточно узкого провала на графике амплитудно-частотной характеристики виброзащитной системы.

Прямо противоположный эффект усиления амплитуд колебаний защищаемого объекта слева и справа от частоты синхронизации связывается с резонансными явлениями, которые проявляются в результате совпадения частоты кинематического возмущения с одной из собственных частот колебаний системы с двумя степенями свободы.

Уменьшение резонансных пиков за счет демпфирования неизбежно приводит к увеличению амплитуд колебаний защищаемого объекта на частоте синхронизации. Кроме того, эффект динамического гашения колебаний проявляется только в случае периодического внешнего возмущения. Если частота внешнего возмущения изменяется, то для достижения синхронизации требуется производить регулировку параметров динамического гасителя. Однако на это требуется определенное время. При случайном внешнем возмущении такой возможности нет, и процесс «непрерывной» регулировки не может обеспечить провал амплитудно-частотной характеристики на частоте собственных колебаний динамического гасителя.

Данные недостатки виброзащитной системы с динамическим гасителем могут быть устранены при использовании управляемой виброзащитной системы, расчетная схема которой представлена на рисунке 1.

Колебания данной системы, как динамической модели с двумя степенями свободы, описываются следующими взаимозависимыми дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1 (x_1 - x_2) &= 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + b_2 (\dot{x}_2 - \dot{y}) \cdot \text{if} [\dot{x}_2 (\dot{x}_2 - \dot{y}) > 0, 1, 0] + b_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \\ + c_2 (x_2 - y) + c_1 (x_2 - x_1) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Обозначения параметров и переменных, которые приняты при записи системы дифференциальных уравнений (1), раскрыты и поясняются в примечании к рисунку 1.

Дифференциальные уравнения (1) были преобразованы к безразмерному виду путем

деления их на выражение  $m_2 y_0 \omega^2$ .

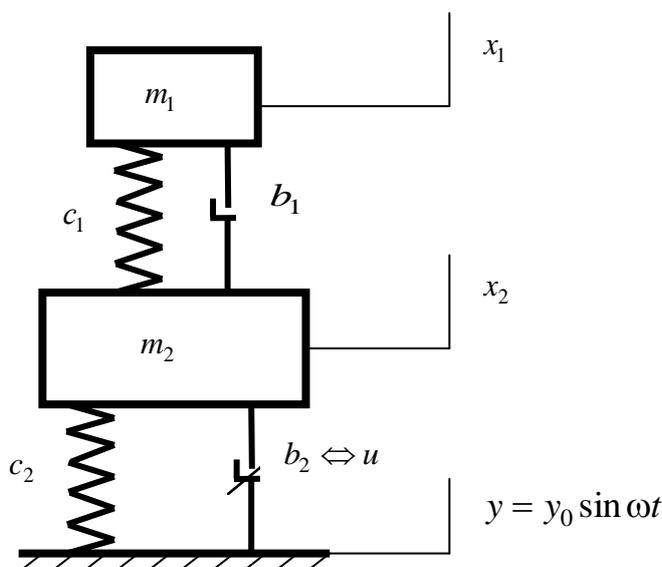


Рисунок 1 – Расчетная схема управляемой виброзащитной системы с динамическим гасителем

$m_1$  – присоединенная масса – масса динамического гасителя (кг);  $m_2$  – масса защищаемого объекта (кг);  
 $c_1$  – жесткость присоединенного упругого элемента (Н/м);  $c_2$  – жесткость несущего упругого элемента (Н/м);  $b_1$  – вязкое сопротивление присоединенного гидравлического демпфера (Н · с/м);  
 $b_2$  – вязкое сопротивление гидравлического демпфера (Н · с/м);  $x_1$  – координата присоединенной массы (м);  $x_2$  – координата защищаемого объекта (м);  $y$  – координата подвижного основания – кинематическое возмущение (м);  $y_0$  – амплитуда кинематического возмущения (м);  
 $\omega$  – частота кинематического возмущения ( $c^{-1}$ ).

В результате преобразований получена система четырех дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= \xi_2, \quad \dot{\xi}_2 = -\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\varepsilon 1}{\eta} (\xi_2 - \xi_4) + \frac{\gamma}{\eta^2} (\xi_1 - \xi_3) \right], \quad \dot{\xi}_3 = \xi_4, \\ \dot{\xi}_4 &= -\frac{u}{\eta} (\xi_4 - \cos \tau) - \frac{\varepsilon 1}{\eta} (\xi_4 - \xi_2) - \frac{1}{\eta^2} (\xi_3 - \sin \tau) - \frac{\gamma}{\eta^2} (\xi_3 - \xi_1). \end{aligned} \quad (2)$$

При переходе к безразмерным переменным и параметрам были приняты следующие обозначения:  $\xi_1 = x_1/y_0$ ,  $\xi_2 = \dot{x}_1/y_0\omega$  – перемещение и скорость динамического гасителя;  $\xi_3 = x_2/y_0$ ,  $\xi_4 = \dot{x}_2/y_0\omega$  – перемещение и скорость защищаемого объекта;  $\tau = \omega \cdot t$  – фаза (безразмерное время);  $\eta = \omega/\sqrt{c/m}$  – относительная частота;  $\mu = m_1/m_2$  – коэффициент отношения масс;  $\gamma = c_1/c_2$  – относительный коэффициент жесткости;  $\varepsilon 1 = b_1/\sqrt{c_2 m_2}$  – относительный коэффициент демпфирования;

$$u = \begin{cases} \varepsilon 2 = b_2/\sqrt{c_2 m_2} & \text{if } \xi_4 (\xi_4 - \cos \tau) > 0; \\ 0 & \text{if } \xi_4 (\xi_4 - \cos \tau) < 0. \end{cases} \quad \text{– управление.}$$

В результате проведения серии численных экспериментов были установлены основные закономерности влияния на динамику управляемой модели (2) относительной частоты  $\eta$ , коэффициента отношения масс  $\mu$  и относительного коэффициента жесткости  $\gamma$ .

Первая серия экспериментов проводилась при следующих неизменных параметрах:  $\mu = 0,2$ ;  $\gamma = 0,2$ ;  $\varepsilon_1 = 0,01$ ;  $\varepsilon_2 = 2,0$ .

Во второй серии экспериментов было увеличено в два раза значение коэффициента отношения масс  $\mu$ , т.е. использовались следующие параметры:

$$\mu = 0,4; \gamma = 0,2; \varepsilon_1 = 0,01; \varepsilon_2 = 2,0.$$

В третьей серии экспериментов было увеличено в два раза значение относительного коэффициента жесткости  $\gamma$ , т.е. использовались следующие параметры:

$$\mu = 0,2; \gamma = 0,4; \varepsilon_1 = 0,01; \varepsilon_2 = 2,0.$$

Установлено, что при одинаковых значениях коэффициента отношения масс  $\mu$  и относительного коэффициента жесткости  $\gamma$  эффект динамического гашения колебаний проявляется, когда относительная частота  $\eta = 1,0$ . При этом коэффициент динамичности по перемещению минимален ( $\min K = 0,144$ ).

В узком диапазоне частот, когда  $0,95 \leq \eta \leq 1,02$ , амплитуды колебаний защищаемого объекта остаются также достаточно малыми и коэффициенты динамичности не превышают минимального значения коэффициента динамичности более чем в два раза.

Как и следовало ожидать, с увеличением значения коэффициента отношения масс  $\mu$  эффект динамического гашения колебаний проявляется при относительных частотах меньше единицы, т.е., когда  $\eta < 1,0$ . Соответственно, если увеличивать значение относительного коэффициента жесткости  $\gamma$ , то эффект динамического гашения колебаний проявляется при относительных частотах больше единицы, т.е., когда  $\eta > 1,0$ .

Управление формирует прерывистое компенсационное воздействие, которое направлено против движения защищаемого объекта и совпадает по направлению с восстанавливающей силой, развиваемой динамическим гасителем на интервалах, где данная восстанавливающая сила уменьшается по абсолютной величине. Антирезонансные режимы колебаний защищаемого объекта и присоединенной массы осуществляются с фазовой задержкой, которая составляет порядка 1,57 радиана. «Опережающие колебания» совершает защищаемый объект.

Следует отметить также, что увеличение относительного коэффициента жесткости с 0,2 до 0,4 позволило уменьшить амплитуды колебаний присоединенной массы в два раза.

Прерывистое компенсационное воздействие, которое формируется управлением, возбуждает переходные процессы в системе. Как следствие, фазовый сдвиг между колебаниями подвижного основания и защищаемого объекта не равен 1,57 радианам. Условие резонанса не выполняется, и резонансные колебания в обычном понимании не возникают. Как следствие, на первой и второй резонансных частотах, слева и справа от частоты синхронизации, коэффициенты динамичности не превышают единицы.

Уровень колебаний защищаемого объекта при первом резонансе уменьшается за счет прерывистого компенсационного воздействия, корректирующего движение защищаемого объекта на интервалах длительностью порядка четверти периода. В пределах этих интервалов происходит смена знака перемещения защищаемого объекта.

Уровень колебаний защищаемого объекта при втором резонансе уменьшается за счет противофазного движения присоединенной массы и защищаемого объекта. Развиваемая динамическим гасителем восстанавливающая сила направлена против движения защищаемого объекта (к положению статического равновесия). Дополнительно, на интервалах первой части полупериода установившихся колебаний, где восстанавливающая сила мала и увеличивается по абсолютной величине, движение защищаемого объекта дополнительно корректируется за счет управления, которое формирует прерывистое компенсационное воздействие.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Карамышкин, В.В. Динамическое гашение колебаний [Текст]/ В.В. Карамышкин; под ред. К.М. Рагулькиса. – Л.: Машиностроение, 1988. – 108 с.
2. Москвичев, Ю.В. Управление демпфированием колебательной системы с динамическим гасителем [Текст]/ Ю.В. Москвичев, В.И. Чернышев // Материалы III международного научного семинара «Ударо-вибрационные системы, машины и технологии». – Орел: ОрелГТУ, 2006. – С. 437-441.
3. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле [Текст]/ С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

**Петракова Оксана Александровна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
аспирант  
Тел. (4862) 47-47-49

**Колинько Елена Александровна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
аспирант  
Тел. (4862) 42-95-13

**Фоминова Ольга Владимировна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
Тел. (4862) 47-47-49  
E-mail: [chernv@ostu.ru](mailto:chernv@ostu.ru)

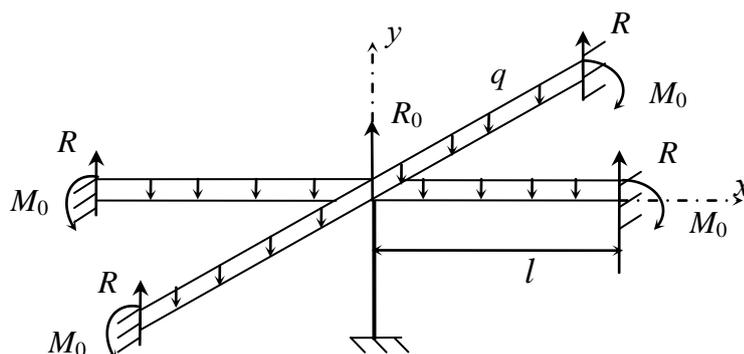
Т.В. ПОТУРАЕВА

## ПЕРЕХОДНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В СТЕРЖНЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ИЗМЕНЕНИИ УСЛОВИЙ ОПИРАНИЯ

*В настоящей работе решена задача по определению динамических догрузений в элементах пространственной рамно-стержневой системы. Для исследования принят фрагмент, моделирующий пространственную рамно-стержневую систему многоэтажного каркаса здания с внезапно выключающейся стойкой.*

*Is in the present work solved problem regarding the dynamic loadings in the elements of three-dimensional frame-rod system. The fragment, which simulates the three-dimensional frame-rod system of the many-storeyed body of building with the suddenly turned off steadfast is accepted for study.*

Рассматривается статически неопределимая крестообразная конструкция, состоящая из четырех жестко соединенных звеньев длиной  $l$ , жестко защемленных наружными концами. Кроме того, конструкция опирается на вертикальную жесткую колонну (рисунок 1). Конструкция нагружена равномерно распределенной по звеньям нагрузкой интенсивности  $q$ .



**Рисунок 1** – Расчетная схема конструкции

Предполагается, что в определенный момент опора конструкции – жесткая колонна, внезапно разрушается. В результате в конструкции возникает динамический процесс (затухающие колебания), в ходе которого деформации и напряжения могут значительно превысить рабочие статические показатели и отрицательно сказаться на функционировании или целостности конструкции.

В силу симметрии конструкции и нагрузки реакции  $R$  и  $M_0$  на концах звеньев одинаковы.

Статическую неопределимость раскрываем методом сравнения. В основной системе (жестко защемленные наружные концы и удаленная опора):

1) отсутствуют прогибы  $w_0$  в перекрестье, т.е.

$$\bar{w}_{0q} + \bar{w}_{0R_0} + \bar{w}_{0M_0} = 0; \quad (1)$$

2) отсутствуют повороты сечений  $w_l$  в концевых точках, т.е.

$$\bar{w}'_{lq} + \bar{w}'_{lR_0} + \bar{w}'_{lM_0} = 0; \quad (2)$$

3) уравнение равновесия

$$4R + R_0 = 4ql. \quad (3)$$

Решение статической задачи в безразмерном виде

$$\bar{w}_{cm} = \frac{\bar{q}\xi^2}{12} \left( \xi - \frac{1}{2}\xi^2 - \frac{1}{2} \right), \quad (4)$$

где

$$\xi = \frac{x}{\ell}, \quad \bar{w} = \frac{y_{cm}}{\ell}, \quad \bar{q} = \frac{ql^3}{EJ}.$$

Обозначения стандартные.

Функция (4) в дальнейшем используется в качестве начального условия при описании динамического процесса, возникающего после внезапного разрушения центральной опоры.

Пусть в некоторый момент  $t = 0$  реакция  $R_0$  внезапно исчезла. В результате в видоизмененной конструкции начинаются колебания, которые под воздействием внешних и внутренних сил прекращаются. Затухающие колебания одного звена описываются уравнением

$$\frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \xi^4} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \tau^2} + \beta^2 \frac{\partial \bar{w}}{\partial \tau} = -\bar{q}, \quad (5)$$

где  $\beta^2$  – безразмерный коэффициент внутреннего трения (аналогичная задача без учета рассеяния при колебаниях решена в работе [2]).

Решения уравнения (5) должны удовлетворять граничным

$$\bar{w}(1, \tau) = 0, \quad \left. \frac{\partial \bar{w}}{\partial \xi} \right|_{1, \tau} = 0, \quad \left. \frac{\partial \bar{w}}{\partial \xi} \right|_{0, \tau} = 0, \quad \left. \frac{\partial^3 \bar{w}}{\partial \xi^3} \right|_{0, \tau} = 0 \quad (6)$$

и начальным

$$\bar{w}(\xi, 0\tau) = \bar{w}_{cm}, \quad \left. \frac{\partial \bar{w}}{\partial \tau} \right|_{\xi, 0} = 0 \quad (7)$$

условиям,

где  $\tau = \frac{t}{\ell^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}}$  – безразмерная переменная,

$E$  – соответственно модуль Юнга;

$\rho$  – плотность материала;

$A$  – площадь поперечного сечения;

$J$  – осевой момент инерции поперечного сечения.

Решение неоднородного уравнения (5) будем искать, раскладывая его правую часть в ряд по собственным функциям соответствующей однородной задачи

$$\frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \xi^4} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \tau^2} + \beta^2 \frac{\partial \bar{w}}{\partial \tau} = 0. \quad (8)$$

Разделим переменные в уравнении (8) и в граничных условиях (6), представим перемещения  $\bar{w} = \bar{w}(\xi, \tau)$  разложением по формам собственных колебаний с коэффициентами в виде некоторых функций времени  $T_n = T_n(\tau)$ :

$$\bar{w}(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(\tau) W_n(\xi), \quad (9)$$

где  $W_n = W_n(\xi)$  – форма собственных колебаний, соответствующая частоте  $W_n$ , которая определяется из уравнения

$$\frac{d^4 W_n}{d\xi^4} - \lambda_n^2 W_n = 0. \quad (10)$$

В предположении, что собственные движения стержня гармонические,  $\lambda_n$  – параметр частоты. Уравнение (10) должно удовлетворять граничным условиям

$$W_n(1) = 0, \quad \left. \frac{dW_n}{d\xi} \right|_1 = 0, \quad \left. \frac{dW_n}{d\xi} \right|_0 = 0, \quad \left. \frac{d^3 W_n}{d\xi^3} \right|_0 = 0. \quad (11)$$

Общее решение дифференциального уравнения (10) имеет вид

$$W_n(\xi) = A_{1n} \cos \sqrt{\lambda_n} \xi + A_{2n} \sin \sqrt{\lambda_n} \xi + A_{3n} ch \sqrt{\lambda_n} \xi + A_{4n} sh \sqrt{\lambda_n} \xi. \quad (12)$$

Если ввести начальные параметры

$$W_0 = W(0), \quad W'_0 = W'(0), \quad W''_0 = W''(0), \quad W'''_0 = W'''(0) \quad (13)$$

(штрих означает дифференцирование по  $\xi$ ), то решение уравнения (10), удовлетворяющее граничным условиям (6), принимает вид

$$W_n(\xi) = W_{0n} K_{4n}(\xi) + W'_{0n} K_{3n}(\xi) + W''_{0n} K_{2n}(\xi) + W_{0n} K_{1n}(\xi), \quad (14)$$

где  $K_i(\xi)$  ( $i = \overline{1,4}$ ) – функции Крылова [1].

Нормированные формы собственных колебаний имеют вид

$$W_n(\xi) = \frac{W_0}{ch \sqrt{\lambda} - \cos \sqrt{\lambda}} \left[ \cos \sqrt{\lambda} \xi ch \sqrt{\lambda} - ch \sqrt{\lambda} \xi \cos \sqrt{\lambda} \right]. \quad (15)$$

Частотное уравнение

$$sh \sqrt{\lambda_n} \cdot \cos \sqrt{\lambda_n} + \sin \sqrt{\lambda_n} \cdot ch \sqrt{\lambda_n} = 0 \quad (16)$$

получаем как условие существования нетривиальных решений системы алгебраических уравнений

$$\begin{cases} W_{0n} K_{4n}(1) + W''_{0n} K_{2n}(1) = 0; \\ \lambda_n^2 W_{0n} K_{1n}(1) + W'_{0n} K_{3n}(1) = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Приведем значения пяти первых частот собственных изгибных колебаний

$$\lambda_1 = 5,593; \quad \lambda_2 = 30,226; \quad \lambda_3 = 74,639; \quad \lambda_4 = 138,791; \quad \lambda_5 = 222,683.$$

Подставляя представление (9) в неоднородное дифференциальное уравнение (5), используя уравнение (10), умножая обе части уравнения (5) на  $W_n(\xi)$ , интегрируя их по  $\xi$  от 0 до 1, получим систему уравнений относительно функций  $T_n(\tau)$  – коэффициентов разложения (9)

$$\frac{d^2 T_n}{d\tau^2} + \beta^2 \frac{dT_n}{d\tau} + \lambda_n^2 T_n = R_n, \quad (18)$$

где обозначено

$$R_n = - \frac{\int_0^1 W_n(\xi) d\xi}{\int_0^1 W_n^2(\xi) d\xi}. \quad (19)$$

Решая уравнение (18) и используя преобразования Эйлера, получим

$$T_n(\tau) = e^{\sigma\tau} A_n \cos \omega_n \tau + e^{\sigma\tau} B_n \sin \omega_n \tau + \frac{R_n}{\lambda_n^2}, \quad (20)$$

где

$$\sigma = -\frac{\bar{\beta}^2}{2}, \quad \omega_n = \sqrt{4\lambda_n^2 - \bar{\beta}^4}.$$

Первые два слагаемых в правой части этой формулы есть общее решение однородного уравнения, последнее – частное решение неоднородного уравнения (18).

Подставляя (20) в (9), получим функцию прогибов

$$\bar{w}(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( e^{\sigma\tau} A_n \cos \omega_n \tau + e^{\sigma\tau} B_n \sin \omega_n \tau + \frac{R_n}{\lambda_n^2} \right) \cdot W_n(\xi). \quad (21)$$

Постоянные  $A_n$  и  $B_n$  определяем методом вариации произвольных постоянных.

$$A_n = \frac{R_n}{\omega_n} e^{-\sigma\tau} \left( \frac{\omega_n \cos \omega_n \tau + \sigma \sin \omega_n \tau}{\sigma^2 + \omega_n^2} \right) + C_{1n}, \quad (22)$$

$$B_n = \frac{R_n}{\omega_n} e^{-\sigma\tau} \left( \frac{\omega_n \sin \omega_n \tau + \sigma \cos \omega_n \tau}{\sigma^2 + \omega_n^2} \right) + C_{2n}. \quad (23)$$

Постоянные  $C_{1n}$  и  $C_{2n}$  определяем из начальных условий (7), используя первое начальное условие и свойства ортонормированности форм собственных колебаний  $W_n = W_n(\xi)$ .

Умножив обе части второго условия (7) на  $W_n(\xi)$ , проинтегрировав по  $\xi$  от 0 до 1 и используя начальное условие, получим

$$C_{1n} = \frac{\int_0^1 \bar{w}_{cm}(\xi) \cdot W_n(\xi) d\xi}{\int_0^1 W_n^2(\xi) d\xi} - \frac{R_n(\lambda_n^2 + \sigma^2 + \omega_n^2)}{\lambda_n^2(\sigma^2 + \omega_n^2)}, \quad (24)$$

$$C_{1n} = C_{2n}. \quad (25)$$

На рисунке 2 показано движение концевого сечения после внезапного разрушения центральной опоры при различных значениях коэффициента трения.

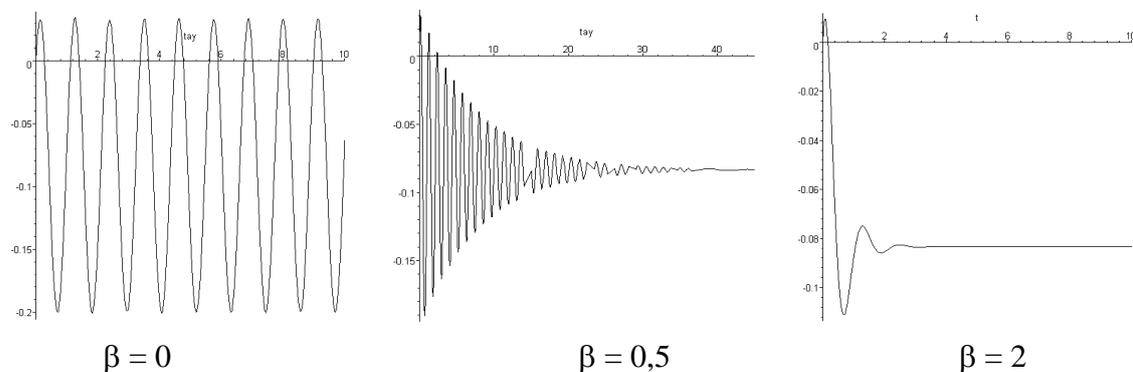


Рисунок 2 – Движение концевого сечения

Процесс колебания концевой сечения при различных значениях коэффициента трения происходит около одного и того же значения функции  $\bar{w}(0, \tau) = -0,083$ , которое достигается при квазистатическом удалении центральной опоры.

Таким образом, показано, что деформативность рассмотренной конструкции значительно (на 50%) возрастает при внезапной структурной перестройке по сравнению с аналогичным квазистатическим преобразованием.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович, И.М. Расчет сооружений на действие кратковременных и мгновенных сил [Текст]/ И.М. Рабинович, А.П. Сеницын, Б.М. Теренин. – Ч.1. – Издание ВИА, Москва, 1956. – 464 с. (с. 170).
2. Гордон, В.А. Влияние внезапной структурной перестройки на напряженно-деформированное состояние конструкции [Текст]/ В.А. Гордон, Н.В. Клюева, Т.В. Потураева // Сборник материалов IX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии». – ТулГУ: Тула, 2008. – 94 с. (стр. 7).

### **Потураева Татьяна Вячеславовна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»

Тел. (4862) 43-67-73

E-mail: [tanpo77@mail.ru](mailto:tanpo77@mail.ru)

УДК 621.787.6

А.В. КИРИЧЕК, Д.Л. СОЛОВЬЕВ, С.В. БАРИНОВ, С.А. СИЛАНТЬЕВ

## КОНТАКТНАЯ ВЫНОСЛИВОСТЬ ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

*Предложен новый способ повышения контактной выносливости деталей машин – статико-импульсная обработка, которая создает наклепанный поверхностный слой с высокой твердостью на большой глубине. Важной особенностью статико-импульсной обработки является возможность получения различной равномерности упрочненного поверхностного слоя. Проведены исследования влияния параметров упрочненного поверхностного слоя, полученного статико-импульсной обработкой, на контактную выносливость, разработана методика исследований. В результате, впервые получены рекомендации по равномерности деформационного упрочнения поверхностного слоя, способствующей повышению контактной выносливости деталей машин.*

*The new way of increasing of contact endurance of the part of machines – is static impulse processing which creates the riveted superficial layer with high hardness of the big depth is offered. The important feature of static impulse processing is the opportunity of receiving of the various uniformity of the strengthened superficial layer. The researches of influence of parameters of the strengthened superficial layer received by static impulse processing on the contact endurance are carried out, the technique of researches is developed. For the first time as a result, the recommendations on the uniformity of the deformation hardening of the superficial layer, promoting the increase contact endurance of the details of the machines have been received.*

**(Продолжение. Начало в № 3, 2008)**

Для качественной и количественной оценки применения упрочнения СИО были введены понятия, сравнивающие размер и количество выкрашиваний на упрочненной и неупрочненной областях:

– уменьшение числа выкрашиваний на единицу площади на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta n = \frac{n_{S0}}{n_S},$$

$$n_{S0} = \frac{n_0}{S_{д0}}; \quad n_S = \frac{n}{S_д},$$

где  $n_S$  – количество выкрашиваний на 1 мм<sup>2</sup> поверхности, шт;

$n$  – количество выкрашиваний на исследуемом участке, шт;

$S_д$  – площадь дорожки катания шаров на исследуемом участке, мм<sup>2</sup> (индекс «0» означает, что параметры характеризуют неупрочненную поверхность), уменьшение средней площади выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta S = \frac{S_{ср0}}{S_{ср}},$$

$$S_{ср0} = \frac{\sum S_0}{n_0}; \quad S_{ср} = \frac{\sum S}{n},$$

где  $S_{ср}$  – средняя площадь выкрашиваний, мм<sup>2</sup>;

$\sum S$  – суммарная площадь выкрашиваний на исследуемом участке, мм<sup>2</sup>, уменьшение

минимальной площади выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta S_{\min} = \frac{S_{\min 0}}{S_{\min}},$$

где  $S_{\min}$  – площадь наименьшего выкрашивания, измеренная на исследуемом участке, мм<sup>2</sup>, уменьшение максимальной площади выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta S_{\max} = \frac{S_{\max 0}}{S_{\max}},$$

где  $S_{\max}$  – площадь максимального выкрашивания, измеренная на исследуемом участке, мм<sup>2</sup>, уменьшение интенсивности выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной

$$\Delta I = \frac{I_0}{I},$$

$$I_0 = \frac{\sum S_0}{S_{д0}}; \quad I = \frac{\sum S}{S_{д}}$$

где  $I$  – интенсивность выкрашиваний на исследуемом участке.

По полученным экспериментальным данным построены характеристики  $\Delta n$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta S_{\min}$ ,  $\Delta S_{\max}$ ,  $\Delta I$  в зависимости от коэффициента перекрытия  $K$ , характеризующего равномерность деформационного упрочнения поверхностного слоя (рисунок 2).

В результате установлено, что наибольшая контактная выносливость была получена на поверхности с гетерогенной структурой упрочнения, когда коэффициент перекрытия  $0,35 < K < 0,45$ . Интенсивность выкрашиваний относительно неупрочненной поверхности была снижена в 3...6 раз, при этом в 1,5...2,5 раза снижено количество выкрашиваний. Уменьшился размер выкрашиваний, наибольшее выкрашивание, обнаруженное на упрочненной поверхности, было в 10...15 раз меньше, чем на неупрочненной, а наименьшее – меньше в 1,5...2 раза, средний размер выкрашиваний снизился в 2...3 раза.

Упрочнение с режимами, увеличивающими коэффициент перекрытия, повышает интенсивность выкрашиваний, увеличивает их количество и площадь, а начиная с  $K > 0,6...0,7$ , когда сверху упрочненного поверхностного слоя формируется равномерная структура, интенсивность выкрашиваний становится больше, чем на неупрочненной поверхности, и при  $K = 0,8...0,9$  интенсивность выкрашиваний относительно неупрочненной поверхности практически в два раза больше. Это объясняется перенаклепом поверхности, потерей пластичности металла, что способствует быстрому развитию микротрещин, приводящих к отслоению частиц металла.

При сравнении результатов испытаний на образцах, полученных при различных энергиях удара, необходимо учитывать то, что с повышением энергии ударов деформированная (наклепанная) область под единичными отпечатками становится больше и глубина упрочненного слоя увеличивается. В большей степени это сказывается на результатах изнашивания для образцов, упрочненных с коэффициентом перекрытия  $0 < K < 0,25$ . Так, если при энергии удара 56 Дж интенсивность выкрашиваний относительно неупрочненной поверхности практически не менялась, то при 70 Дж, когда упрочненные участки поверхности стали более значимыми, интенсивность выкрашиваний снизилась в 2...2,5 раза, причем это произошло в основном за счет уменьшения размеров выкрашиваний.

Сравнение результатов испытаний при различных площадях контакта шара и испытываемой поверхности показало, что увеличение площади контакта приводит к повышению интенсивности выкрашиваний, причем в основном это происходит за счет

увеличения количества выкрашиваний. Однако с увеличением глубины упрочнения изменение площади контакта в данном диапазоне практически не влияет на интенсивность выкрашиваний. Так, для образцов, упрочненных в диапазоне  $0,35 < K < 0,45$ , с энергией ударов 56 Дж, после испытаний с площадью контакта 0,09 интенсивность выкрашиваний была в 5 раз ниже, чем на неупрочненной поверхности, а после испытаний с площадью контакта 0,19 мм<sup>2</sup> – только в 2,5 раза, тогда как для образцов, полученных при 70 Дж, интенсивность выкрашиваний для обеих площадей контакта оставалась практически одинаковой и ниже, чем на неупрочненной поверхности, в 4...4,5 раза.

Проведены исследования влияния на износ окружной скорости, определяющей соотношение трения качения и проскальзывания при испытаниях. Установлено, что уменьшение окружной скорости приводит к увеличению интенсивности выкрашиваний (рисунок 3), что согласуется с мнением о том, что возникающее при трении качения проскальзывание тел качения с испытываемой поверхностью приводит к возникновению дополнительных тангенциальных сил, ускоряющих процесс развития дефектов на поверхностях качения и снижающих сопротивление усталости при контактных нагрузках [11]. Причем более очевидной эта картина просматривалась на образцах с меньшей глубиной упрочнения, полученных при энергии удара 56 Дж и испытанных в условиях меньшей площади контакта – 0,09 мм<sup>2</sup>. Кроме того, из графика видно, что при  $0,35 < K < 0,5$  кривые интенсивности выкрашивания практически совпали, а при  $K > 0,6$  разница между износом, полученным при различных угловых скоростях, более явная. Это можно объяснить тем, что на проскальзывание при качении в большей степени будет реагировать равномерно упрочненный слой небольшой глубины в условиях, когда прикладываемая циклическая нагрузка будет более сосредоточенной в контакте тела качения и испытываемой поверхности.

## **ВЫВОДЫ**

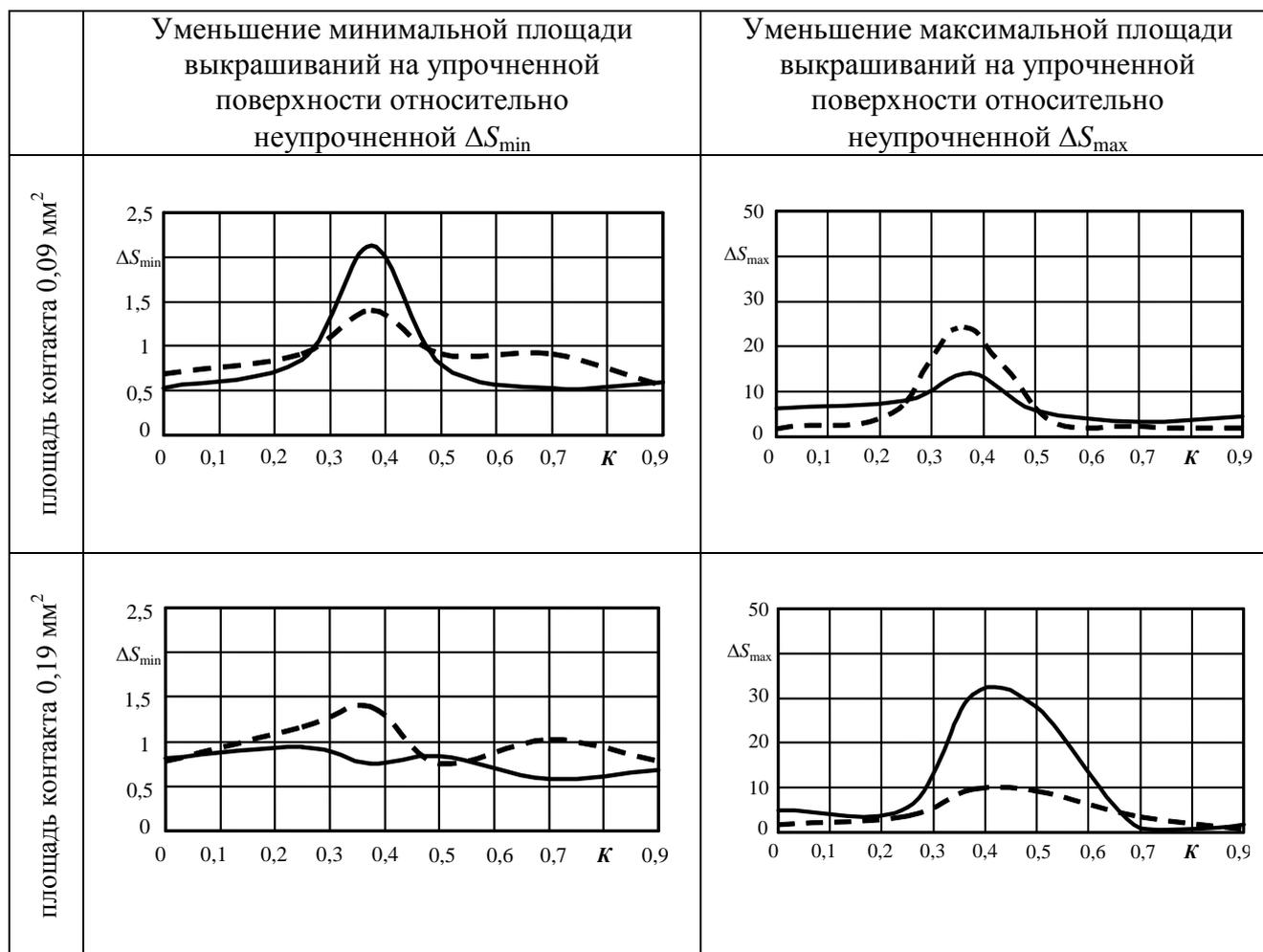
1. Одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных свойств деталей машин является создание упрочненного поверхностного слоя с гетерогенной структурой. Использование для этого способов ППД может быть достаточно эффективно, поскольку в наклепанном слое существует плавный переход от участков с повышенной твердостью к участкам с низкой исходной твердостью, который не будет являться концентратором напряжений, что благоприятно сказывается при действии контактных циклических нагрузок.

2. Одним из наиболее эффективных способов ППД, позволяющих достаточно точно регулировать параметры упрочненного поверхностного слоя, является статико-импульсная обработка. СИО может создавать глубину упрочнения до 10 мм и более, с практически равномерной или гетерогенной структурой.

3. Равномерность упрочнения целесообразно регулировать в соответствии со значениями коэффициента перекрытия  $K$ . Для обеспечения гетерогенно упрочненной структуры необходимо, чтобы режимы СИО обеспечивали  $K < 0,5$ .

4. Максимальное повышение контактной выносливости относительно неупрочненного металла до 3...6 раз наблюдалось при создании режимами СИО гетерогенной упрочненной структуры поверхностного слоя с коэффициентом перекрытия  $0,35 < K < 0,45$ .





Продолжение рисунка 2

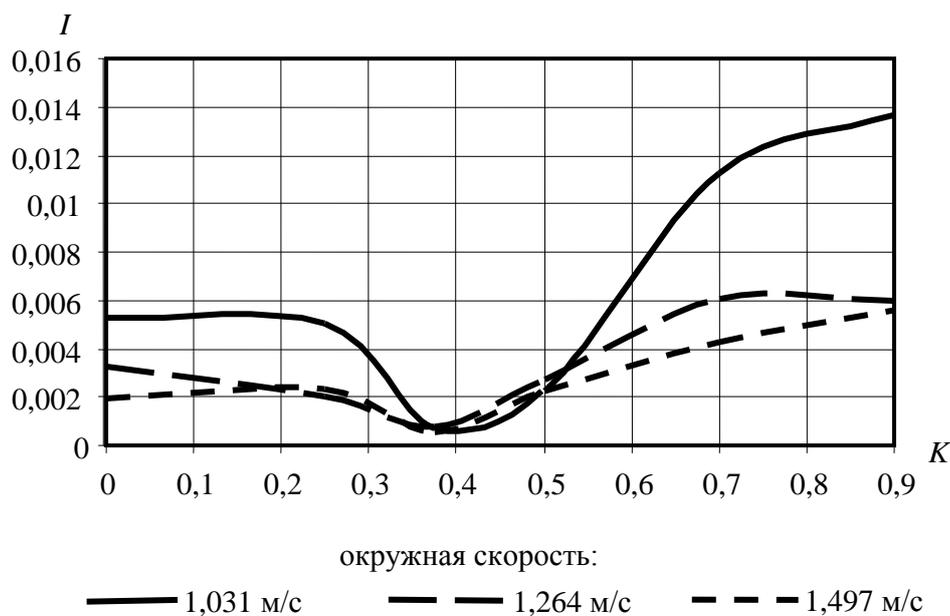


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности выкрашиваний  $I$  от коэффициента перекрытия  $K$  при различных окружных скоростях испытаний на контактную выносливость образцов, полученных при энергии удара 56 Дж и площади контакта 0,09 мм<sup>2</sup>

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек, А.В. Комплексное обеспечение качества несоосных винтовых механизмов и тяжело нагруженных резьбовых деталей [Текст]/ А.В. Киричек. – М.: ИЦ МГТУ СТАНКИН, 2002. – 242 с.
2. Аджиева, Т.Б. Определение параметров контактной усталости в поверхностно-упрочненных деталях [Текст]/ Т.Б. Аджиева, М.Н. Георгиев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – №7. – Т.72. – С.49-51.
3. **А.с. № 1782243.** Способ термической обработки изделий [Текст]/ А.П. Чейлях, Л.С. Малинов. – 1992.
4. **Пат. 2047661 Российская Федерация.** Способ обработки резьбового изделия [Текст]/ Аванесов В.С., Авербух Б.А., Ашигян Д.Г., Абубакиров А.В., Зейналов Р.Р., Гаджиев И.Ш., Прафененко С.Н., Будагов О.И. – 1995.
5. **Пат. 2219271 Российская Федерация.** Способ упрочнения сплава на основе железа [Текст]/ Дорофеев Г.А. – 2003.
6. Иванов, Г.П. Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макроструктуры [Текст]/ Г.П. Иванов, Л.В. Картонова, А.А. Худошин // Строительные и дорожные машины. – 1997. – № 1. – С. 33-34.
7. **Пат. 2090828 Российская Федерация.** Противопульная гетерогенная броня из легированной стали для средств индивидуальной защиты и способ ее получения [Текст]/ Кирель Л.А., Михайлова О.М., Журавлев С.А. – 1997.
8. Смелянский, В.М. Технологическое повышение износостойкости деталей методом электроэрозионного синтеза покрытий [Текст]/ В.М. Смелянский, В.А. Земсков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 1. – С. 27-35.
9. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога [Текст]/ А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
10. Киричек, А.В. Равномерность наклепа после статико-импульсной обработки [Текст]/ А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 8. – С. 3-5.
11. Головин, Г.Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке токами высокой частоты [Текст]/ Г.Ф. Головин. – Л.: Машиностроение, 1973. – 144 с.

**Киричек Андрей Викторович**

Технологический институт Орловского государственного технического университета, г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор  
 Тел. 8(4862) 55-55-24  
 E-mail: [ti@ostu.ru](mailto:ti@ostu.ru)

**Соловьев Дмитрий Львович**

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, г. Муром  
 Доктор технических наук, профессор  
 Тел. (49234) 3-20-22, fax. (49234) 2-28-85  
 E-mail: [murstin@yandex.ru](mailto:murstin@yandex.ru)

**Баринов Сергей Владимирович**

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, аспирант, г. Муром  
 Тел. (49234) 3-20-22, fax. (49234) 2-28-85  
 E-mail: [murstin@yandex.ru](mailto:murstin@yandex.ru)

**Силантьев Сергей Александрович**

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, г. Муром  
 Кандидат технических наук, старший преподаватель  
 Тел. (49234) 3-20-22, fax. (49234) 2-28-85  
 E-mail: [murstin@yandex.ru](mailto:murstin@yandex.ru)

УДК 621.09.042

**В.П. СМОЛЕНЦЕВ, А.В. ГРЕБЕНЩИКОВ, М.А. УВАРОВ**

## **ИМПУЛЬСНО-ВИБРАЦИОННАЯ ОЧИСТКА ДЕТАЛЕЙ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ**

*Разработан новый метод эффективной очистки от загрязнений литых ажурных заготовок и тары многократного использования. Показана область рационального использования предложенного метода и технико-экономические характеристики процесса. Приведены сведения по проектированию технологического процесса, обеспечивающего высокую степень очистки изделий и гарантирующего сохранность литых заготовок и тары многократного применения.*

*The new method of the effective cleaning from the dirtying of openwork castings and returnable packages is devised. The field of rational usage of the given method and technical-economic specifications of the process are shown. The facts concerning the projecting of the technological process ensuring high degree of articles' cleaning and guaranteeing safety of castings and returnable packages are given.*

После литья деталей требуется удалить с поверхности остатки формовочных смесей, керамических форм и других загрязнений. Аналогичные проблемы возникают при очистке тары многократного применения, где после удаления грузов остаются участки с толстослойным покрытием из перевозимого материала. Механическая очистка деталей и тары весьма трудоемка, опасна для здоровья исполнителей, а промывка не всегда дает ожидаемый эффект полного удаления загрязнений. Особенно сложно удалить покрытия из керамики с внутренних поверхностей ажурных литых деталей, где излишние ударные силы вызывают повреждение и поломку изделий. Авторы предложили применить для очистки литых заготовок и тары, используемой для перевозки сыпучих смесей внутри предприятия, импульсно-вибрационный способ и устройства, на что получены патенты Российской Федерации (рисунок 1).

В предложенном способе используется электромагнитное воздействие [1], возникающее в момент резкого нарастания и падения напряжения. В результате в катушке 4 (а) формируется электромагнитное поле, выталкивающее боек 3 (рисунок 1,а) в сторону стенки 12 объекта 1 очистки с загрязняющим покрытием 2.

Объект 1 может иметь усиления (13), что сильно изменяет условия протекания процесса очистки деталей. Боек 3 может совершать в направляющем отверстии корпуса 11 возвратно-поступательные движения (9) под действием упругого элемента (пружины) 5, в пределах зазора 6 между торцом бойка 3 и стенкой 12 объекта 1.

Сигнал об амплитуде колебаний стенки 12 поступает в блок управления 10 частоты, а оттуда – в систему управления 8 режимом (главным образом, путем изменения емкости конденсаторов  $C$  (7 на рисунке 1 а)). Силу удара бойка 3 рассчитывают таким образом, чтобы обеспечить максимальный прогиб стенки 12, но не превысить предел пластичности материала объекта 1. По мере перемещения бойка 3 относительно стенки 12 изменяются условия обработки (изменение толщины стенки, наличие элементов жесткости и др.), что влияет на частоту колебаний стенки 12 после воздействия бойка. Это может снижать амплитуду колебаний и ухудшать эффективность очистки. Наилучшие результаты получены при резонансных и околорезонансных режимах, когда собственные частоты совпадают с наводимыми за счет внешних воздействий. Блок 10 постоянно контролирует частоту импульсов бойка 3 и передает информацию в систему управления 8 и исполнительные элементы (катушка 4, генератор 7, 14).

На базе предложенного способа (рисунок 1,а) создана установка (рисунок 1,б), где катушка 1 индуктора воздействует на боек 2, установленный в корпусе 13 с зазором 11, относительно объекта 8 со стенкой 12 с загрязняющим покрытием 9 и элементом жесткости

10. Возврат бойка 2 осуществляется пружиной 3, в направлении его оси 13. Блоки управления частотой (6) и режимом (7) аналогичны приведенным на рисунке 1, б. Генератор RC-схемы (4;5 на рисунке 1,б) может работать в широком диапазоне частот с регулировкой режимов за счет изменения напряжения и емкости конденсаторов.

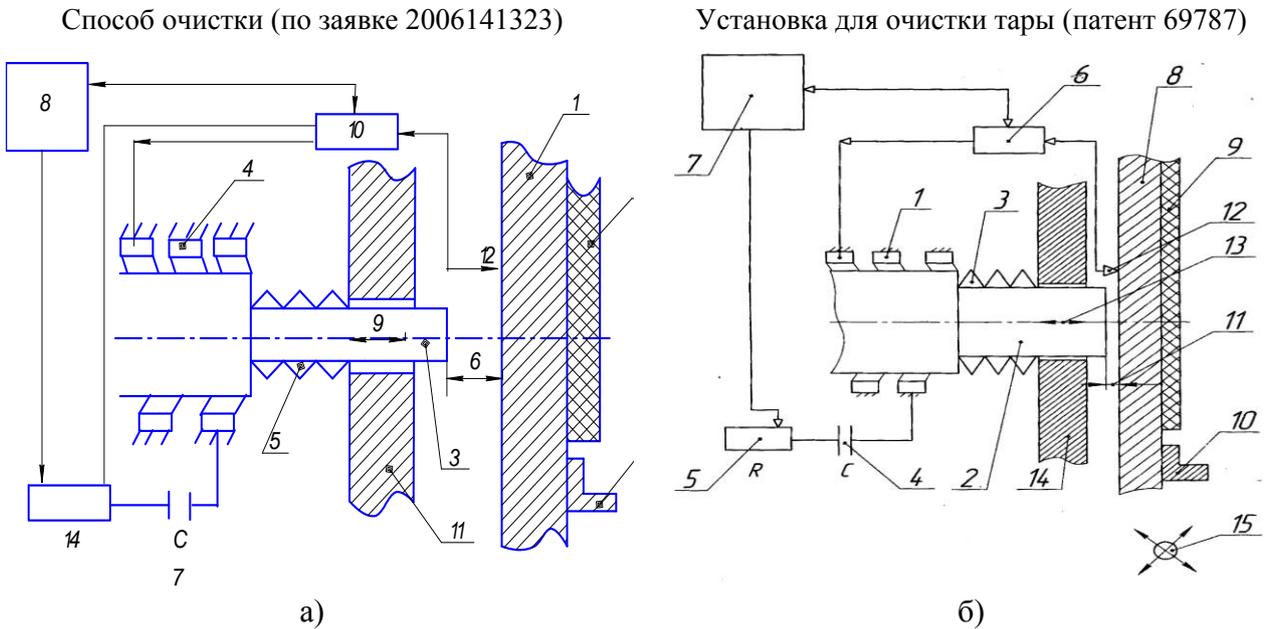


Рисунок 1 – Новые технические решения (патенты)

В результате исследования процесса на установке получены рабочие режимы, обеспечивающие наиболее эффективную очистку объектов в резонансном режиме:

емкость конденсаторов МФ	– 500-2000;
напряжение, КВ	– более 1;
отклонение частоты от резонансной	– не более $\pm 1\%$ ;
количество воздействий бойка на каждый участок стенки	– от 1 до 10;
зазор между бойком и стенкой объекта, мм	– 0,5-2;
режим работы	– автоматический.

Выбор емкости конденсаторов выполняется в зависимости от величины тока при резонансном режиме (рисунок 2) в пределах рабочего диапазона изменения тока.

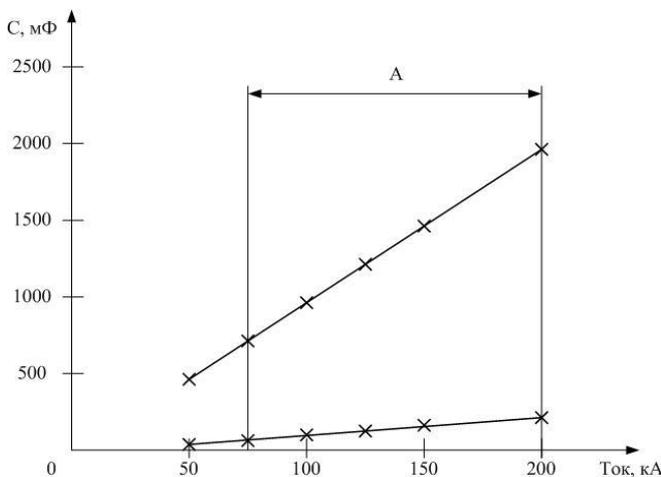


Рисунок 2 – Выбор емкости конденсаторов:

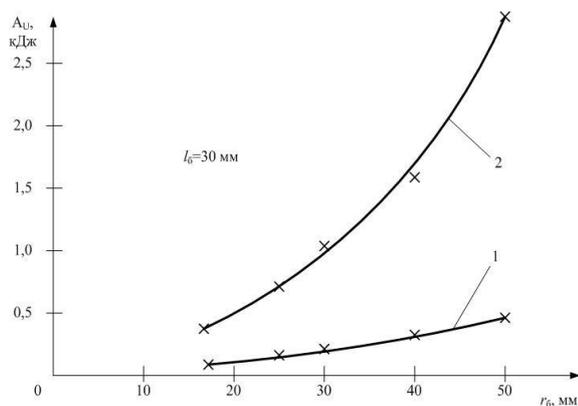
1 – минимальные значения; 2 – наибольшие допустимые значения; А – рабочий диапазон величины тока

Ограничением служит предельный ток, при котором сила удара бойка создает давление, превышающее их значения в конце цикла упругой деформации материала объекта обработки.

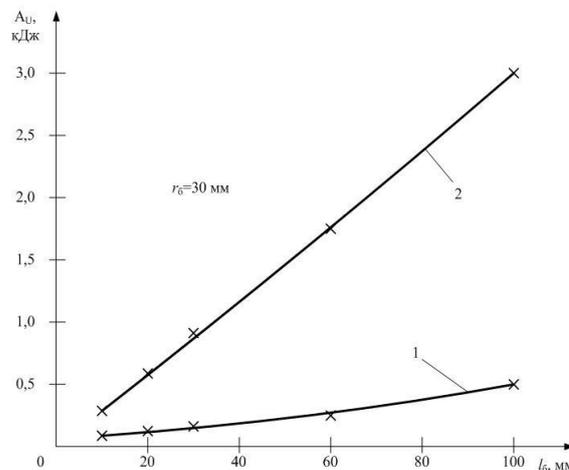
Для расчета размеров бойка необходимо знать предельную энергию импульса, допустимую при очистке изделий без нарушения геометрии стенки объекта обработки. На рисунках 3,4 приведены зависимости для нахождения радиуса или длины бойка по энергии импульса, которую можно установить при известных напряжениях и емкости конденсаторов или среднего тока на индукторе.

При этом один из размеров (диаметр или длина) выбираются конструктивно (например, по предельному диаметру отверстия в корпусе установки). Рабочий диапазон изменения энергии импульсов (рисунки 3, 4) ограничены кривыми 1; 2.

Процесс импульсно-вибрационной очистки наиболее эффективен для объектов из листа или для деталей с тонкой стенкой без силовых элементов на границах стенок и, особенно на участках, с которых требуется удалить загрязняющее покрытие [2].



**Рисунок 3** – Энергия импульса в зависимости от размеров бойка для различных  $r_b$  при  $l_b=30$  мм; 1 – минимальная энергия импульса (при  $V_b=100$  м/с); 2 – максимальная энергия импульса



**Рисунок 4** – Энергия импульса в зависимости от размеров бойка для различных  $r_b$  при  $l_b=30$  м; 1 – минимальная энергия импульса (при  $V_b=100$  м/с); 2 – максимальная энергия импульса

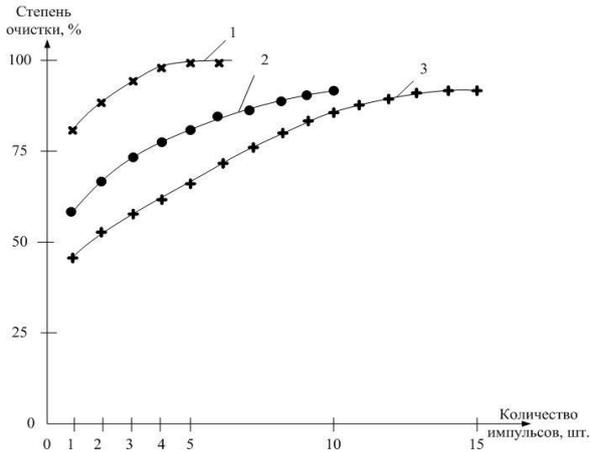
Отдельные элементы очищаемых объектов не поддаются колебаниям из-за высокой жесткости конструкции, и удаление загрязнений с поверхности таких участков возможно другими методами (механическим, травление и др.). Опыт использования импульсно-вибрационного метода показал, что оставшиеся после обработки неочищенные участки для большинства объектов составляют не более 5% общей площади, что не служит ограничением для передачи заготовок в механообрабатывающие цеха или возврата тары для повторного использования. На рисунке 5 приведены зависимости для назначения количества импульсов бойка при очистке литья с толщиной стенки 3 мм от керамического слоя загрязнения.

Обычно назначают 3-5 импульсов, т.к. на первых импульсах адаптивная система установок для очистки уточняет частоту колебаний стенки объекта обработки и назначает режим вибрации, близкий к резонансному (следовательно, наиболее эффективному для очистки).

Обычно после этого достаточно 1-2 импульса для получения заданной степени очистки поверхности объекта. Если конструкция детали или тары достаточно простая (например, в форме коробки без элементов жесткости), то при первом же импульсе (как правило, не отвечающем условиям резонанса) может осыпаться все покрытие, и деталь пригодна для дальнейшего использования. На рисунке 5 это достигнуто после 3-4 импульсов (зависимость 1), т.е. после выхода установки на резонансный режим работы. Частота следования импульсов при очистке деталей составляет 0,2-1 Гц, т.е. время обработки участка стенки тары или литой детали не превышает 20 секунд.

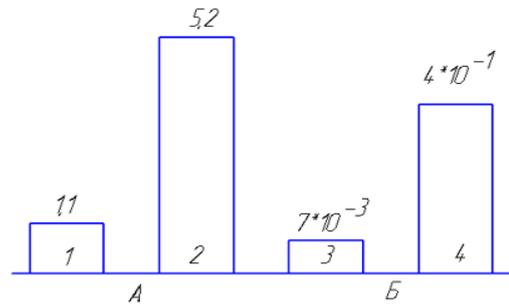
Для очищаемых участков с элементами жесткости (в виде ребер, усилений, накладок и др.) трудоемкость процесса возрастает в 1,5-2 раза, но это существенно меньше по сравнению с другими способами, используемыми для таких целей (особенно в сравнении с методом ручного ударного воздействия, которое часто приводит к деформации детали или тары).

На рисунке 6 приведена энергоемкость процесса импульсно-вибрационного удаления покрытий с листовых деталей с толщиной стенки 2-5 мм.



**Рисунок 5** – Степень очистки тары от загрязнений (формовочной смеси):

1 – участок без элементов жесткости; 2 – участок вблизи мест стыковки стенок тары; 3 – в местах вблизи ребер жесткости (уголки 45x45 мм)



**Рисунок 6** – Мощность индуктора (А), кВт и расход энергии (Б), кАч/м² для удаления толстослойных поверхностей с 1 м² поверхности обечайки:

1; 3 – нижнее значение; 2; 4 – верхняя граница

Мощность импульса индуктора рассчитывается для конкретной конструкции обрабатываемой детали или стенки тары с учетом материала объекта обработки. Диапазон изменения мощности индуктора (рисунок 6, А) составляет от 1,1 до 5,2 кВт. Это характеризует энергопотребление и возможность использования установки для очистки при наличии штатной электропроводки [3]. Расход энергии на операцию очистки 1 м² поверхности зависит от принятой (рисунок 5) степени очистки. Если заказчик допускает такой показатель на уровне 0,9-0,95, то расход энергии (рисунок 6, Б) не будет превышать 0,1 кАч/м².

В таблице 1 показана эффективность использования различных видов очистки применительно к точному литью по выплавляемым моделям. Даже без учета вредных факторов, сопровождающих процесс очистки (вибрации, запыленность, шум, применение токсичных сред и др.), магнитоимпульсная вибрационная обработка с дистанционным управлением процессом позволяет удалять загрязнения с широкой номенклатуры деталей (и не только литья) с высокой эффективностью и низким энергопотреблением.

**Таблица 1** – Анализ технико-экономических показателей очистки литья

Способ очистки	Основной вид производства	Характеристика очищаемой поверхности	Трудоемкость очистки 1 м², час	Удельный расход энергии, кВт час / м²
1	2	3	4	5
Ручной (с малой механизацией)	Единичное	Все виды поверхностей и покрытий	0,2-1,0	0,1-0,5
Вибрационный:				
– на решетках	Серийное	Наружные покрытия со слабой адгезией	0,2-0,3	0,1-0,5
– гранулами	Серийное	Наружные и внутренние покрытия со слабой адгезией	0,3-0,5	0,2-0,3
– виброгалтовка	Серийное массовое	Наружные с прочной адгезией покрытий	0,2-0,3	0,1-0,2

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Дробеструйная	Единичное и серийное	Наружные и внутренние поверхности с прочной адгезией покрытий	0,1-0,5	0,2-0,5
Крацевание металлическими щетками	Единичное и мелкосерийное	В основном, наружные с прочной адгезией покрытий	0,2-0,3	0,1-0,3
Промывка под давлением: – холодной  – горячей жидкостью – паром	Единичное и мелкосерийное	Любые поверхности. Адгезия покрытия слабая	0,2-1,0	0,1-0,3
		Любые поверхности. Адгезия покрытия средняя	0,1-0,3	0,5-1,0
		Любые поверхности. Адгезия средняя	0,1-0,2	1-2
Химическое травление	Единичное и мелкосерийное	Любые поверхности. Адгезия высокая	0,3-2,0	0,2-0,5
Магнито-импульсная обработка	Серийное	Нежесткие поверхности. Адгезия средняя	0,015-0,05	0,01-0,1

Аналогичные результаты получены при очистке тары для многократного использования при перевозке формовочной смеси (таблица 2).

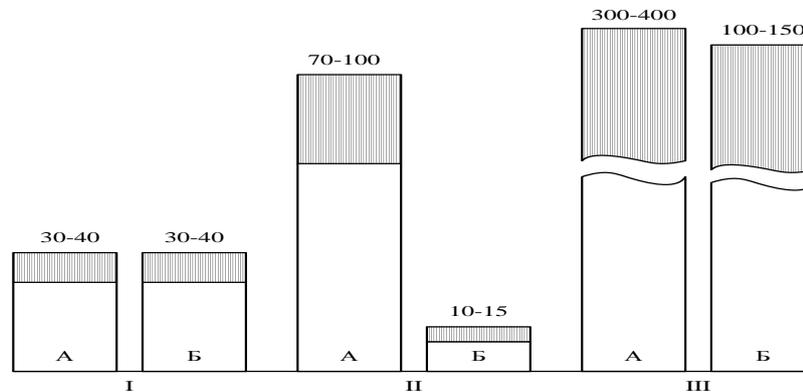
Таблица 2 – Варианты и эффективность очистки тары для перевозки грузов

Способы очистки	Виды тары	Виды загрязнения	Трудоемкость очистки 1 м <sup>2</sup> , час	Удельный расход энергии кВт час м <sup>2</sup>	Примечание
1	2	3	4	5	6
Ручной (с малой механизацией)	Любая тара	Все виды загрязнений	0,2-1,0	0,1-0,5	Единичные поставки
Разрыхление покрытий	Открытая тара	Сыпучие и хрупкие материалы	0,4-0,5	0,5-2,0	Используется инструмент для бурения
Крацевание металлическими щетками: – вручную – механически	Небольшие емкости Вагоны, контейнеры, ящики и др.	Все виды загрязнений	0,1-0,5	0,1-0,3	Возможно использование ручного инструмента Возможно совмещение с промывкой
		Все виды загрязнений	0,1-0,3	0,1-0,5	
Промывка под давлением жидкости: – холодной водой – водно-паровой средой	Любая тара	Покрyтия со слабой адгезией	0,1-0,3	0,1-0,3	Используют при положительной температуре воздуха и очистке воды после использования Операция должна быть автоматизирована
		Покрyтия с высокой адгезией	0,2-0,5	1,0 -2,0	
Магнито-импульсная вибрационная обработка	Тара из листа	Покрyтия со средней адгезией	0,05-0,2	0,03-0,2	Возможны остаточные загрязнения с площадью до 5% от общей площади очистки

В таблице 2, как и в таблице 1, заметные преимущества имеет магнитоимпульсная обработка с сопутствующей вибрацией стенки. Имеются основания утверждать, что разработанный способ и устройства являются новыми (имеются патенты РФ) и работы в таком направлении могут значительно расширить технологические возможности вибрационной техники.

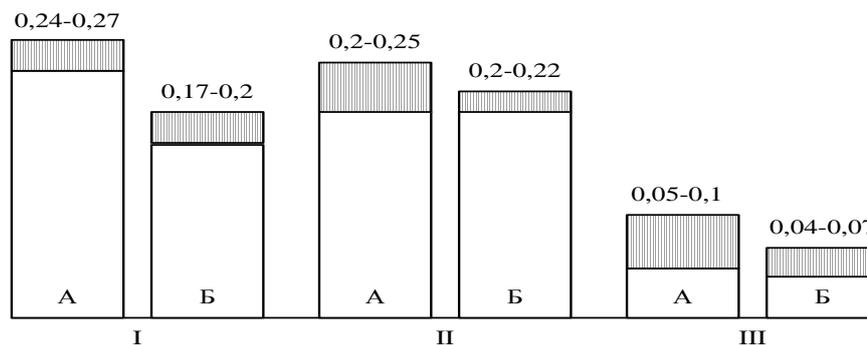
Необходимым условием для использования в авиационной и космической отрасли любого нового технологического процесса является оценка его влияния на качество поверхностного слоя деталей, что определяет их эксплуатационные показатели. На рисунках 7 и 8 показаны характеристики поверхностных слоев изделий после импульсно-вибрационных воздействий (остаточные напряжения и глубина их залегания). В качестве базовых образцов на рисунке 7 выбирались шлифованные пластины из сталей 45, 40 ХНМА, алюминиевый и титановый лист толщиной 3 мм. На рисунке 8 приведены исследования тех же исходных образцов, упрочненных по стандартной методике виброударным методом. Во всех случаях (рисунки 7 и 8) в поверхностном слое наблюдались сжимающие напряжения, которые, как правило, положительно влияют на эксплуатационные характеристики изделий.

Свойства слоя для сталей (рисунки 7 и 8) после очистки изменяются незначительно. Величина остаточных напряжений сохраняется одинаковой, а глубина их залегания незначительно снижается.



**Рисунок 7** – Остаточные напряжения в поверхностном слое, МПа

*A* – исходное состояние; *Б* – после электромагнитной импульсной обработки  
 I – конструкционная сталь; II – алюминиевый сплав (дюраль); III – титановый сплав



**Рисунок 8** – Глубина залегания остаточных напряжений одного знака, мм

*I* – конструкционная сталь; *II* – алюминиевый сплав; *III* – титановый сплав; *A* – лист, упрочненный виброударным методом; *Б* – образцы после импульсной обработки бойком от электромагнитной установки

В случае алюминиевых сплавов проявляется наклеп листа при прокатке (рисунок 7), который в процессе импульсных и вибрационных колебаний перераспределяется вглубь образца и предельный уровень напряжений значительно снижается, хотя глубина их

залегания изменяется незначительно (рисунок 8). Аналогичные результаты получены для титановых сплавов.

Таким образом, импульсно-вибрационный метод очистки применим для использования в различных отраслях машиностроения, а его эффективность способствует широкому внедрению процесса на предприятиях.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов [Текст]/ под ред. В.П. Смоленцева. – В 2 т. – Т.2. – М.: Высшая школа, 1983. – 208 с.
2. Гребенщиков, А.В. Очистка изделий от загрязнений импульсным воздействием [Текст]/ А.В. Гребенщиков, В.П. Смоленцев // Упрочняющие технологии и покрытия, 2008. – №9. – С. 53-56.
3. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки [Текст]/ Е.В. Смоленцев. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.

**Смоленцев В. П.**

Воронежский механический завод (ВМЗ), г. Воронеж  
Доктор технических наук, профессор, научный руководитель

**Гребенщиков А.В.**

Главный конструктор проекта ФГУП «Турбонасос», г. Воронеж

**Уваров М.А.**

Воронежский механический завод, г. Воронеж  
инженер

УДК 674.059:674.821

В.Н. ХРОМОВ, И.С. КУЗНЕЦОВ, А.С. ПЕТРАШОВ

## УПРОЧНЕНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ПРОТИВОРЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ПАЛЬЦЕВ РЕЖУЩЕГО АППАРАТА ЖАТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

*В статье описывается сущность процесса электроискровой обработки (ЭИО), приводятся результаты металлографических исследований и результаты эксплуатационных испытаний упрочненных противорежущих пластин пальцев режущего аппарата жатки комбайна ДОН-1500.*

*The essence of process of electrospark processing (ESD) is described, results of researches of a microstructure and results of operational tests of the strengthened cutting plates of fingers of the cutting device of a harvester of a combine DON - 1500 are resulted.*

Одна из проблем отечественного машиностроения, из-за которой отечественные машины и оборудование уступают западным аналогам, – это проблема износостойкости рабочих поверхностей деталей. Для преодоления этой проблемы необходимо внедрение на производстве новых высокоэффективных технологий поверхностной обработки изделий, которые изменяют физико-механические свойства поверхности и не приводят к накоплению различных внутренних дефектов в изделиях в процессе изготовления и эксплуатации.

Внедрение таких технологий позволит значительно повысить ресурс, в некоторых случаях может повысить производительность и режущую способность деталей и узлов.

К таким технологиям относится и электроискровая обработка (ЭИО). Способ электроискровой обработки металлов, разработанный Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [1], основан на явлении электрической эрозии материалов при искровом разряде в газовой среде (преимущественно на воздухе), полярного переноса продуктов эрозии на катод (деталь). На поверхности катода под действием значительных тепловых нагрузок происходят микрометаллургические и сопутствующие им процессы (термомеханические, гидродинамические, диффузионные), осуществляющие перемешивание материала катода и анода при взаимодействии с компонентами газовой среды, что способствует образованию высокой адгезии между основой и формируемым слоем. Поэтому электроискровую обработку следует считать методом создания новых композиционных материалов. В первую очередь это относится к тугоплавким покрытиям, наиболее существенно и принципиально изменяющим свойства верхнего слоя материала [3]. Величина этих изменений определяется составом, структурой, свойствами материала электрода и технологическими параметрами процесса ЭИО.



**Рисунок 1** – Пластины противорежущие упрочненные электроискровой обработкой

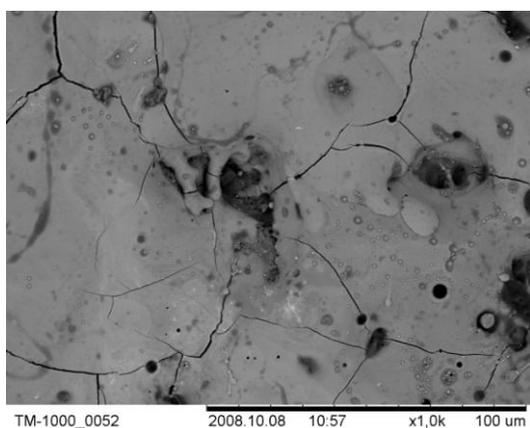


**Рисунок 2** – Сканирующий электронный микроскоп HITACHI TM 1000

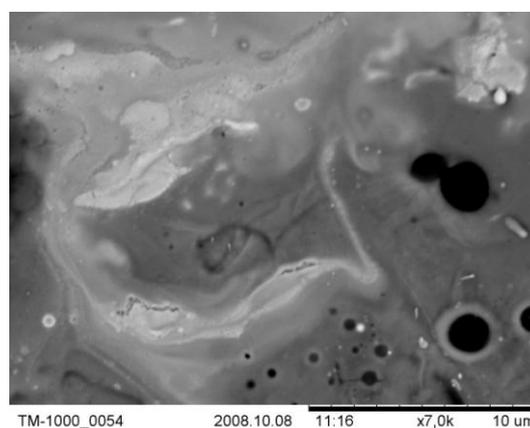
Установкой ЭИО UR-121 на противорезущие пластины пальцев ножа жатки комбайна ДОН-1500 был нанесен слой вольфрамо-кобальтового композита электро-дом ВК6.

Слой наносился в два прохода на жестком и мягком режиме работы установки. Фото упрочненных образцов представлено на рисунке 1.

Хотя действие искрового разряда очень кратковременно, в процессе электроискровой обработки имеет место не только направленный перенос материала на подложку, но и активное перемещение атомов перенесенного материала в поверхностный слой подложки, сопровождающееся химическим взаимодействием материалов электродов. Также отличие состава нанесенного покрытия от состава исходных электродных материалов обуславливается контактом расплавленного материала анода с элементами межэлектродной среды, возможностью термической диссоциации и разложения материала анода с последующим изменением химического состава, а также взаимодействием электродных материалов в процессе совместной кристаллизации с образованием новых химических соединений. Фазовыми составляющими структуры слоя после электроискровой обработки в основном являются: аустенит (реже феррит), нитриды, карбиды, карбонитриды и закалочные структуры (мартенсит, сорбит, тростит) [4]. Металлографические исследования покрытия, проведенные на микроскопе НІТАСНІ ТМ-1000 (рисунок 2), показали, что основными фазовыми составляющими структуры являются мартенсит и тростит (рисунок 3).

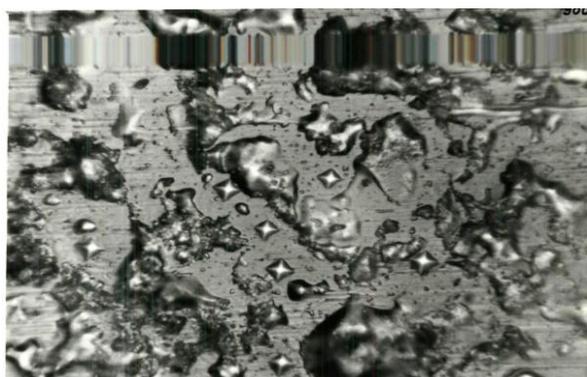


×1000



×10000

**Рисунок 3 – Структура покрытия**



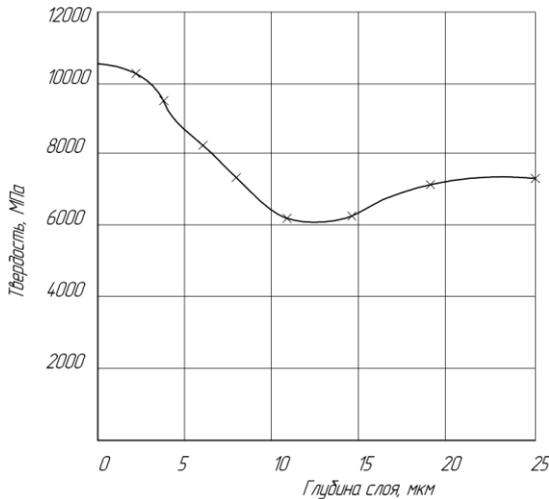
**Рисунок 4 – Измерение микротвердости покрытия при вдавливании пирамидки перпендикулярно слою (увеличение в 600 раз)**

Как видно и рисунка 3, после обработки одного и того же участка в два прохода – сначала на грубом режиме, потом на мягком – на поверхности наблюдались сетки микротрещин и следы выращивания; дальнейшее увеличение числа проходов приводит к разрушению различных участков. И поэтому оптимальное количество проходов, при котором образуется слой наибольшей толщины и не происходят сколы основы и появления микрораковен и язв, равно двум. Замеры микротвердости осуществлялись на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,49 Н (50 г) с учетом требований ГОСТ 9450-76, на длине покрытия не менее 15 мм.

Из результатов проведенных исследований физико-механических свойств покрытий и их анализа следует:

1. Микротвердость покрытий существенно зависит от режимов нанесения и материала легирующего электрода. Наиболее высокой микротвердостью обладают покрытия, легированные боридами титана TiB<sub>2</sub> (16000 МПа) и карбидами вольфрама WC (12000 МПа);

последний является основным компонентом твердых сплавов группы ВК. При использовании серийных электродов из ВК6-М микротвердость покрытий на «чистовых» режимах составляет 8000-9000 МПа, на получистовых – 9000-10500 МПа, на грубых – 10500-12000 МПа.



**Рисунок 5** – Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя

2. При нанесении покрытий на закаленные стали поверхностный слой имеет две зоны: белый слой, имеющий высокую микротвердость, и зону термического влияния, микротвердость которой ниже твердости основы, а глубина не превышает толщины белого слоя. Покрытия обладают прочной связью с основой.

3. Структура белого слоя состоит из мартенсита и аустенита, а в состав его входят элементы легирующего электрода. Содержание аустенита и легирующих элементов возрастает с увеличением энергии и силы тока импульса искрового разряда, а также удельной длительности обработки.

4. Остаточные напряжения в покрытиях носят растягивающий характер и невелики по значению. При нанесении покрытий серийными электродами из ВК6-М микротрещин от остаточных напряжений в поверхностных слоях не обнаружено на всех режимах.



а



б

**Рисунок 6** – Противорежущая пластина жатки зерноуборочного комбайна после наработки 95 га: а) упрочненная, б) неупрочненная

Для проведения исследований характера износа упрочненных противорежущих пластин с жатки снят палец 3 с противорежущими пластинами 5 и 6 (таблица 1).

**Таблица 1** – Результаты измерения пластин, прошедших испытания

№ образца и контрольного образца		Толщина пластины в каждой из точек измерения, мм		
		1-я точка	2-я точка	3-я точка
Палец 1, образец упрочненный наработка 394 га	1-я противорежущая пластина	2,6	2,6	2,6
	2-я противорежущая пластина	2,5	2,6	2,8
Палец 2, образец упрочненный наработка 394 га	3-я противорежущая пластина	2,6	2,7	2,7
	4-я противорежущая пластина	2,6	2,7	2,6
Палец 3, образец упрочненный наработка 394 га	5-я противорежущая пластина	2,5	2,5	2,8
	6-я противорежущая пластина	2,6	2,6	2,5
Палец 4, неупрочненный образец, наработка 394 га	7-я противорежущая пластина	2,2	2,3	2,4
	8-я противорежущая пластина	2,0	2,3	2,5
Палец 5, неупрочненный образец наработка 305 га	9-я противорежущая пластина	2,2	2,2	2,2
	10-я противорежущая пластина	2,0	2,2	2,2



*Рисунок 7 – Упрочненная (внизу) и неупрочненная (сверху) пластины после эксплуатационных испытаний*

Толщина упрочненной противорежущей пластины после наработки №8 около 400 га превышает толщину неупрочненной пластины, кроме того, присутствуют дефекты на неупрочненной пластине (рисунок 7).

#### **ВЫВОДЫ**

1. Использование данной технологии может на 200% повысить величину средней режущей способности ножей жатки, тем самым повысить фактическую производительность машины на влажных и полеглых хлебах.

2. Электроискровые покрытия позволяют создать композицию, в которой покрытие, принимая на себя основную часть функции изделия (износо- и коррозионную стойкость, контактную прочность), снижает требования к материалу подложки.

3. Электроискровые покрытия, нанесенные на противорежущие пластины пальцев, повышают режущую способность режущего аппарата.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Лазаренко, Б.Р. Электрическая эрозия металлов [Текст]/ Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко. – Выпуск 1. – М.: Гостехиздат, 1944. – 28 с.
2. Машины для локального электроискрового нанесения покрытий «Е1ФА» [Текст]: проспект. – София: Машиноэкспорт, 1981. – 7 с.
3. Шемегон, В.И. Электроискровое легирование лезвийного и штампового инструмента [Текст]/ В.И. Шемегон, М.В. Жук. – Машиностроитель, 1989. – № 9. – С. 21-22.
4. Хромов, В.Н. Формирование и физико-химические свойства поверхностного слоя деталей машин, полученного электроискровой обработкой [Текст]/ В.Н. Хромов, И.С. Кузнецов, А.С. Петрашов // Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции, 2008. – Т. 13. – С. 128-129.

##### **Хромов Василий Николаевич**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Надежность и ремонт машин», г. Орел  
Тел.: +7(4862) 43-07-41  
E-mail: [chrom@orel.ru](mailto:chrom@orel.ru)

##### **Кузнецов Иван Сергеевич**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел  
Аспирант, зав. лабораторией кафедры «Надежность и ремонт машин»  
Тел.: +7(910)2026459  
E-mail: [Ivan-654@yandex.ru](mailto:Ivan-654@yandex.ru)

##### **Петрашов Алексей Сергеевич**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел  
Аспирант, инженер кафедры «Надежность и ремонт машин»  
Тел.: +7(905)1670082  
E-mail: [petrashoff@rambler.ru](mailto:petrashoff@rambler.ru)

УДК:621.9

А.В. КАТУНИН

**УМЕНЬШЕНИЕ ВИБРАЦИЙ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ ТОЧЕНИИ**

*В статье приводится описание устройства для уменьшения амплитуды и длительности колебаний инструмента при прерывистом точении, а также данные, подтверждающие его эффективность*

*In the article the description of the device's work for decreasing of an amplitude and duration of tool's oscillation by intermittent turning and facts proving its efficiency are given.*

Одной из основных причин снижения стойкости и прочности инструментов, работающих в условиях прерывистого резания, является ударный характер первоначального контакта инструмента с заготовкой, обуславливающий появление послеударных вибраций, сопровождающихся постоянным изменением действующих сил, углов, а также увеличением пути резания, проходимого вершиной инструмента.

Для повышения эффективности прерывистого резания в работе [1] предложен способ снижения амплитуды послеударных вибраций. Суть способа заключается в предварительном (до момента касания с заготовкой) управляемом импульсном силовом воздействии на инструмент, предопределяющем значительное уменьшение амплитуды и длительности его колебаний в процессе последующего резания. При этом необходимо обеспечить определенное смещение во времени между моментом начала управляемого импульсного силового воздействия на инструмент и моментом его касания с заготовкой при врезании, а также необходимые форму и длительность воздействующего импульса.

Предложенный способ снижения вибраций предполагает использование мощных и высокоточных генераторов силовых импульсов (пульсаторов), которые можно разделить по способу силовозбуждения на механические, гидравлические, пневматические и электрические. Последние могут быть электростатическими, электродинамическими и магнитострикционными.

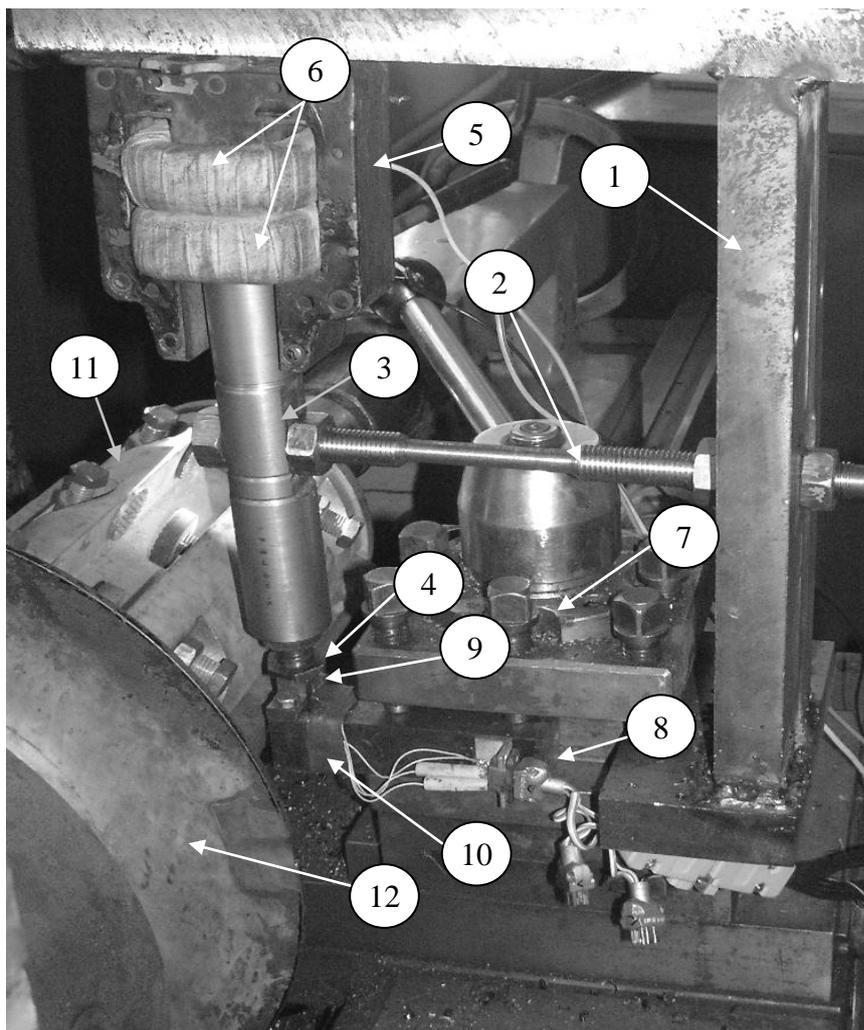
В силу ряда особенностей электродинамические пульсаторы наилучшим образом соответствуют условиям указанного способа. Принцип действия этих устройств основан на преобразовании электрической энергии в механические перемещения. Использование пульсаторов этого типа в совокупности с современными системами управления обеспечивает хорошую управляемость характером нагружения и высокую точность воспроизведения силовых импульсов в заданные моменты времени.

Для реализации описанного способа уменьшения вибраций при прерывистом точении разработаны устройство, система управления и программное обеспечение.

На рисунке 1 представлено устройство для снижения вибраций при прерывистом точении. Основание устройства 1 крепится на суппорте токарного станка. На упругом стержне 2, жестко соединенном с основанием 1, крепится ударник 3. На основании 1 также крепится электромагнит 5. При подаче напряжения на обмотки электромагнита 6, ударник 3 перемещается в сторону электромагнита, а при снятии напряжения – в сторону резца 8. Закаленный болт 4 ударника предназначен для регулировки зазора между резцом и ударником. Ударник 3 и контактная часть резца 9 для упрочнения также подвергаются закалке. Упругий стержень 2 изготавливается из материалов с низкой демпфирующей способностью (например, из титанового сплава). Синхродиск 12 предназначен для согласования момента удара по инструменту с положением приспособления для крепления обрабатываемых пластин 11. Тензометрические датчики 10 служат для снятия сигналов деформации консольной части резца 3.

Схема системы управления устройством для снижения вибраций при точении

показана на рисунке 2.

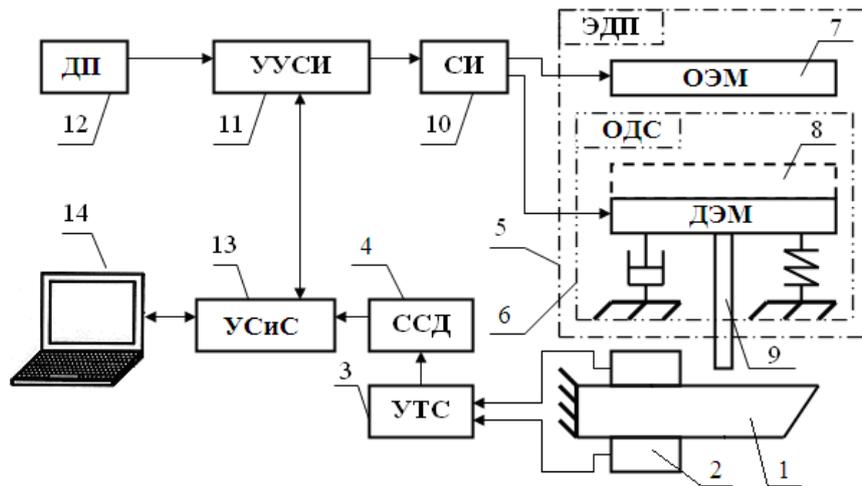


**Рисунок 1** – Устройство для снижения вибраций при прерывистом точении:

1 – основание устройства; 2 – упругий стержень; 3 – ударник; 4 – наконечник; 5 – электромагнит;  
6 – обмотки электромагнита; 7 – резцедержатель; 8 – резец; 9 – контактная часть резца;  
10 – тензометрические датчики; 11 – приспособление для реализации прерывистого точения; 12 – синхродиск

Управление устройством осуществляется посредством специально разработанной программы для персонального компьютера (ПК) 14. Через устройство синхронизации и согласования (УСиС) 13 происходит синхронный обмен данными между ПК и остальными элементами схемы. Усилитель тензометрических сигналов (УТС) 3 предназначен для масштабирования сигналов, поступающих с тензометрических датчиков 2, расположенных на инструменте 1. Система сбора данных (ССД) 4 предназначена для преобразования сигналов, поступающих с УТС в цифровую форму, последующего хранения и передачи их в ПК. Устройство управления силовыми инверторами (УУСИ) 11 служит для формирования сигналов управления электромагнитами 7 и 8 электродинамического пульсатора 5. Силовые инверторы (СИ) 10 усиливают сигналы, сформированные УУСИ. Датчик положения (ДП) инструмента 12 тактирует УУСИ.

В управляющей программе предусмотрен режим автоматической тарировки устройства. В этом режиме на выводы электромагнитов 7 и 8 подается переменное напряжение, частота которого равна собственной частоте одномассовой динамической системы (ОДС) 6, после чего ударник 9 электродинамического пульсатора (ЭДП) 5 начинает совершать колебания.



**Рисунок 2** – Схема системы управления устройством для снижения вибраций при точении:

1 – инструмент; 2 – тензометрические датчики; 3 – усилитель тензометрических сигналов; 4 – система сбора данных; 5 – электродинамический пульсатор; 6 – одномассовая динамическая система; 7 – основной электромагнит; 8 – дополнительный электромагнит; 9 – ударник; 10 – силовые инверторы; 11 – устройство управления силовыми инверторами; 12 – датчик положения реза относительно заготовки; 13 – устройство синхронизации и согласования; 14 – персональный компьютер

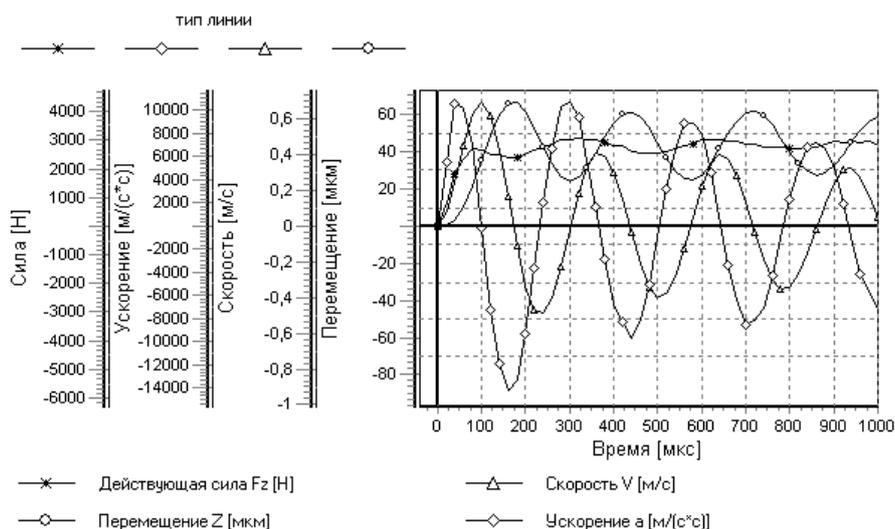
Амплитуда генерируемого напряжения увеличивается до появления первых соударений с резцом. При этом системой сбора данных регистрируется величина деформации инструмента. Затем амплитуда подаваемого на выводы электромагнитов напряжения увеличивается на один шаг и вновь регистрируется величина деформации инструмента. Этот процесс повторяется до тех пор, пока напряжение достигнет верхнего предела своего диапазона, при этом зарегистрированная деформация инструмента на каждом шаге тарировки сохраняется в памяти компьютера. После завершения процесса автоматической тарировки управляющая программа устанавливает соответствие между амплитудой генерируемого напряжения и силой удара (деформацией реза).

Перед началом работы устройства устанавливается время от момента срабатывания датчика положения инструмента до начала процесса резания. Для этого на станке запускаются приводы подачи и главного движения. В режиме наладки управляющая программа регистрирует момент срабатывания датчика и начинает отсчет времени до момента, когда ССД зарегистрирует деформацию инструмента.

Параметры дополнительного управляемого силового импульса: максимальное значение силы, скорость нарастания силы, длительность импульса, а также время смещения между началом импульсного силового воздействия на инструмент и моментом его касания с заготовкой определяются на основе пробных проходов.

Описанное устройство было испытано при прерывистом точении заготовок из стали 45. На рисунках 3 и 4 представлены графики деформации инструмента, силы резания, скорости и ускорения при точении без устройства (рисунок 3) и с устройством для уменьшения вибраций (рисунок 4). На рисунке 4 зарегистрировано импульсное силовое воздействие на инструмент с максимальным значением силы 2900 Н и длительностью 100 мкс, предшествующее моменту врезания, а также сила взаимодействия реза и заготовки при последующем резании. Из сопоставления графиков, приведенных на рисунках 3 и 4, видно, что эффект от применения описанного выше устройства состоит в значительном снижении амплитуды и продолжительности вибраций инструмента.

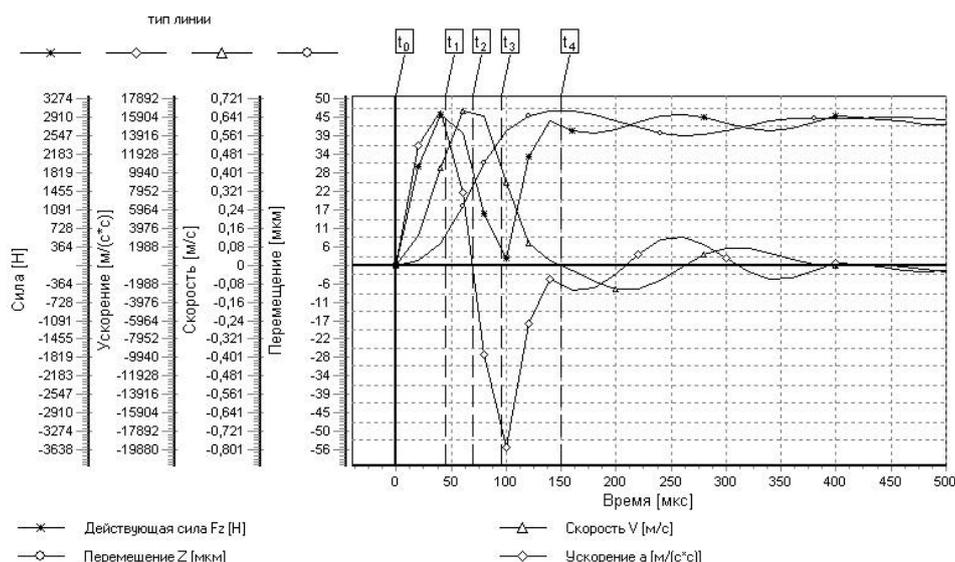
В ходе испытаний: 1) доказана состоятельность предложенного способа уменьшения вибраций инструмента при прерывистом точении и подтверждена работоспособность устройства для его реализации; 2) применение устройства обеспечивает значительное снижение уровня вибраций и увеличение скорости их затухания; 3) разработанное устройство с высокой точностью воспроизводит упреждающие силовые импульсы с требуемыми параметрами и устанавливает время их действия.



**Рисунок 3** – Графики деформации инструмента, силы резания, скорости и ускорения при прерывистом точении без устройства для уменьшения вибраций:

обрабатываемый материал – сталь 45; режимы резания –  $V = 160$  м/мин,  $s = 1,5$  мм/об.,  $t = 2$  мм;

геометрия режущей части –  $\gamma = 12^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\alpha_1 = 3^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 5^\circ$



**Рисунок 4** – Графики деформации инструмента, силы резания, скорости и ускорения при прерывистом точении с устройством для уменьшения вибраций:

обрабатываемый материал – сталь 45; режимы резания –  $V = 160$  м/мин,  $s = 1,5$  мм/об.,  $t = 2$  мм;

геометрия режущей части –  $\gamma = 12^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\alpha_1 = 3^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 5^\circ$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Катунин, А. В. Способ снижения вибраций инструмента при прерывистом резании [Текст] / А.В. Катунин, А.А. Жирков // Известия ОрелГТУ. Сер. Машиностроение. Приборостроение. – 2005. – №2. – С. 60-65.

**Катунин Александр Валентинович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, заместитель по УР директора Технологич. института ОрелГТУ

Тел. (4862) 55-55-24

E-mail: [kat@ostu.ru](mailto:kat@ostu.ru).

УДК 621.822.6:620.1

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, В.В. МИШИН, В.В. СЕМЕНОВ,  
П.П. МОИСЕЕВ, О.В. ЩЕПИЛИНА

## **ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К КОМПЛЕКСИРОВАНИЮ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ОПОР КАЧЕНИЯ И ЧАСТНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ**

*Обоснована целесообразность создания комплексных методов диагностирования опор качения. Предложены возможные подходы к решению этой задачи. Рассмотрен пример метода и средства диагностирования по электрическим и вибрационным параметрам.*

*The expediency of creation of complex methods of diagnosing of rolling bearings is proved. The decision of this problem is offered. The example of a method and a diagnostic device on electric and vibrating parameters is considered.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Будучи наиболее распространенными элементами механических систем, подшипники качения во многом определяют эксплуатационные показатели машин и механизмов, в частности, их надежность и безопасность. В этой связи задача диагностирования подшипников и опор качения стоит весьма остро как в процессе производства механических систем, так и в процессе их эксплуатации, сервисного обслуживания и ремонта.

Анализ состояния вопроса показывает, что, несмотря на наличие большого количества методов диагностирования, решение задачи получения достоверной информации о фактическом состоянии опор на подшипниках качения в настоящее время не является эффективным. Это обусловлено тем, что, несмотря на кажущуюся конструктивную простоту, подшипник качения является достаточно сложной механической системой, содержащей большое количество деталей, совершающих сложные относительные перемещения при взаимодействии друг с другом. При этом процессы и явления, происходящие в зонах трения работающего подшипника и определяющие, по сути дела, его фактическое состояние, носят весьма сложный характер. Каждый из методов диагностирования, основанный на определенном принципе, лишь в большей или меньшей степени характеризует те или иные стороны сложных процессов взаимодействия отдельных деталей подшипника и, в зависимости от конкретной задачи диагностирования, может быть более или менее эффективным.

Таким образом, ни один из методов диагностирования принципиально не может дать исчерпывающей информации о состоянии подшипника.

С учетом изложенного одним из направлений повышения достоверности диагностирования следует рассматривать совместное использование различных диагностических параметров – реализацию комплексирования при разработке технологий диагностирования. Совмещение различных принципов формирования измерительной информации с оригинальными алгоритмами ее обработки может обеспечить решение задач, не подлежащих решению только одним из методов.

### **ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К КОМПЛЕКСИРОВАНИЮ**

В качестве базового метода при комплексировании предлагается использовать *электрические методы*. Их сущность заключается в оценке состояния объекта по значениям электрических диагностических параметров, характеризующих сложные процессы, протекающие в зонах трения его деталей. Условно эти процессы можно разделить на две

группы. Процессы первой группы (трибозлектричество, термоэлектричество и т.п.) приводят к электризации зоны трения (возникновению ЭДС). Процессы второй группы (изменение свойств смазочного материала, толщины смазочных слоев, площади фактического контактирования в зонах трения и т.п.) вызывают изменение электрических параметров трибосопряжения (электрического сопротивления, проводимости, емкости). При реализации этих методов исследуемый объект непосредственно подключается к электронному средству диагностирования, определяющему требуемые в соответствии с решаемой задачей диагностические параметры. Принимая во внимание случайный характер протекающих в зонах трения процессов, в качестве диагностических параметров используют обычно различные усредненные и интегральные статистические оценки флуктуирующих электрических параметров, при этом информация о состоянии объекта поступает непосредственно из зон трения в форме электрического сигнала, диагностические параметры в зависимости от состояния подшипника изменяются на несколько порядков, а методы являются практически безынерционными.

На основе анализа известных и возможных направлений комплексирования, с учетом представленных в [1] обобщений выделено три подхода к комплексированию (рисунок 1).



Рисунок 1 – Направления комплексирования диагностических параметров

Первый подход заключается в использовании различных диагностических параметров для решения одной и той же диагностической задачи. Положительный эффект достигается за счет сочетания преимуществ и компенсации недостатков отдельных методов. Второй подход заключается в одновременном использовании различных диагностических параметров с целью накопления измерительной информации, характеризующей объект с различных сторон. Третий подход заключается в объединении в одном методе различных диагностических параметров, что обеспечивает получение качественно новой информации, которую невозможно получить при реализации лишь одного из методов.

Для реализации комплексирования необходимо определить наиболее благоприятные сочетания различных диагностических параметров для их совместного использования в технологиях диагностирования. Очевидно, что эта проблема не имеет однозначного решения, и для различных диагностических задач сочетание параметров будет свое. Ниже представлены краткие характеристики широко используемых для диагностирования

подшипников параметров и реализующих их методов, приемлемых для комплексирования с электрическими параметрами.

*Момент сопротивления вращению* зависит от количества и свойств смазочного материала, работоспособности системы смазывания, качества изготовления подшипника и сборки узла, степени износа его рабочих поверхностей и т.п. Многочисленность и взаимосвязанность влияющих факторов является одновременно преимуществом и недостатком механических методов, основанных на оценке этого параметра. Они обеспечивают, как правило, только комплексную оценку состояния подшипника, выделение отдельных составляющих момента представляет существенную сложность, что ограничивает функциональные возможности методов.

Определение тепловыделений непосредственно из контактных зон деталей позволяет оценить характер взаимодействия отдельных деталей подшипника. Проблема реализации тепловых методов, однако, заключается в конструктивных особенностях подшипника и подшипникового узла в целом. В большинстве случаев они не позволят вести прямые измерения *температуры* в зоне трения. В связи с этим большинство методов диагностирования подшипников и подшипниковых узлов по тепловыделению являются косвенными, и их реализация эффективна лишь в лабораторных условиях. При техническом диагностировании подшипников непосредственно в объектах ограничиваются обычно оценкой с помощью термопар, терморезисторов или бесконтактных термометрических устройств среднеинтегрального значения температуры доступных поверхностей деталей подшипникового узла.

Диагностическим признаком, широко используемым на практике, является кинематика подшипника. Частоты вращения кольца и сепаратора пропорциональны друг другу, а их отношение определяется размерными параметрами рабочих поверхностей деталей подшипника. Однако за счет проскальзывания в контактных зонах в зависимости от состояния подшипника указанная пропорциональность нарушается. Это явление положено в основу кинематических методов диагностирования подшипников качения, при реализации которых определяют, по сути дела, *отношение частот вращения сепаратора и кольца*. Имеет место определенная сложность решения конкретных диагностических задач с помощью кинематических методов, поскольку скольжение представляется сложным многокомпонентным явлением. Существует множество факторов, определяющих скольжение. Поэтому выделить необходимую информацию о состоянии подшипника порой не представляется возможным.

Одними из наиболее распространенных являются виброакустические методы, сущность которых заключается в измерении и анализе *параметров виброакустического сигнала*, излучаемого самим подшипником при его работе или исследовании частотных характеристик канала «излучатель - подшипник - первичный преобразователь» при передаче по этому каналу сигнала от излучателя. Измерение параметров данной группы обеспечивает усредненную комплексную оценку состояния подшипника, а также решает комплекс конкретных диагностических задач. К числу названных задач относят: оценку структурных параметров подшипника, сформировавшихся под влиянием технологических погрешностей изготовления и сборки подшипника и подшипникового узла (отклонения от круглости дорожек качения колец, разноразмерность тел качения, зазоры и углы контактов); поиск дефектов подшипников при их эксплуатации; прогнозирование состояния объекта. Одной из основных проблем реализации методов данной группы является то, что реальный виброакустический сигнал представляет сочетание полезного сигнала и помех, на полезный сигнал накладываются посторонние составляющие, что осложняет выделение полезного сигнала. Отношение амплитуды полезного сигнала к уровню помех нередко бывает невысоким при идентичности частотных спектров, что затрудняет практическое применение методов данной группы.

### ПРИМЕР КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрим пример комплексирования электрических и вибрационных параметров. Для того чтобы совместное применение диагностических методов было эффективным, необходимо, чтобы они были чувствительны к одним факторам. Данное условие в большей степени выполняется для групп электрических и вибрационных параметров. Эти параметры могут применяться для оценки одних и тех же характеристик подшипников, но принцип формирования информации имеет различную физическую природу. Обе группы параметров чувствительны к следующим факторам: биению колец собранного подшипника, макро- и микроотклонениям дорожек, локальным дефектам, состоянию и составу смазки, силам нагружения, частоте вращения и т.п.

В связи с тем, что методы чувствительны к общим факторам и решают схожие диагностические задачи, имеют различную природу, не искажают результатов друг друга, предлагается объединить их в единый комплексный метод. При этом предполагается, что совместное применение приведет к повышению достоверности.

Для описания вибрации в подшипнике качения воспользуемся математическим аппаратом, представленным в [2].

Уравнение движения подвижного кольца будет иметь вид

$$\ddot{x}_j + \Omega_j^2 \left( 1 + \sum_{q=1}^2 \xi_i \cos \Theta_q t \right) x_j = \frac{1}{M} F_j, \quad (1)$$

где  $x_j$  – виброперемещение в  $j$ -м направлении;

$j = 1$  – осевое направление;

$j = 2, 3$  – радиальное направление;

$\xi_i = \frac{c_{jim}}{c_{ji0}}$  – параметр, определяющий отношение переменной составляющей

жесткости  $c_{jim}$  (определяется макроотклонением кольца) к постоянной составляющей  $c_{ji0}$ ;

$\Theta_q$  – частота изменения жесткости.

Для описания электрических процессов в подшипнике качения используем математическое описание метода, основанного на применении диагностического параметра – нормированное интегральное время (НИВ) микроконтактирования [1]. Численно параметр равен отношению суммарной (интегральной) длительности импульсов проводимости, соответствующих разрушениям смазочной пленки в контактных зонах деталей подшипника, ко времени измерения

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_u} = \sum_{i=1}^n (t_{k_i} - t_i) / T_u, \quad (2)$$

где  $\tau_i$  – длительность  $i$ -го импульса проводимости (микроконтактирования);

$T_u$  – время измерения;

$n$  – количество импульсов проводимости за время  $T_u$ .

Практически НИВ равно относительному времени разрушения смазочной пленки в контактных зонах деталей. При этом учитывается как длительность каждого отдельного микроконтактирования, так и частота их следования. Таким образом, данный параметр является статистической оценкой вероятности микроконтактирования в подшипнике.

Информация о состоянии объекта диагностирования поступает по двум независимым каналам. За счет различной природы получения информации выбранных методов, предполагается использовать преимущества каждого из методов и компенсировать недостатки, что подразумевает первый подход к комплексированию при диагностике. Это соответствует

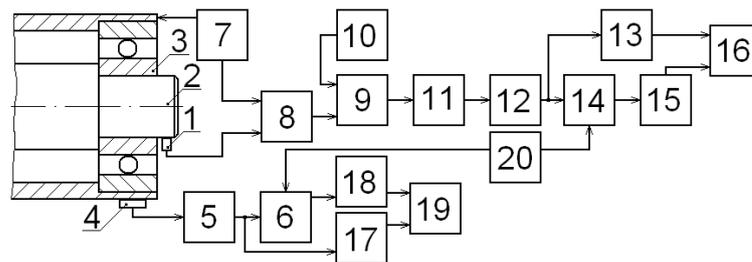
первому из описанных подходов при комплексировании. Суждение о состоянии подшипника вырабатывается на основании сравнения информации, полученной от каждого из каналов. За счет этого достигается повышение достоверности при диагностировании.

Рассмотрим пример комплексирования электрических и вибрационных параметров при решении задачи контроля макроотклонений рабочих поверхностей деталей подшипников качения. Известен метод, позволяющий по параметру НИВ идентифицировать вид, ориентацию и значение доминирующего макроотклонения дорожек качения колец отдельного подшипника качения или подшипникового узла [3]. Сущность метода заключается в использовании параметра  $K_m$ , характеризующего энергетический вклад гармонических составляющих на соответствующих овальности и огранки заданного порядка информационных частотах  $f_i$  в спектр функции изменения параметра НИВ –  $K(t)$

$$K_m = (K_F)^2 / (K_0)^2, \quad (3)$$

где  $(K_F)^2$  и  $(K_0)^2$  – среднеквадратическое значение гармонической составляющей напряжения, пропорционального параметру НИВ, на информационной частоте и среднеквадратическое значению всей переменной составляющей напряжения, пропорционального параметру НИВ.

Для повышения достоверности диагностирования предлагается наряду с измерением указанного диагностического параметра реализовать параллельно канал измерения аналогичного по структуре параметра вибрации. На рисунке 2 представлена схема оригинального устройства, реализующего предложенный подход [4].



**Рисунок 2** – Структурная схема устройства для диагностирования подшипников качения по комплексным параметрам:

- 1 – токосъемник; 2 – вал; 3 – внутреннее кольцо контролируемого подшипника; 4 – вибропреобразователь;  
 5 – усилитель; 6 – фильтр; 7 – источник стабилизированного электрического напряжения;  
 8 – формирователь импульсов; 9 – временной селектор; 10 – генератор импульсов опорной частоты;  
 11 – счетчик; 12 – цифроаналоговый преобразователь; 13 – первый квадратичный детектор;  
 14 – узкополосный фильтр; 15 – второй квадратичный детектор; 16 – первый преобразователь отношений;  
 17 – третий квадратичный детектор; 18 – четвертый квадратичный детектор; 19 – второй преобразователь отношений; 20 – устройство задания информационной частоты

Устройство работает следующим образом. С валом 2 вращают внутреннее кольцо контролируемого подшипника 3. При вращении внутреннего кольца контролируемого подшипника в результате воздействия комплекса внутренних параметров подшипника и режимов его эксплуатации электрическая проводимость между внутренним и наружным кольцами непрерывно изменяется. Поэтому сила тока в электрической цепи, образованной блоками 1, 2, 3, 7 и 8, непрерывно изменяется прямо пропорционально электрической проводимости контролируемого подшипника. Формирователь импульсов 8 преобразует флуктуации электрической проводимости контролируемого подшипника в прямоугольные импульсы электрического напряжения постоянной амплитуды, у которых нулевой уровень соответствует наличию смазочной пленки в зонах трения подшипника, а единичный уровень – разрыву смазочной пленки в зонах трения. Далее прямоугольные импульсы напряжения

поступают на первый вход временного селектора 9, в котором они заполняются высокочастотными импульсами опорной частоты, подаваемыми на второй вход временного селектора 9 от генератора импульсов опорной частоты 10. Счетчик 11 производит подсчет импульсов опорной частоты, прошедших через временной селектор 9 за время измерения параметра НИВ, а цифроаналоговый преобразователь 12 преобразует их в непрерывный сигнал, электрическое напряжение которого прямо пропорционально значению параметра НИВ.

Выходное напряжение цифроаналогового преобразователя 12 поступает на первый квадратичный детектор 13, формирующий на выходе сигнал, пропорциональный среднеквадратическому значению всей переменной составляющей напряжения, пропорционального параметру НИВ. Одновременно выходное напряжение цифроаналогового преобразователя поступает на вход узкополосного фильтра 14, соединенного с ним параллельно. Узкополосный фильтр выделяет из выходного напряжения цифроаналогового преобразователя составляющую, частота которой соответствует информационной частоте, заданной оператором с помощью устройства задания информационной частоты 20. Выходное напряжение узкополосного фильтра поступает на вход второго квадратичного детектора 15, который формирует на выходе сигнал, пропорциональный среднеквадратическому значению гармонической составляющей напряжения, пропорционального параметру НИВ, на информационной частоте. С выходов детекторов 13 и 15 сигналы поступают на входы первого преобразователя отношений 16, формирующего сигнал, пропорциональный электрическому диагностическому параметру – отношению среднеквадратического значения гармонической составляющей напряжения, пропорционального параметру НИВ, на информационной частоте к среднеквадратическому значению всей переменной составляющей напряжения, пропорционального параметру НИВ.

Одновременно с помощью вибропреобразователя 4 амплитуда вибрации подшипника преобразуется в электрическое напряжение, которое усиливается усилителем 5. Выходное напряжение усилителя поступает на третий квадратичный детектор 17, формирующий на выходе сигнал, пропорциональный среднеквадратическому значению всей переменной составляющей напряжения, пропорционального амплитуде вибрации контролируемого подшипника.

Одновременно выходное напряжение усилителя поступает на вход фильтра 6, соединенного с ним параллельно. Фильтр выделяет из выходного напряжения усилителя составляющую, частота которой соответствует информационной частоте, заданной оператором с помощью устройства задания информационной частоты 20. Выходное напряжение фильтра поступает на вход четвертого квадратичного детектора 18, который формирует на выходе сигнал, пропорциональный среднеквадратическому значению гармонической составляющей напряжения, пропорционального амплитуде вибрации, на информационной частоте.

С выходов детекторов сигналы поступают на входы второго преобразователя отношений 19, формирующего сигнал, пропорциональный вибрационному диагностическому параметру – отношению среднеквадратического значения гармонической составляющей напряжения, пропорционального амплитуде вибрации, на информационной частоте к среднеквадратическому значению всей переменной составляющей напряжения, пропорционального амплитуде вибрации.

Предложенный комплексный метод вместе с устройством диагностирования открывает новые возможности диагностирования трибосопряжений, имеет более широкую область применения и повышенную достоверность относительно базовых метода и устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст]/ К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
2. Приборные шариковые подшипники [Текст]: справочник; под ред. К.Н. Явленского и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 351 с.
3. Подмастерьев, К.В. Электрорезистивный метод комплексного диагностирования опор качения [Текст]/ К.В. Подмастерьев // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 9. – С.22-26.
4. Пат. 2008101171 Российская Федерация, МПК G 01 M 13/04. Устройство диагностирования подшипников качения [Текст]. Патент на полезную модель; Оpubл. 10.06.08, Бюл. № 16.

**Подмастерьев Константин Валентинович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел,  
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 41-98-76  
E-mail: [pms35@mail.ostu.ru](mailto:pms35@mail.ostu.ru)

**Мишин Владислав Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел,  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 41-98-76

**Семенов Вячеслав Вячеславович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел,  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

**Моисеев Павел Петрович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел,  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

**Щепилина Олеся Валерьевна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел,  
Студентка кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

В.В. МАРКОВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА

*Состояние фрикционного контакта может быть определено с помощью диагностических параметров электрической, кинематической или тепловой природы. В этой статье рассмотрены математические модели некоторых параметров, служащих источниками первичной информации об объекте исследований.*

*The condition of friction contact may be define with diagnostically parameters the electrical, cinematically and thermal nature. In this article is show the mathematical models of some parameters, which is may be the sources of primary information on the object of researches.*

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Области фрикционных контактов являются наиболее нагруженными зонами механизмов, агрегатов и машин, поэтому непрерывная оценка и прогнозирование их технического состояния является одним из мероприятий, гарантирующих безопасность технологического оборудования и транспорта. Для получения информации о состоянии фрикционных контактов могут использоваться диагностические параметры электрической, кинематической, тепловой или другой природы, которые широко известны и обладают рядом достоинств, в частности, пригодностью для проведения неразрушающего контроля трибосопряжений.

Тем не менее, на пути широкого использования методов неразрушающего контроля технического состояния трибосопряжений существуют препятствия. Многими научными школами и отдельными изобретателями предложено огромное количество диагностических параметров, имеющих различную природу и разнообразный физический смысл, однако ни один из них не несет в себе исчерпывающей информации о состоянии фрикционного контакта. Будущее за использованием комплексных диагностических параметров, соединяющих в себе, например, единичные параметры электрической, кинематической и тепловой природы. Но самые распространенные из таких единичных параметров – электрическое сопротивление, параметры вибрации, температура – во-первых, имеют неодинаковый физический смысл, а во-вторых, для их математического моделирования используются разные методы. Например, электрическое сопротивление моделируется законами распределения вероятностей, а вибрация – дифференциальными уравнениями. Кроме того, не все диагностические параметры позволяют *прогнозировать* состояние фрикционного контакта.

Указанные обстоятельства делают проблему создания комплексного диагностического параметра актуальной. *Целью теоретических исследований*, результаты которых изложены в настоящей работе, стал поиск оптимальных для комплексирования диагностических параметров и составление их моделей, систему которых можно было бы использовать как единое математическое описание комплексного параметра.

В настоящей работе рассмотрены следующие единичные диагностические параметры: электрической природы – сопротивление и мощность; кинематической природы – виброперемещение, виброскорость и виброускорение; тепловой природы – температура и скорость изменения температуры.

## ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТА

Известно, что электрическое сопротивление – это физическая величина, характеризующая способность объекта противодействовать протеканию в нем электрического тока. Значение сопротивления объекта определяется его геометрическими размерами и внутренними свойствами (удельным сопротивлением). Следовательно, *электрическое сопротивление*, как диагностический признак, *характеризует внутренние свойства фрикционного контакта* в момент проведения измерений.

Анализ возможных подходов к моделированию [1-3] показал, что математическая модель процессов, определяющих флуктуации сопротивления, может быть получена при совместном использовании теории контакта реальных поверхностей и теории электропроводности контакта двух шероховатых тел [4-8]. Сложность трибологических процессов не позволяет построить их строгое математическое описание без введения ряда допущений. При разработке модели в данной работе приняты следующие *допущения*:

- для описания топографии поверхностей используются функции распределения материала по высоте шероховатого слоя и по высоте единичного выступа;
- в качестве модели единичной неровности применяется сферический сегмент;
- контакт неровностей считается упругим, для описания макродеформаций поверхностей используется теория Герца;
- для математического описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей используется нормальный закон распределения вероятности;
- расчеты выполняются применительно к контакту шероховатой поверхности с гладкой, переход к контакту двух шероховатых поверхностей осуществляется оценкой композиции законов распределения;
- влияние центробежных сил и гороскопических моментов не учитывается.

Анализ составляющих сопротивления фрикционного контакта позволил отметить, что в условиях жидкостной смазки оно определяется толщиной смазочной пленки и удельным сопротивлением смазочного материала, в условиях граничной смазки – сопротивлением поверхностных пленок и сопротивлением стягивания, а при микроконтактировании – только сопротивлением стягивания. В результате получена *обобщенная математическая модель сопротивления фрикционного контакта*, учитывающая наиболее существенные его составляющие (сопротивление  $R_{ст}$  стягивания и сопротивление  $R_{сп}$  смазочной пленки) при различных условиях смазки:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{ст} = \frac{\rho}{2 \cdot n_{п} \cdot r_{к}}, \text{ при } h_0 < 3 \text{ нм}; R_{сп} = \frac{\rho_{пов}}{\pi \cdot N \cdot r_{к}^2}, \text{ при } 3 \leq h_0 < 10 \text{ нм}; \\ R_{сп} = \rho_{гп} \cdot \frac{h_0}{S_h}, \text{ при } 0,01 \leq h_0 < 1 \text{ мкм}; R_{сп} = \rho_{см} \cdot \frac{h_0}{S_h}, \text{ при } 1 \leq h_0 \leq 30 \text{ мкм} \end{array} \right., \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $\rho_{пов}$ ,  $\rho_{гп}$ ,  $\rho_{см}$  – соответственно, удельное электрическое сопротивление контактирующих поверхностей, смазочных пленок с туннельной проводимостью, граничной смазочной пленки и смазочного материала;

$h_0$  – минимальное значение толщины смазочной пленки;

$S_h$  – площадь пятна контакта;

$r_{к}$  – радиус пятна металлического контакта;

$N$  – число пятен контакта в контактной зоне.

Подход к моделированию и структура математической модели электрического сопротивления фрикционного контакта подробно рассмотрены в работе [3]. Теоретические исследования законов распределения высоты микронеровностей контактирующих поверхностей позволили уточнить предложенную модель.

При обработке поверхности ее геометрия образуется в результате воздействия периодических факторов и случайных возмущений. Вид обработки, подача, биение шпинделя, профиль режущих кромок инструмента и другие, постоянно действующие

факторы определяют систематическую (периодическую) составляющую геометрии, а процессы, происходящие при деформации обрабатываемого материала (вырывы, сколы, наросты и т.п.), формируют ее случайную составляющую. При монтаже узла трения геометрия рабочих поверхностей деталей может претерпевать изменения, характеризующиеся появлением дополнительных отклонений от круглости, а при эксплуатации и транспортировке могут появляться различные локальные дефекты. Таким образом, профиль реальной рабочей поверхности трибосопряжения, имея систематические и случайные составляющие, характеризуется в общем случае регулярными отклонениями формы и расположения – макроотклонениями поверхностей (для дорожки качения подшипника, например, – эксцентricность, овальность или огранка соответствующего порядка), шероховатостью поверхностей, а также локальными дефектами (задир, трещина, лунка, раковина и т.п.).

Таблица 1 – Математическое описание электрического сопротивления контакта

Граничная смазка	Смешанная смазка	Но- мер ф-лы
$R_{ст} = a_R \cdot \Psi_R(h)$	$R_{сп} = \alpha_{см} \cdot R_{ст}; \alpha_{см} = \frac{\rho_{см}}{\rho_M} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r}$	(2)
$a_R = \frac{\rho_M}{2N\sqrt{\beta d}}; \Psi_R(h) = \left  L\left(\frac{d}{R_q}\right) \cdot \left[1 - L\left(\frac{d}{R_q}\right)\right] + \frac{R_q}{d\sqrt{2\pi}} \cdot \left[\frac{1}{2} - L\left(\frac{d}{R_q}\right)\right] \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2R_q^2}\right) - \frac{1}{4}\right ^{-0,5}$		(3)
$A_r = a_r \cdot \Psi_A(h); a_r = \pi N \beta d; \Psi_A(h) = L\left(\frac{d}{R_q}\right) + \frac{R_q}{d \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2 \cdot R_q^2}\right) - \frac{1}{2};$ $\beta = \sqrt{r_{пр} r_{поп}}$		(4)
$A_c = \pi \cdot n_a \cdot n_b \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F_r}{E \cdot \Sigma \rho}\right)^2} - A_D; N = \frac{A_c}{S_{m1} \cdot S_{m2}}; d = R_p - \delta$		(5)
$\delta = a \cdot \sqrt[3]{\Sigma \rho}; a = \frac{3}{2} \cdot \frac{2K}{\pi n_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1 - \eta^2}{E}\right)^2} \cdot F_r^2$		(6)
$f(h_1) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & h_1 \cdot \sqrt{\frac{3(2\alpha - 3)}{\alpha^2}} \cdot \exp(-C_1 \cdot h_1^2) + \frac{3\sqrt{2\pi}}{2\alpha} \cdot (h_1^2 - 1) \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{3}{2(2\alpha - 3)}}\right)\right] \times \\ & \times \exp\left(-\frac{h_1^2}{2}\right) + \sqrt{\frac{2\pi\alpha}{3(\alpha - 1)}} \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha - 1)(2\alpha - 3)}}\right)\right] \cdot \exp\left(-\frac{\alpha h_1^2}{2(\alpha - 1)}\right) \end{aligned} \right\}$ $h_1 = \frac{h}{\sqrt{m_0}}; \alpha = \frac{m_0 \cdot m_4}{m_2^2}; C_1 = \frac{\alpha}{2 \cdot \alpha - 3}; \alpha = 1,5 + k \cdot t$		(7)
$R_{пов}(\varphi) = R_{пов0} + \sum_{i=1}^p Q_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k)$		(8)
$\left\{ \begin{aligned} D(x) &= \frac{D_{\max}}{\sqrt{[m_d \cdot (x - x')]^s + 1}}, & D(x) &= \frac{D_{\max}}{\sqrt{\varepsilon^2 \cdot T_n^s \cdot m_d \cdot (x - x') + 1}} \end{aligned} \right.$		(9)

Для описания макроотклонений поверхностей в модели использован метод гармонического анализа [9]; для описания локальных дефектов – функции на базе полиномов Чебышева и Баттерворта [10]; для описания высоты микронеровностей (шероховатости) использовано распределение Найака, основанное на положениях теории случайных полей [4]. Основные выражения, составляющие математическую модель электрического сопротивления фрикционного контакта в условиях граничной или смешанной смазки трибосопряжения, приведены в таблице 1.

Расчет сопротивления фрикционного контакта проводят по формулам и вспомогательным выражениям (2)-(9), последовательно определяя промежуточные параметры математической модели: параметры макрогеометрии, локальных дефектов, высоту микронеровностей контактирующих поверхностей (7)-(9); сближение  $\delta$  контактирующих поверхностей (6); контурную площадь контакта  $A_c$ , число всех неровностей  $N$  в пределах контурной площади контакта, номинальный зазор  $d$  между поверхностями (5); фактическую площадь контакта  $A_r$  (4); приведенный радиус микронеровности  $\beta$ , вспомогательные переменные функции электрического сопротивления  $a_R$  и  $\Psi_R(h)$  (3); электрическое сопротивление фрикционного контакта при граничной смазке  $R_{ст}$  (сопротивление стягивания) или при смешанной смазке  $R_{сп}$  (сопротивление смазочной пленки) (2). Получаемая таким образом модель учитывает конструктивные параметры трибосопряжения (номинальные размеры деталей, свойства материалов, шероховатость, отклонения формы и расположения рабочих поверхностей, их локальные дефекты), а также режимы и условия его эксплуатации.

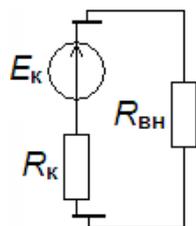
В формулах таблицы 1 использованы следующие условные обозначения:  $\rho_{см}$  – удельное сопротивление смазочной пленки;  $r_k$  – радиус пятна контакта;  $h_0$  – минимальное значение толщины смазочной пленки в пределах пятна контакта;  $\rho_m$  – удельное сопротивление материалов контактирующих поверхностей;  $r_{пр}$ ,  $r_{поп}$  – соответственно, радиусы закругления вершин неровностей в продольном и поперечном направлениях (параметры шероховатости);  $\beta$  – радиус закругления единичной неровности;  $\delta$  – сближение поверхностей ( $\delta = h - d$ );  $L(d/R_q)$  – функция Лапласа (табулирована);  $A_d$  – площадь локального дефекта;  $A_c$  – контурная площадь контакта поверхностей;  $S_{m1}$ ,  $S_{m2}$  – средний шаг неровностей профиля в перпендикулярных сечениях (продольном и поперечном);  $R_p$  – приведенная высота сглаживания неровностей профиля поверхностей ( $R_p = R_{p1} + R_{p2}$ );  $N$  – число всех неровностей, находящихся в пределах номинальной площади контакта  $A_a$  двух поверхностей трибосопряжения;  $d$  – номинальный зазор между поверхностями;  $E$  и  $\eta$  – соответственно, приведенные модуль упругости и коэффициент Пуассона;  $F_r$  – нормальная нагрузка в контакте;  $(2K/\pi n_a)$  – табличный коэффициент;  $\Sigma\rho$  – сумма главных кривизн контактирующих поверхностей, определяемая по радиусам их кривизны;  $h$  и  $h_1$  – соответственно, высота микронеровностей и безразмерная высота микронеровностей;  $\alpha$  – параметр широкополосности профиля поверхности;  $C_1$  – коэффициент пропорциональности;  $m_0$ ,  $m_2$ ,  $m_4$  – моменты спектральной плотности высоты микронеровностей профиля поверхности;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $t$  – срок эксплуатации поверхности (детали);  $R_{пов0}$  – средний радиус сечения;  $Q_k$ ,  $\Phi_k$  – амплитуда и фазовый угол  $k$ -й гармоники отклонения;  $k$  – номер гармоники (первая гармоника характеризует эксцентриситет, вторая – овальность, третья – трехвершинную огранку и т.п.);  $p$  – предельный номер учитываемой гармоники;  $s$ ,  $\varepsilon$  – коэффициенты, определяющие профиль дефекта;  $D_{max}$ ,  $m_d$  и  $x'$  – соответственно, параметры глубины, протяженности и смещения локального дефекта;  $T_n(x)$  – полином Чебышева степени  $n$  с аргументом  $m_d(x - x')$ .

#### ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА

В отличие от сопротивления, электрическая мощность является энергетической характеристикой фрикционного контакта и имеет физический смысл скорости преобразования энергии в процессе фрикционного взаимодействия поверхностей.

Использование электрической мощности в качестве источника первичной информации о состоянии фрикционного контакта позволяет не только учесть внутренние параметры контактирующих поверхностей, но и составить единую систему зависимостей для электрических и вибрационных диагностических параметров, поскольку в этом случае и те, и другие можно представить, как функции времени.

Однако, по сравнению с сопротивлением, математическое моделирование электрической мощности фрикционного контакта сложнее, так как в модели мощности целесообразно учесть не только сопротивление зоны трения, но и генерируемую трибосопряжением ЭДС. Рассмотрим обобщенную электрическую схему замещения фрикционного контакта, показанную на рисунке 1.



$R_k$  – сопротивление фрикционного контакта;  
 $E_k$  – ЭДС фрикционного контакта;  
 $R_{вн}$  – сопротивление внешней нагрузки

Рисунок 1 – Обобщенная эквивалентная схема замещения фрикционного контакта

Условно контакт можно представить в виде последовательного соединения сопротивления  $R_k$  и источника ЭДС  $E_k$ . Тогда мощность фрикционного контакта  $P_k$  может быть найдена из выражения

$$P_k = I \cdot U + I \cdot E_k = I \cdot (U + E_k) = I \cdot (I \cdot R_k + E_k), \quad (10)$$

где  $I$  – сила тока в цепи фрикционного контакта;

$U$  – падение напряжения на сопротивлении контакта.

Подставляя в формулу (10) выражения, составляющие математическую модель электрического сопротивления фрикционного контакта, можно вывести зависимость мощности от внутренних параметров трибосопряжения:

1) электрическая мощность фрикционного контакта при граничной смазке трибосопряжения ( $P_{гр}$ )

$$P_{гр} = I \cdot \left( I \cdot \frac{\rho_m}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta \cdot d}} \cdot \Psi_R(h) + E_k \right); \quad (11)$$

2) электрическая мощность фрикционного контакта при смешанной смазке ( $P_{см}$ ):

$$P_{см} = I \cdot \left( I \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_m} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r} \cdot \frac{\rho_m}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta \cdot d}} \cdot \Psi_R(h) + E_k \right). \quad (12)$$

Условные обозначения в формулах (11) и (12) соответствуют обозначениям, принятым в таблице 1.

Полученные зависимости в совокупности с формулами таблицы 1 могут служить обобщенной математической моделью электрической мощности фрикционного контакта. Данная модель, несомненно, представляет собой достаточно упрощенное описание электроэнергетических процессов, протекающих в областях фрикционного взаимодействия поверхностей, однако ее совершенствование может привести к созданию математической модели комплексного диагностического параметра, позволяющего оценивать техническое состояние трибосопряжения по характеристикам электрической, вибрационной и тепловой природы.

### ОПИСАНИЕ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ

Диагностирование трибосопряжений по параметрам вибрации широко известно [11]. Методы вибродиагностики обладают несомненными достоинствами, поэтому комплексный диагностический параметр, включающий в себя, помимо электрических и тепловых величин, вибрационные характеристики, например, виброскорость, может быть очень ценным.

Чтобы получить обобщенное математическое описание вибрации контактирующих поверхностей фрикционного контакта, рассмотрим процесс возникновения этого явления. Пусть фрикционный контакт образован двумя цилиндрическими поверхностями, из которых наружная неподвижна, а внутренняя вращается с угловой скоростью  $\omega$  (рисунок 2).

Если бы контактирующие поверхности трибосопряжения были идеальными, то траектория движения внутренней поверхности представляла бы собой окружность. Наличие на обеих поверхностях макроотклонений и микронеровностей (шероховатости) делает траекторию движения внутренней поверхности более сложной.

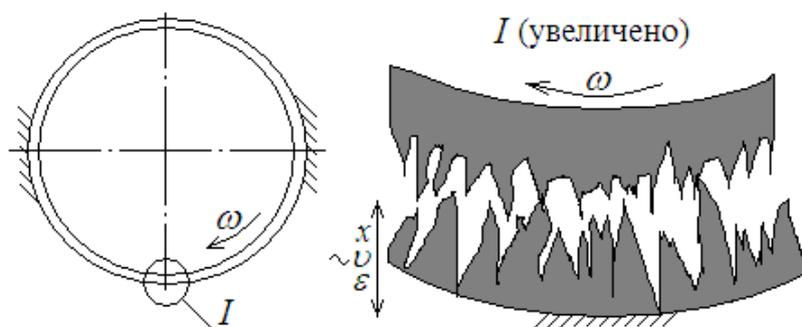


Рисунок 2 – Возникновение вибрации поверхностей контакта

В условиях реальной геометрии внутренняя поверхность не только вращается, но и перемещается в направлении, перпендикулярном вращению, то есть «вибрирует».

Поскольку вибрацию вызывают макроотклонения и микронеровности поверхностей, виброперемещение должно быть функцией геометрических параметров фрикционного контакта. Математические модели, связывающие геометрические параметры контактирующих поверхностей и параметры вибрации, основаны на использовании уравнения Лагранжа [11]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = Q_{iP} + Q_{iR} + Q_{iF}; \quad i = 1, 2, \dots, S, \quad (13)$$

где  $\partial q$  – обобщенная координата;

$\partial \dot{q}_i$  – обобщенная скорость;

$Q_{iP}$  – обобщенная восстанавливающая сила, соответствующая восстанавливающим силам  $P_i$ ;

$Q_{iR}$  – обобщенная диссипативная сила, соответствующая силам сопротивления  $R_i$ ;

$Q_{iF}$  – обобщенная сила, соответствующая возмущающим силам  $F_i$ ;

$T$  – кинетическая энергия движущейся системы;

$S$  – число степеней свободы.

Обобщенную координату  $\partial q$  можно рассматривать, как виброперемещение. Если в первом приближении принять, что основной вклад в формирование виброперемещения контактирующих поверхностей делают их макроотклонения (эксцентricность, овальность, огранка), а вклад микронеровностей, по сравнению с ними, мал, то виброперемещение, а точнее, его детерминированную составляющую  $x_d$ , можно выразить функцией радиуса

поперечного сечения  $R_{\text{пов}}$  вращающейся поверхности

$$x_{\text{д}}(R_{\text{пов}}) = f\left(R_{\text{пов}0} + \sum_{i=1}^p Q_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k)\right) = \sum_{i=1}^p X_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k), \quad (14)$$

где  $R_{\text{пов}0}$  – средний радиус вращающейся поверхности (при этом виброперемещение отсутствует:  $x = 0$ );

$X_k, \varphi_k$  – амплитуда и фазовый угол  $k$ -й гармоники виброперемещения;

$k$  – номер гармоники (первая гармоника характеризует виброперемещение, порождаемое эксцентриситетом поверхности, вторая – ее овальностью, третья – ее трехвершинной огранкой и т.п.);

$p$  – предельный номер учитываемой гармоники.

Формула (14) позволяет составить математическое описание детерминированной составляющей виброперемещения, обусловленной наличием макроотклонений на рабочих поверхностях трибосопряжения. Случайная составляющая виброперемещения  $x_{\text{сл}}$  может быть вызвана влиянием микрогеометрии (шероховатости) рабочих поверхностей, которая также имеет случайный характер (таблица 1, формулы 7). В целом, виброперемещение  $x$  можно выразить совокупностью детерминированной и случайной составляющих:

$$x(R_{\text{пов}}, h) = x_{\text{д}} + x_{\text{сл}} = f\left(R_{\text{пов}0} + \sum_{i=1}^p Q_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k)\right) + f(h) = \sum_{i=1}^p X_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k) + f(h), \quad (15)$$

где  $h$  – высота микронеровностей контактирующих поверхностей (таблица 1, формулы 7).

Получив первую производную от формулы (15), можно выразить виброскорость  $v$ , а вторую – виброускорение  $\varepsilon$ :

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d\left(\sum_{i=1}^p X_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k) + f(h)\right)}{dt}; \quad \varepsilon = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2\left(\sum_{i=1}^p X_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k) + f(h)\right)}{dt^2}. \quad (16)$$

Использование вибрационных параметров позволяет получить однозначную первичную информацию о состоянии фрикционного контакта. Так, виброперемещение, являясь функцией макроотклонений и микрогеометрии контактирующих поверхностей, может быть использовано для оценки геометрических параметров контакта. Виброскорость, как первая производная от виброперемещения, может служить диагностическим параметром, учитывающим скорость изменения геометрических параметров контакта во времени, и, тем самым, оценивающим износ контактирующих поверхностей. Виброускорение, как производная от виброскорости, может использоваться для оценки характера изменения геометрии поверхностей – этап приработки ( $\varepsilon < 0$ ), этап нормальной эксплуатации ( $\varepsilon \approx 0$ ), этап необратимого износа контактирующих поверхностей до наступления предельного состояния ( $\varepsilon > 0$ ). С этой точки зрения, виброускорение, как диагностический параметр, представляет особую ценность, так как по его значениям можно прогнозировать наступление предельного состояния фрикционного контакта и всего механизма в целом.

Выражения (15) и (16), несомненно, представляют собой самую примитивную математическую модель вибрации рабочих поверхностей фрикционного контакта, не учитывающую многие внутренние механические свойства трибосопряжения. Тем не менее, эти выражения позволяют увидеть сходство между моделями электрических и вибрационных параметров – и одни, и другие основаны на одинаковом математическом описании профиля контактирующих поверхностей. Следовательно, результаты оценки технического состояния одного и того же фрикционного контакта по электрическим и вибрационным

диагностическим параметрам должны иметь достаточно высокую степень взаимной корреляции, что также создает предпосылку для реализации комплексирования.

### **ОПИСАНИЕ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА ПО ПАРАМЕТРАМ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Очень часто в процессе трибологических исследований наряду с получением информации об электрических или вибрационных параметрах фрикционного контакта измеряют температуру поверхностей деталей трибосопряжения, находящихся в непосредственной близости от зоны трения. Известно, что с ухудшением условий трения температура повышается и, даже если не регистрировать значения других диагностических параметров, по повышению температуры уже можно предположить об усилении износа.

Как известно, термодинамическая температура является мерой кинетической энергии внутреннего взаимодействия структурных элементов вещества. Повышение температуры свидетельствует об увеличении длины свободного пробега структурных элементов (атомов или молекул) и об увеличении внутренней энергии вещества в целом. Значит, условно *температуру можно отнести к энергетическим характеристикам.*

Однако, несмотря на очевидные достоинства оценки технического состояния фрикционного контакта по температуре рабочих поверхностей трибосопряжения, математическое моделирование этого диагностического признака отличается значительной трудоемкостью. Достаточно сложно установить взаимосвязь между геометрическими параметрами контактирующих поверхностей и режимами эксплуатации трибосопряжения с одной стороны и температурой контактирующих поверхностей – с другой стороны.

В качестве одного из подходов к математическому моделированию температуры фрикционного контакта может быть рассмотрен термошумовой метод, в основе которого лежит формула Найквиста

$$E^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot R_0, \quad (17)$$

где  $E$  – ЭДС в зоне трения;  
 $k$  – постоянная Больцмана;  
 $R_0$  – электрическое сопротивление объекта при начальной температуре;  
 $T$  – температура.

Выражая температуру из формулы Найквиста, получим

$$T = \frac{E^2}{4 \cdot k \cdot R_0}. \quad (18)$$

Из формулы (18) видно, что температура в зоне трения зависит от ЭДС и сопротивления фрикционного контакта. И хотя термошумовые процессы – не единственный источник теплоты в трибосопряжении, на основе выражения (18) можно получить математическую модель температуры в зоне трения, которая будет хорошо сочетаться с моделями электрического сопротивления, электрической мощности и вибрационных параметров, так как в основе всех этих моделей будет общий подход к моделированию геометрических параметров контактирующих поверхностей.

Еще одним интересным направлением работ в рамках получения комплексного диагностического параметра будет использование не самой температуры, а ее первой производной – скорости измерения температуры в зоне трения.

Это интересно, прежде всего, с динамической точки зрения. Процесс выделения теплоты – самый инерционный процесс в зоне трения, а температура – самый медленно изменяющийся диагностический признак. Так, электрическое сопротивление фрикционного контакта может увеличиться в несколько раз, пока температура контактирующих поверхностей увеличится всего лишь на один градус Цельсия. Скорость изменения

температуры будет менее инерционным и более чувствительным к состоянию трибосопряжения параметром.

Так как температура является характеристикой внутренней энергии вещества, первая производная от нее будет иметь физический смысл мощности. Тогда она будет хорошо сочетаться с электрической мощностью и с виброскоростью, что позволит создать комплексный диагностический параметр, эффективно решающий задачи оценки технического состояния фрикционного контакта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст]/ К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
2. Подмастерьев, К.В. Математическая модель диагностического параметра электрического сопротивления [Текст]/ К.В. Подмастерьев, С.В. Баранников // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – Орел: ОрелГТУ, 2000. – № 4. – С. 150-154.
3. Подмастерьев, К.В. Математическое моделирование электрического сопротивления фрикционного контакта при граничной смазке [Текст]/ К.В. Подмастерьев, В.В. Мишин, В.В. Марков // Сб. тр. МНТК «Приборостроение-2005». – Винница-Ялта, 2005. – С. 19-24.
4. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения [Текст]/ Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
5. Кончиц, В.В. Триботехника электрических контактов [Текст]/ В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 256 с.
6. Демкин, Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология [Текст]/ Н.Б. Демкин // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.
7. Мышкин, Н.К. Контакт шероховатых тел и его проводимость [Текст]/ Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. / Н.К. Мышкин // Трение и износ. – 1983. – Т. 4. – № 5. – С. 845-853.
8. Рыжов, Э.В. Контактная жесткость деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966. – 194 с.
9. Мишин, В.В. Метод и средства диагностирования подшипниковых узлов с учетом макрогеометрии дорожек качения: Дисс. канд. техн. наук [Текст]. – Орел: 2000. – 265 с.
10. Пахолкин, Е.В. Моделирование и теоретическое исследование влияния локальных дефектов рабочих поверхностей трибосопряжения на состояние смазочного слоя в зоне трения (на примере подшипника качения) [Текст]/ Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение.– Орел: ОрелГТУ, 2003. – № 3. – С 71-74.
11. Бальмонт, В.Б. Опоры качения приборов [Текст]/ В.Б. Бальмонт, В.А. Матвеев – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.

### **Марков Владимир Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-76

E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

УДК 620.179.1.082.7.05; 53.082.72/.78

Е.В. ПАХОЛКИН, Е.В. АНЦИФОРОВА

## МОНИТОРИНГ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С РЕМОНТНО- ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ СОСТАВАМИ

*Работа содержит описание современного состояния в области мониторинга процессов ремонтного восстановления трибосопряжений. Предложен метод для решения проблемы. Приводятся обоснование метода трибодиагностики и его достоинства. Даны результаты предварительных экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность предлагаемого решения. Указаны перспективные направления использования результатов исследования.*

*Work contains the description of a current environment in diagnostics of friction pair repair restoration processes. The method for the problem decision is offered. Are resulted a method substantiation tribodiagnosics and its advantages. The results of preliminary experimental researches confirming efficiency of the offered decision are yielded. Perspective directions of use of results of research are specified.*

### ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Критический уровень износа оборудования в самых различных отраслях определяет существование повышенного научно-практического интереса к проблеме восстановления противоизносными ремонтно-восстановительными составами (РВС) рабочих поверхностей деталей трибосопряжений (подшипники, зубчатые колеса, детали двигателей, узлы технологического оборудования, детали автомобильной, сельскохозяйственной техники и т.п.). Имеющийся в России и за рубежом практический опыт показывает, что использование подобных добавок к смазочным материалам многократно снижает затраты на ремонт, профилактику и восстановление объектов. Широкое внедрение данных технологий, которые относят к нанотехнологиям, связывают с возможностью достижения глобальных экономических эффектов.

Физический принцип, который положен в основу действия РВС, – формирование на трущихся поверхностях деталей слоев с особыми физико-механическими свойствами, обеспечивающими эффект безызносности. Наиболее распространенными РВС являются природные минералы, например, наночастицы серпентинитов. Введение РВС в смазочные материалы (жидкие или пластичные) приводит к модифицированию поверхностей трения, существенному изменению исходного профиля тела на уровне микрогеометрии и, следовательно, изменению условий трения. В практическом аспекте эти изменения связывают, прежде всего, со снижением трения, с уменьшением потерь энергии или топлива, с увеличением ресурса технических объектов, со снижением затрат на ремонт и техническое обслуживание, с улучшением экологических показателей двигателей внутреннего сгорания, со снижением шума и вибрации.

Сдерживание широкого практического внедрения прогрессивных РВС-технологий связано с научно-технической проблемой: предлагаемые методики восстановления поверхностей трибосопряжений базируются, в основном, на опытных данных производителей восстановительных составов. Лишь немногие из производителей ведут полномасштабные научные исследования по применению РВС. При этом в настоящее время известно не только о положительном эффекте применения РВС-технологий. Имеется информация (в том числе и от производителей данных материалов), что несоблюдение методик использования составов может привести к отрицательному эффекту: ресурс

технического объекта существенно снижается.

Представленные в данной работе исследования в целом направлены на разработку научно обоснованных методов и средств трибомониторинга нанотехнологий ремонтного восстановления трибосопряжений. Федеральное агентство по науке и инновациям в «Концепции развития в РФ работ в области нанотехнологий до 2010 года», давая определение нанотехнологиям, делает акцент на том, что «*этот термин охватывает также методы диагностики, характерологии и исследований ...*». Оценка эффектов от использования РВС в настоящее время в большинстве случаев определяется опытным путем (в промышленности – на основании снижения энергопотребления, расхода горюче-смазочных материалов, снижения шума и вибрации, увеличения межремонтных интервалов и т.п.). Основными методами исследования в нанотехнологиях в настоящее время являются такие методы, как сканирующая туннельная микроскопия и атомно-силовая микроскопия, спектроскопия, рентгеновские методы с использованием синхротронного излучения, электронная микроскопия высокого разрешения. Появление и развитие этих методов связывают с появлением нового направления – нанотрибологии, которая изучает природу микроконтактов. Тем не менее, данные методы, очевидно, мало пригодны для создания диагностического обеспечения рассматриваемых процессов при их практическом применении в промышленности, сельском хозяйстве и т.п., особенно, если речь идет о средних и мелких субъектах хозяйственной деятельности. Таким образом, можно констатировать отсутствие в настоящее время методов и средств, адаптированных для создания диагностического обеспечения РВС и РВС-технологий, что определяет актуальность описываемого в данной работе исследования.

#### **ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ**

Альтернативой методам нанотрибологии при решении рассматриваемой задачи могут служить электрические методы трибомониторинга благодаря их функциональным возможностям. Данные методы основаны на использовании в качестве информативных (диагностических) параметров различных характеристик флуктуирующих при работе трибосопряжения электрических параметров – сопротивления, проводимости, емкости, ЭДС и т.п. К достоинствам электрических методов относят универсальность (решение задач трибометрии, трибодиагностики, испытаний, контроля и прогнозирования), безынерционность по отношению к протекающим во фрикционном контакте процессам, простоту реализации (электрический сигнал о состоянии объекта контроля поступает непосредственно из зон трения его деталей, легко преобразуется, обрабатывается и оценивается). Важнейшим достоинством также является высокая чувствительность электрических методов при оценке качества рабочих поверхностей трибосопряжений. Наконец, сравнительная простота технических средств, определяющая их невысокую стоимость, является существенным преимуществом по сравнению с другими методами решения проблемы.

#### **ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Мониторинг процессов ремонтного восстановления трибосопряжений осуществлялся с использованием диагностического параметра – нормированное интегральное время электрического контактирования (НИВ) [1].

*Использованное оборудование:* универсальный стенд для диагностирования подшипников [2], обеспечивающий вращение внутреннего кольца подшипника с частотой  $2700 \text{ мин}^{-1}$ , радиальное нагружение 200 Н, медленную обкатку наружного кольца с периодом от 15 до 45 с; измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 (ТУ 4276-195-02069036-2005) [3]; персональный компьютер.

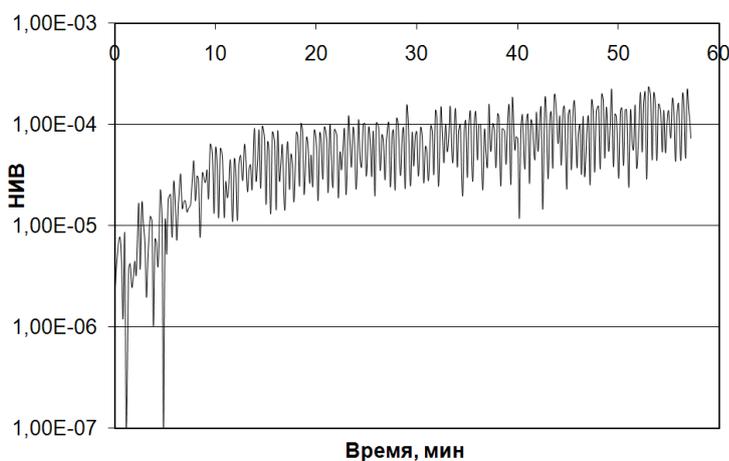
*Объекты ремонтного восстановления:* подшипник 208 с естественным износом

рабочих поверхностей деталей (бывший в эксплуатации); подшипник 113 с искусственно ухудшенным состоянием рабочей поверхности наружного кольца (метод травления, обеспечивающий имитацию следов коррозии).

*Используемые смазочные материалы:* пластичный смазочный материал (литол); смазочная ремонтно-восстановительная композиция «Супротек».

*Алгоритм экспериментов по каждому подшипнику включает следующие процедуры:* промывку подшипника; внесение пластичного смазочного материала без РВС; предварительную обкатку подшипника с мониторингом его начального состояния; промывку подшипника; внесение смазочного материала с 10% смазочной ремонтно-восстановительной композиции; обкатку подшипника с мониторингом изменения качества рабочих поверхностей; обработку результатов измерения диагностического параметра НИВ с целью определения изменений качества рабочих поверхностей подшипника.

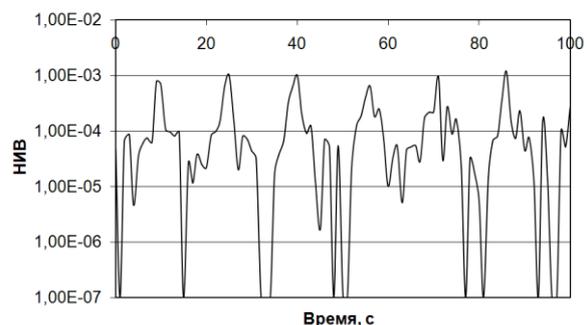
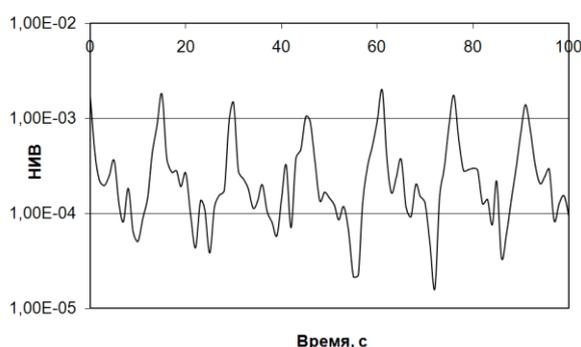
На рисунке 1 представлен график изменения диагностического параметра, измеренного в процессе предварительной обкатки подшипника 208.



*Условия обкатки:* частота вращения внутреннего кольца –  $2700 \text{ мин}^{-1}$ ,  
наружного –  $4 \text{ мин}^{-1}$ ;  
время измерения (дискретизации) параметра –  $10 \text{ с}$ ; среднее установившееся значение НИВ:  $1,05 \cdot 10^{-4}$ ; суммарное время обкатки на момент завершения данного эксперимента –  $3 \text{ ч}$

**Рисунок 1** – Фрагмент мониторинга обкатки подшипника 208

Существенный разброс результатов измерения относительно среднего значения позволил выдвинуть гипотезу о неоднородном качестве рабочей поверхности наружного кольца. Гипотеза была подтверждена при реализации алгоритма поиска локальных дефектов [4]. Результат сканирования наружного кольца показан на рисунке 2.



*Условия обкатки:* частота вращения внутреннего кольца –  $2700 \text{ мин}^{-1}$ ,  
наружного –  $4 \text{ мин}^{-1}$ ; время измерения (дискретизации) параметра  $1 \text{ с}$ ;

*пиковое значение НИВ:*  $1,98 \cdot 10^{-3}$ ;  
*минимальное значение НИВ:*  $1,6 \cdot 10^{-5}$ ;  
*продолжительность обкатки на момент завершения данного эксперимента* –  $1,1 \text{ ч}$

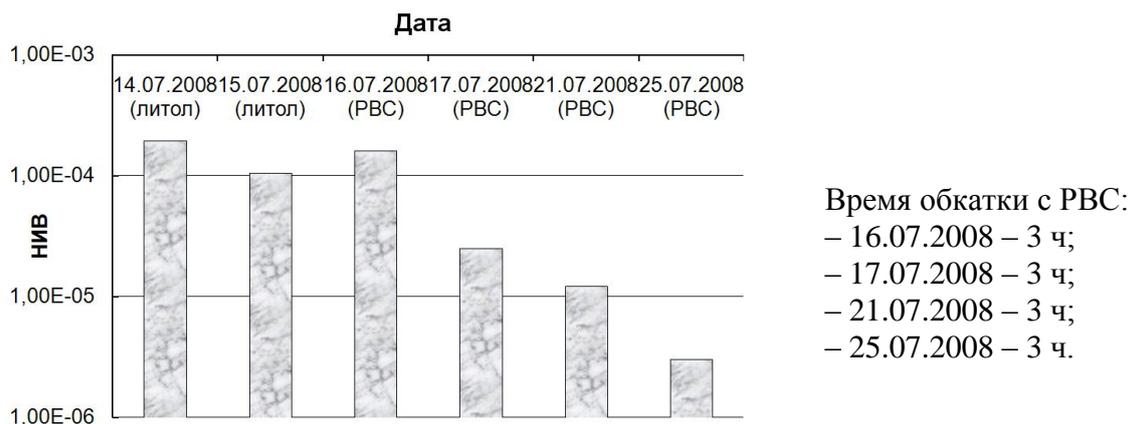
*пиковое значение НИВ:*  $1,19 \cdot 10^{-3}$ ;  
*минимальное значение НИВ:*  $1 \cdot 10^{-7}$ ;  
*продолжительность обкатки на момент завершения данного эксперимента* –  $3,1 \text{ ч}$

**Рисунок 2** – Результаты сканирования наружного кольца подшипника 208

Из рисунка 2 видно, что участки рабочей поверхности, которые изначально характеризовались сравнительно лучшим качеством, подверглись приработке, в результате чего уровень диагностического параметра для этих участков снизился более чем на два порядка (уровень параметра  $10^{-7}$  – минимально возможный при длительности измерения 1 с). Для участков рабочей поверхности, обладающих худшим качеством, обкатка в течение 3,1 ч. не дала подобных результатов: пиковое значение параметра (для представленных фрагментов) снизилось от  $1,98 \cdot 10^{-3}$  до  $1,19 \cdot 10^{-3}$ , то есть незначительно. Выполненный после промывки подшипника визуальный осмотр подтвердил наличие участков со следами изнашивания, требующих ремонтного восстановления.

После внесения смазочной композиции, содержащей РВС, подшипник подвергался обкатке в течение четырех дней. При этом суммарное время работы подшипника составило около 12 часов.

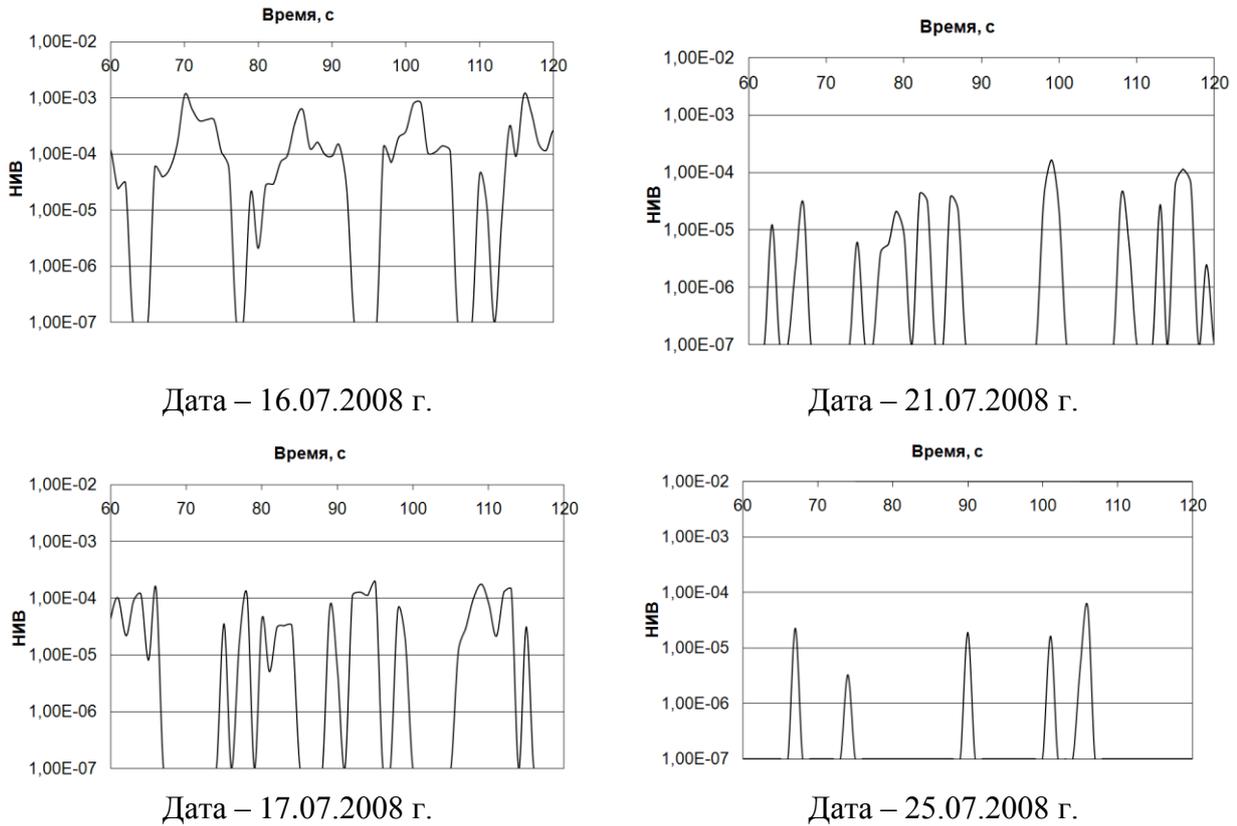
На рисунке 3 показано изменение среднего уровня диагностического параметра по дням эксперимента. Анализ рисунка 3 показывает, что результатом предварительной обкатки подшипника стало незначительное снижение среднего уровня параметра НИВ от  $1,96 \cdot 10^{-4}$  до  $1,05 \cdot 10^{-4}$ . Данное изменение можно признать несущественным. После внесения РВС (дата – 16.07.2008) и обкатки в течение 3 ч. уровень параметра увеличился, что вполне объяснимо, исходя из принципа действия РВС [5].



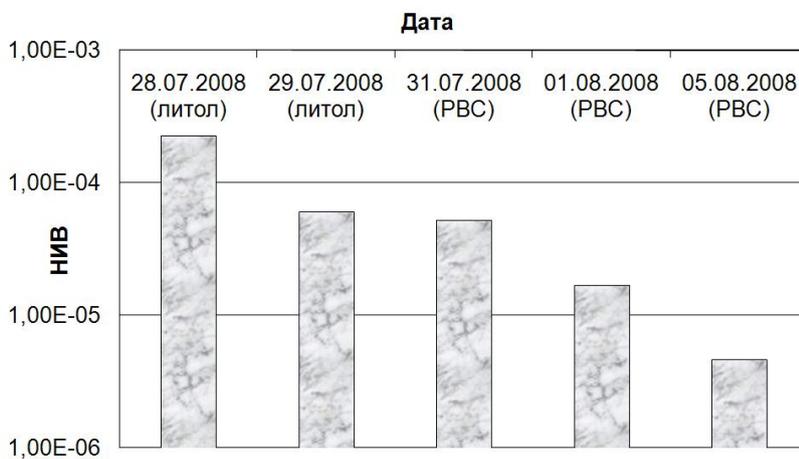
**Рисунок 3** – Изменение уровня диагностического параметра, вызванное улучшением качества рабочих поверхностей деталей подшипника 208

Дальнейшая обкатка подшипника сопровождалась монотонным снижением параметра НИВ, объясняемым улучшением качества трущихся поверхностей. На момент окончания эксперимента НИВ снизился до значения  $3,02 \cdot 10^{-6}$ , т.е. практически на два порядка. Сканирование поверхности наружного кольца, иллюстрируемое рисунком 4, также подтвердило заметное улучшение его качества.

Результаты аналогичного исследования, проведенные с подшипником 113, представлены на рисунке 5. Время предварительной обкатки без РВС составило примерно 5 ч. В результате средний уровень параметра НИВ снизился от  $2,3 \cdot 10^{-4}$  до  $6,01 \cdot 10^{-5}$ . Как и в предыдущем эксперименте, непосредственно после внесения РВС заметного улучшения качества подшипника не выявлено. Однако в течение последующих 8 ч. обкатки выявлено такое же монотонное снижение параметра НИВ. На момент окончания эксперимента среднее значение параметра уменьшилось до  $4,7 \cdot 10^{-6}$ , т.е. более чем на порядок.



*Рисунок 4 – Фрагменты (по 60 с) результатов измерения НИВ при сканировании наружного кольца подшипника 208*



Время обкатки с PBC:  
 – 31.07.2008 – 2,5 ч;  
 – 01.08.2008 – 2,5 ч;  
 – 05.08.2008 – 5 ч.

*Рисунок 5 – Изменение уровня диагностического параметра, вызванное улучшением качества рабочих поверхностей деталей подшипника 113*

**ВЫВОДЫ**

1. Эффективность применения электрического метода трибомониторинга при исследовании процессов ремонтного восстановления деталей с помощью PBC подтверждена экспериментально.
2. Выявлена высокая чувствительность диагностического параметра НИВ к изменению характера микрогеометрии рабочих поверхностей подшипников в процессе их ремонтного восстановления.

3. Перспективные результаты исследований представляют научную основу для проведения ОКР по разработке и производству технических средств диагностирования, а также основу для ОТР в области разработки процессов технического обслуживания и ремонта объектов, содержащих узлы трения. Результаты могут служить основой для совершенствования существующих методик, инструкций, руководств и т.п., используемых при эксплуатации и ремонте объектов, содержащих узлы трения.

4. Совокупность электрических методов и технических средств трибодиагностики при условии их адаптации к решаемой проблеме может служить основой диагностического обеспечения РВС-технологий.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст]. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.

2. Подмастерьев, К.В. Исследование эксплуатационных свойств смазочных материалов электрическими методами [Текст]/ К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, Н.А. Сотникова // Славянтрибо-6. Интегрированное научно-техническое обеспечение качества трибообъектов, их производства и эксплуатации: Материалы международного научно-практического симпозиума: В 2 т. – Рыбинск: РГАТА, 2004. – Т.2.

3. Подмастерьев, К.В. Измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 [Текст]/ К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, В.В. Мишин // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 11. – С. 7-8.

4. Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства поиска локальных дефектов опор качения [Текст]/ К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Дефектоскопия. – 1998. – №8.

5. Описание действия состава «Супротек» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.suprotec.ru/index.php?id=2>.

### **Пахолкин Евгений Васильевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-76

E-mail: [Eugene\\_P@bk.ru](mailto:Eugene_P@bk.ru)

### **Анцифорова Елена Владимировна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Студентка

Тел. (4862) 41-98-76

E-mail: [ele-anciforova@yandex.ru](mailto:ele-anciforova@yandex.ru)

## ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНИХ ПОЛЕЙ

*Рассматриваются приборы для исследования коэффициента трения при воздействии на контакт металлических тел электрического тока, магнитного поля и вибрации.*

*Devices for research of factor of friction are considered at influence on contact of metal bodies of an electric current, a magnetic field and vibration.*

Согласно молекулярно-механической теории трения, разработанной И.В. Крагельским [1] и его учениками, предложено рассчитывать силы трения путем суммирования сопротивлений, возникающих от молекулярного и механического взаимодействия на отдельных площадках контакта

$$F = \tau_{\text{мол}} A_{\text{мол}} + \tau_{\text{мех}} A_{\text{мех}},$$

где  $\tau_{\text{мол}}$ ,  $\tau_{\text{мех}}$  – удельные молекулярные и механические взаимодействия или силы трения;  $A_{\text{мол}}$ ,  $A_{\text{мех}}$  – фактическая площадь молекулярных и механических контактов.

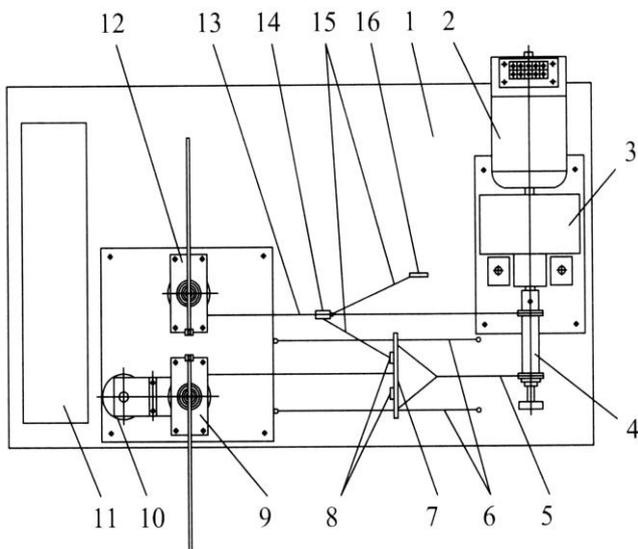
Следовательно, общий коэффициент трения  $F$  складывается из молекулярной составляющей  $F_{\text{мол}}$  и механической  $F_{\text{мех}}$  составляющей

$$F = F_{\text{мол}} + F_{\text{мех}}.$$

Увеличивать или уменьшать молекулярную составляющую коэффициента трения можно путем воздействия на физико-химическое состояние контактирующих поверхностей.

Для проведения исследований коэффициента трения  $F_{\text{мол}}$  в паре металл-металл при внешних физических воздействиях (электрического тока, магнитного потока) на кафедре «Локомотивы» Брянского государственного технического университета при участии автора разработан комплекс приборов [2, 3, 4], рассмотрению которых и посвящена настоящая статья.

Рисунки 1 и 2 поясняют принцип действия установки для исследования  $F_{\text{мол}}$ . На общем основании 1 (рисунок 1) установлены трибометрические устройства 9. Одношариковый трибометр 5 посредством троса связан с тензобалочкой 7 и приемным валиком 4. Последний приводится во вращение через понижающий редуктор 3 электродвигателем 2 постоянного тока с независимым возбуждением. Тензобалочка 7 опирается и скользит по направляющим 6. Для уменьшения сил сопротивления движению тензобалочки 7 от соединительных проводов 15 компенсационного датчика 16 используется устройство 12, аналогичное трибометрическому устройству 9. Движение соединительных проводов 15 происходит по вспомогательному тросику 13 синхронно с движением тензобалочки 7. Посредством втулки 14 провода закрепляются в определенном месте вспомогательного тросика 13.



**Рисунок 1** – Общий вид стендовой установки для исследования трибологических характеристик пары колесо-рельс

независимым возбуждением. Тензобалочка 7 опирается и скользит по направляющим 6. Для уменьшения сил сопротивления движению тензобалочки 7 от соединительных проводов 15 компенсационного датчика 16 используется устройство 12, аналогичное трибометрическому устройству 9. Движение соединительных проводов 15 происходит по вспомогательному тросику 13 синхронно с движением тензобалочки 7. Посредством втулки 14 провода закрепляются в определенном месте вспомогательного тросика 13.

Основной частью установки является трибометрическое устройство (рисунок 2), на основании 1 которого через изоляционную прокладку 2 установлена нижняя опорная плита 3. На нижней 3 и подвижной верхней 6 опорных плитках в направляющих обоймах 10 устанавливаются испытуемые образцы 11, между которыми помещается одношариковый трибометр 5 (полированный шарик из стали ШХ15, закреплен в специальную дисковую обойму из немагнитного материала с кольцевым пазом). Испытуемые образцы 11 с помещенным между ними одношариковым трибометром 5 сжимаются под действием вертикальной нагрузки, которая создается штоком 7 под воздействием нагрузочного рычага 9. Необходимые значения вертикальной сжимающей силы задаются изменением массы грузов на конце рычага 9.

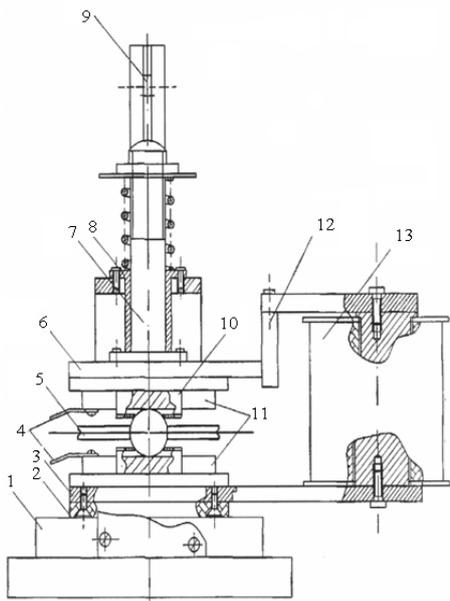


Рисунок 2 – Трибометрическое устройство

верхнюю подвижную плиту 2 и неподвижную нижнюю плиту 4, на которых устанавливаются испытуемые образцы 3, для поворота индентора 6 вокруг своей оси используется рычаг индентора 10.

На рычаг посредством гибкой связи 8, охватывающей рычаг индентора по дуге, воздействует нагрузка, создаваемая электродвигателем 7. Усилия, нагружающие рычаг, измеряются при помощи тензобалки 9. Центр дуги рычага индентора 10 совпадает с центром индентора, что обеспечивает постоянство плеча приложения нагрузки к рычагу в процессе его поворота и, следовательно, постоянство прикладываемого к индентору крутящего момента. Для создания в зоне контакта магнитного поля устройство снабжено магнитопроводом 11 с находящейся на нем электромагнитной катушкой 12. Нижний держатель 4 изолирован от корпуса 1 изоляционной пластиной 5. Магнитопровод 11 плотно соприкасается с держателями 4, образуя общий контур для прохождения магнитного потока через образцы 3.

При проведении исследований два плоскопараллельных образца 3 закрепляются в пластинах 2 и 4. Между ними устанавливается оправка с индентором 6. Нагрузочный рычаг

Для создания магнитного потока на нижней опорной плите 3 установлена электромагнитная катушка 13, связанная посредством магнитопровода 12 с верхней подвижной плитой 6. Постоянный ток через токоподводящие контакты 4, укрепленные на испытуемых образцах 11, подается от аккумуляторной батареи. В состав измерительной аппаратуры 11 (рисунок 1) входят стабилизированный источник питания ВИП-010, тензоусилитель ТУП-12, осциллограф НО 715, амперметр типа М 2016, измерительный комплект К505.

В описанном устройстве реализуется схема трения вращения, при этом в зоне контакта распределение скоростей неравномерно, они изменяются от 0 до  $V_{max}$ . В расчетную формулу входит радиус отпечатка, поэтому необходимо измерять отпечаток на плоских образцах, что вносит дополнительные погрешности при определении молекулярной составляющей коэффициента трения

Для исследования режима трения качения со скольжением разработано устройство, представленное на рисунке 3. Оно содержит корпус 1, подвижную втулку 15,

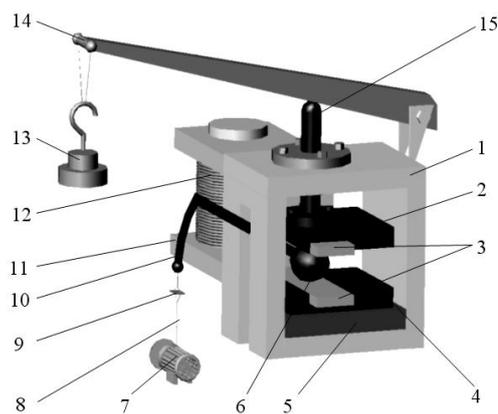
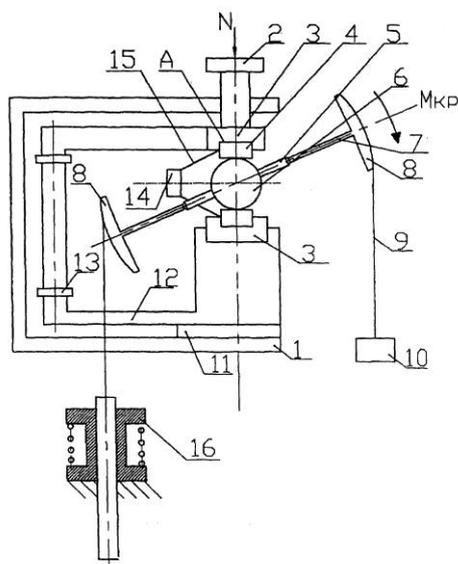


Рисунок 3 – Прибор для исследования режима трения качения со скольжением

14 воздействует на подвижную втулку 15. Изменяя массу грузов 13 на конце рычага 14, можно получить необходимые значения вертикальной сжимающей образцы силы. К электромагнитной катушке 12 подводится переменное или постоянное напряжение, тем самым создается магнитное поле. Для пропускания электрического тока через образцы используется аккумуляторная батарея.

К индентору прикладывают крутящий момент, необходимый для равномерного поворота его в плоскости, перпендикулярной опорным плоскостям держателей, т.е. в плоскости сжимающей образцы нагрузки. По измеряемым значениям момента и нагрузки определяют молекулярную составляющую коэффициента трения.

Для совместного исследования вибрационной нагрузки, электрического тока и магнитного поля разработан прибор, схема которого показана на рисунке 4. Он содержит корпус 1, механизм нагружения 2, установленные друг против друга с возможностью сближения держатели 3 образцов 4 с параллельными опорными плоскостями А, один из которых взаимодействует с механизмом нагружения 2. Между держателями 3 расположена оправка 5 с закрепленным в ней сферическим индентором 6. Механизм 7 поворота индентора вокруг своей оси выполнен в виде закрепленного в оправке 5 рычага с возможностью поворота в плоскости, перпендикулярной опорным поверхностям А держателей 3, с установленным неподвижно на другом его конце сегментом 5, дуга которого описана из центра индентора 6. Сегмент 8 охватывается по дуге гибкой связью 9, на которую воздействует нагрузка 10, что обеспечивает постоянство плеча приложения нагрузки к рычагу в процессе его поворота. Прибор оборудован магнитопроводом 12 с расположенной на нем электромагнитной катушкой 13, который образует вместе с держателями образцов 3, образцами 5 и сферическим индентором 6 общий магнитный контур. Прибор оборудован также источником тока 14, подключенным токоподводящими проводами 15 к образцам 4. Для создания магнитного потока через зону контакта нижний держатель 3 изолирован от корпуса 1 изоляционной прокладкой 11. Магнитопровод 12 плотно соприкасается с держателями 3, образуя общий контур для прохождения магнитного потока через образцы 4.



**Рисунок 4** – Прибор для совместного исследования вибрационной нагрузки, электрического тока и магнитного поля

Особенностью прибора является то, что механизм поворота индентора 7 выполнен в виде двулучевого рычага, каждое плечо которого одним концом жестко закреплено в оправке 5, а другие концы снабжены сегментами 8. При этом прибор оборудован вибрационным механизмом 16, воздействующим на свободную сторону двулучевого рычага посредством охватывающей сегмент на дуге гибкой связи, например, в виде электромагнитной катушки возбуждения с сердечником, соединенным гибкой связью с сегментом на свободной стороне двулучевого рычага.

При работе два плоскопараллельных образца 4 закрепляются в держателях 3. Между ними устанавливается оправка с индентором 6. При помощи механизма нагружения 2 образцы прижимаются друг к другу. Время выдержки образцов под нагрузкой должно быть достаточным для завершения пластической деформации в зоне контакта индентора с образцами и соответствовать стандартной пробе

Бринелля. Для создания магнитного потока к электромагнитной катушке 13 подводится переменное или постоянное напряжение. От источника 14 через провода 15 к образцам 4 подводится электрический ток. Подводится переменный ток в катушке возбуждения вибрационного механизма 16. Таким образом, на зону контакта индентора 6 с образцами 4 действуют внешние возмущения: механическая нагрузка, магнитный поток, электрический

ток и вибрационная нагрузка.

Измерение молекулярной составляющей коэффициента трения производится аналогично описанному выше устройству (рисунок 3).

Для повышения точности измерения коэффициента трения в условиях трения скольжения (качения) разработана установка, общий вид которой представлен на рисунке 5. Установка смонтирована на основании 3, на плите 2 укреплен приводной электродвигатель, на валу которого закреплено колесо 11. К вертикальной стойке 4 прикреплена тензобалочка 8, с наклеенным на ней тензорезистором 9, который служит для измерения силы трения между образцом 6 и колесом 11. К основанию 3 крепится тензобалка с тензорезистором (на рисунке 5 не показана). Тензобалка служит для создания и определения величины нажатия колеса 11 на образец 6, так как на нее воздействует нагрузочный винт 1, закрепленный на поворотной плите 2. Для создания магнитного поля используется электромагнитная катушка 12, находящаяся на магнитопроводе 7. Одним концом магнитопровод 7 крепится к вертикальной стойке 4, а другим касается торца колеса 11. Для уменьшения трения на конце магнитопровода 7 установлены два шарикоподшипника. Электрический ток подводится посредством токоподводящих клемм 5.

Для повышения точности измерения молекулярной составляющей коэффициента трения при наличии таких внешних факторов, как электрический ток, магнитный поток, и пульсирующей составляющей крутящего момента при одновременном действии качения со скольжением и верчением, предлагается другой прибор (рисунки 6 и 7).

Прибор содержит нижнее основание 1 (рисунок 6) с механизмом создания возвратно-вращательного движения держателей 2 и 8 образцов 7. Механизм состоит из шестерен 3 и 4, установленных в подшипниках 5 и приводимых в движение электродвигателем 6. Между образцами 7, установленными в нижний 2 и верхний 8 держатели с возможностью перемещения, через электроизоляцию 9 установлен сферический индентор 10. Индентор приводится во вращательное движение в плоскости, перпендикулярной плоскостям образцов 7, оправкой 11, один из концов которой через редуктор 12 соединен с двигателем 13. На другом ее конце, установленном в подшипнике 14 вертикальной стойки 15, расположен кулачок 16, контактирующий с подпружиненными роликами 17. Для нагружения образцов 7 осевым усилием имеется механизм 18, установленный на вертикальных стойках 19.

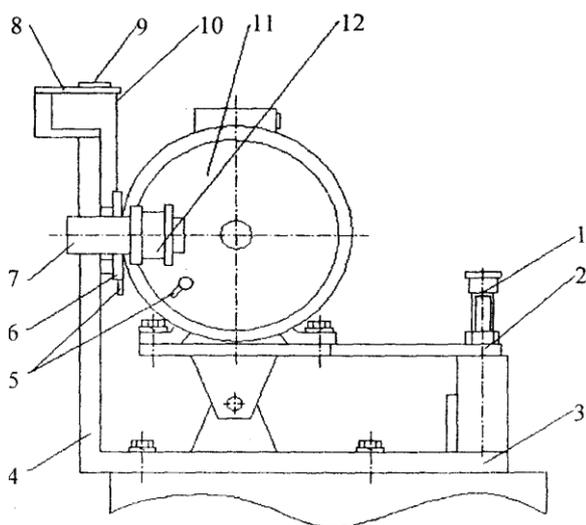


Рисунок 5 – Общий вид устройства

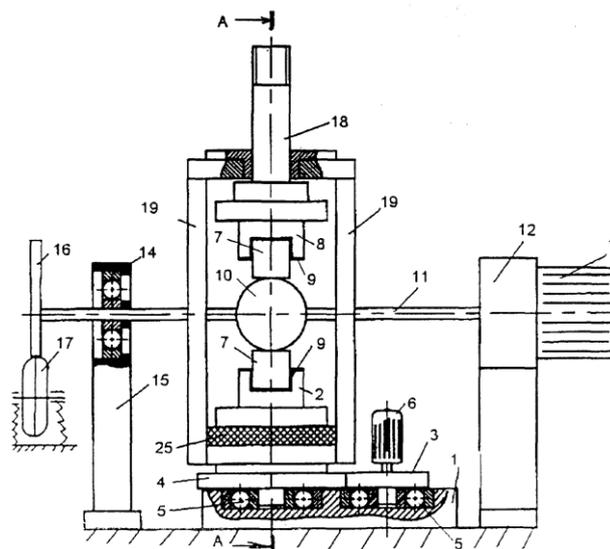


Рисунок 6 – Схема прибора

Образцы 7 подкреплены пружинами 20, упирающимися в ограничители 21, установленные на плиту 22 через электроизолирующие прокладки 23 (рисунок 7). Для создания в зоне контакта внешних воздействий прибор снабжен магнитопроводом 24 с находящейся на нем электромагнитной катушкой, а также источником тока. С целью создания магнитного потока через зону контакта, нижний держатель 2 изолирован от

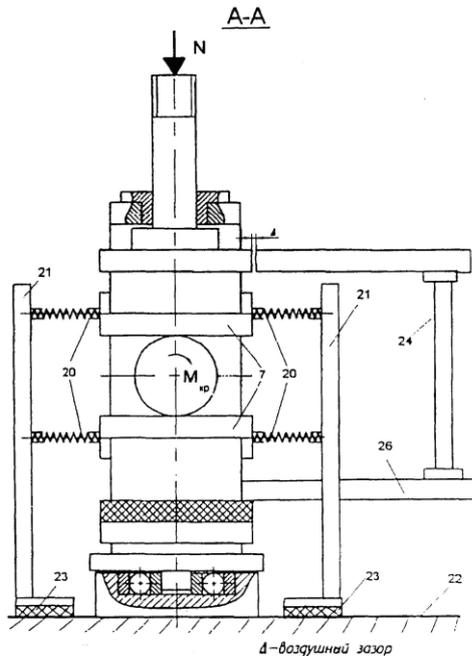


Рисунок 7 – Разрез А-А прибора (рисунок б)

шестерни 4 изоляционной прокладкой 25. Магнитопровод 24 плотно соприкасается с нижним держателем 2 через магнитный проводник 26, а с верхним 8 – через регулируемый воздушный зазор  $\Delta$ , образуя общий контур для прохождения магнитного потока через образцы 7.

В качестве иллюстрации работоспособности предложенных устройств и эффективности проводимых исследований на рисунках 8 и 9 представлены примеры характерных экспериментальных зависимостей, показывающих влияние силы тока и магнитного поля на силу трения в контакте. Зависимости получены на стендовой установке, выполненной согласно рисунку 1.

Анализ полученных данных указывает на существенное увеличение коэффициента трения при пропускании тока через контактную зону и на незначительное повышение этого коэффициента при воздействии магнитного поля в исследуемом диапазоне изменения тока в магнитной катушке.

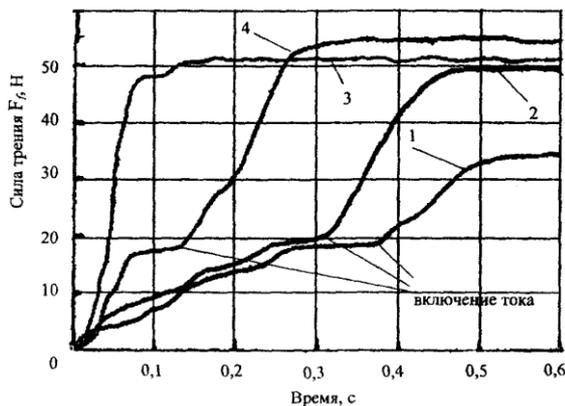


Рисунок 8 – Копии осциллограмм изменения силы трения  $F_f$  при нагрузке на контакт 250 Н:

- 1 – сила тока 100 А; 2 – сила тока 300 А;
- 3 – сила тока 250 А (ток включен сразу);
- 4 – сила тока 250 А

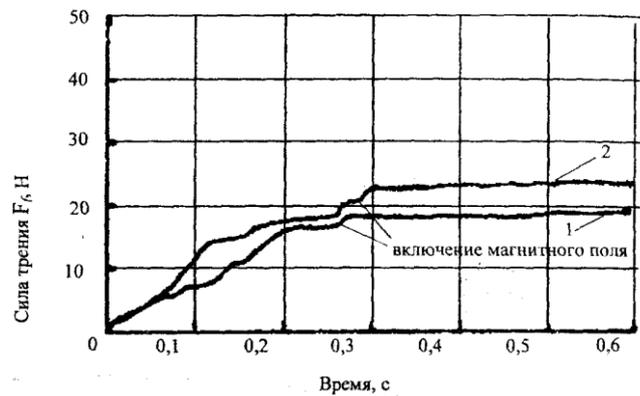


Рисунок 9 – Копии осциллограмм изменения силы трения  $F_f$  при нагрузке на контакт 250 Н:

- 1 – сила тока в магнитной катушке 10 А;
- 2 – сила тока в магнитной катушке 20 А

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст]/ И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. Пат. № 2315283 РФ. Прибор для определения молекулярной составляющей коэффициента трения [Текст]/ Г.В. Багров [и др.]. – Оpubл. 20.01.2008, Бюл. № 2.
3. Пат. № 2279664 РФ. Прибор для определения молекулярной составляющей коэффициента трения [Текст]/ В.И. Лемешко, Г.В. Багров [и др.]. – Оpubл. 10.07.2006, Бюл. № 19.
4. Пат. № 2315282 РФ. Прибор для определения молекулярной составляющей коэффициента трения [Текст]/ Г.В. Багров [и др.]. – Оpubл. 20.01.2008, Бюл. № 2.

**Багров Геннадий Викторович**

ФГУП «192 Центральный завод железнодорожной техники», г. Брянск

Директор

Тел. 8(4832)560261, 8(919)1928870

E-mail: [alexander-pugachev@rambler.ru](mailto:alexander-pugachev@rambler.ru)

В.В. КОНДРАТОВИЧ

## ОЦЕНКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ

*При проведении экспериментов исследовалось влияние материалов пары трения фрикционной муфты, давления и шероховатости на коэффициент трения покоя, коэффициент трения скольжения и износостойкость торцовых поверхностей трения.*

*At carrying out of experiments influence of materials of pair friction for frictional coupling, pressure and roughness on coefficient of static friction, coefficient of a sliding friction and wear resistance of surfaces of friction was investigated.*

Муфты сцепления и предохранительные муфты фрикционного типа нашли широкое применение на транспорте. Для эффективной работы муфты необходимо подобрать такие материалы пар трения, которые имели бы высокий коэффициент трения покоя и низкий коэффициент трения скольжения. При этом стабильность коэффициента трения должна быть высокой.

Условия проведения испытаний принимались исходя из анализа работы деталей с торцовыми поверхностями трения в типовых узлах трения, а именно в дисковых муфтах: сухое трение; скорость скольжения  $v = 1,2$  м/с; нагрузка на контробразец соответствовала номинальному давлению  $p = 0,3; 1; 3; 5$  МПа. В качестве образцов использовали цилиндрические заготовки диаметром 80 мм из материала сталь 65Г, полученные точением на токарно-винторезном станке с нанесением на торцовую поверхность металлокерамики. После нанесения металлокерамики торцовая поверхность образца подвергалась плоскому шлифованию периферией круга. Средние значения параметров шероховатости  $Ra$  после плоского шлифования составили: 0,16; 0,32; 0,63; 1,25; 2,5 мкм. Твердость металлокерамики составила 20...30 НРВ. Средний диаметр фрикционного диска составил 58,25 мм. Шероховатость и волнистость поверхностей образцов исследовались с помощью компьютеризированных систем, разработанных на кафедре «Технология машиностроения» УНТИ БГТУ.

Анализ профилограмм убедительно подтверждает правомерность подхода к оценке шероховатости поверхностей, как для компактных материалов, так и для деталей из порошковых материалов. Наличие пор следует учитывать при оценке триботехнических характеристик.

В качестве контртел использовали цилиндрические образцы диаметром 10 мм из материала сталь 65Г с закалкой до твердости 39-44 HRC, полученные точением на токарно-винторезном станке с последующим плоским шлифованием периферией круга торцевой поверхности. Средние значения параметров шероховатости  $Ra$  после плоского шлифования составили: 0,16; 0,32; 0,63; 1,25; 2,5 мкм.

Для проведения испытаний различных материалов использовалась автоматизированная система научных исследований (АСНИ) триботехнических характеристик, что позволило значительно сократить время на проведение экспериментов и обработку их результатов, устранить влияния субъективного фактора и снизить погрешности результатов измерений. Аппаратно-программный комплекс на базе ПК предназначен для визуализации, записи и обработки параметров испытаний. Система позволяет контролировать и обрабатывать в реальном времени следующие параметры испытания: нагрузку на образцы, момент трения, суммарный линейный износ. Для этой цели используются соответствующие датчики, усилители, плата сбора данных, программное обеспечение. Датчик нагрузки представляет собой упругий чувствительный элемент в виде

восьмигранника с наклеенными фольговыми тензорезисторами на пленочной основе КФ5П1-10-400 производства НПО «Веда», соединенными по мостовой схеме. В качестве датчика момента трения используется маятниковый моментомер машины трения. Чувствительность маятникового датчика регулируется с помощью набора сменных грузов. Для измерения угла отклонения маятника вместо примененного в базовом варианте машины трения самописца применен тензометрический датчик перемещения. Для измерения величины линейного износа в АСНИ применяется индуктивный датчик линейных перемещений Н-30 завода «Калибр» с точностью 0,1 мкм.

С целью исследования коэффициента трения покоя для различных материалов проведены испытания образцов на описанной выше АСНИ с нагружением до момента проскальзывания контробразца относительно испытуемого образца. Примеры характерных экспериментальных зависимостей коэффициента трения покоя от давления для пар трения «сталь – сталь» и «сталь – металлокерамика» при различной шероховатости поверхностей представлены на рисунках 1, 2. Аналогичные зависимости для коэффициента трения скольжения представлены на рисунках 3, 4.

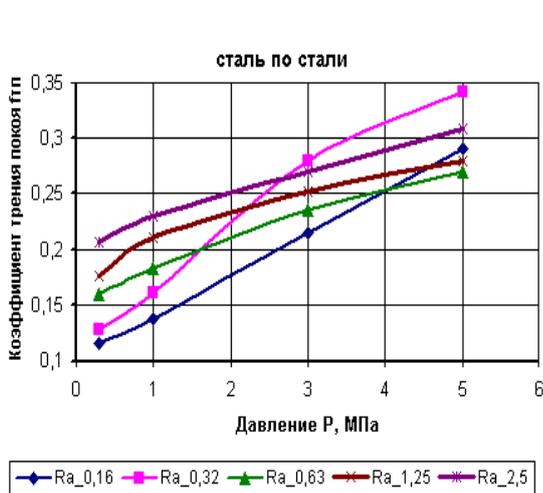


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента трения покоя от давления для сочетания материалов «сталь 65Г – сталь 65Г»

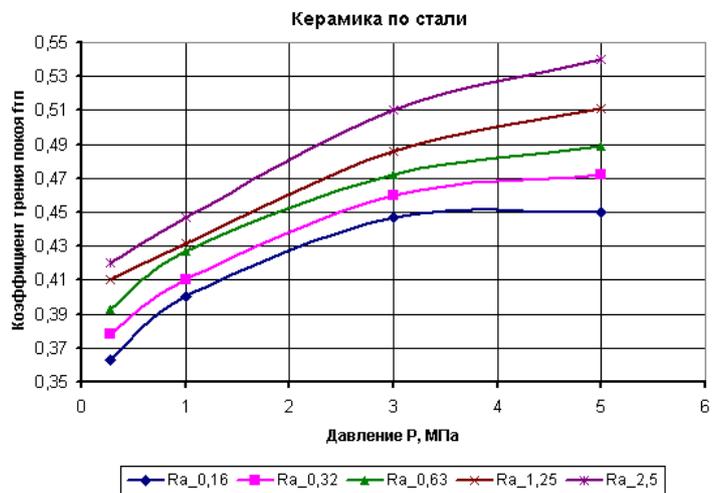


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента трения покоя от давления для сочетания материалов «сталь 65Г – металлокерамика»

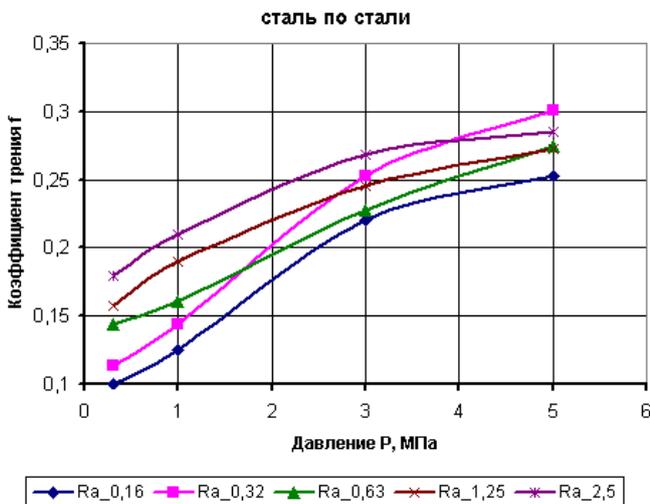


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента трения скольжения от давления для сочетания материалов «сталь 65Г – сталь 65Г»

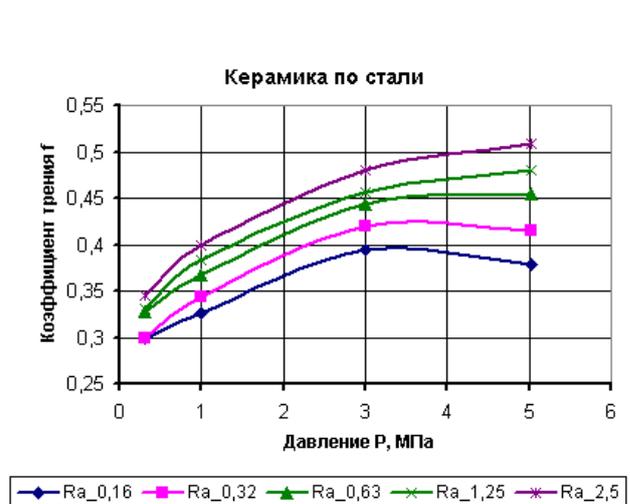


Рисунок 4 – Зависимости коэффициента трения скольжения от давления для сочетания материалов «сталь 65Г – металлокерамика»

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

– коэффициент трения скольжения на 10-25% меньше коэффициента трения покоя, но характер его изменения от давления, шероховатости и материала аналогичен характеру изменения коэффициента трения покоя;

– наибольшие изменения коэффициента трения покоя и коэффициента трения скольжения в зависимости от давления и шероховатости характерны для сочетания материалов «сталь – металлокерамика» с пропиткой.

Обработка результатов экспериментов позволила определить интенсивность изнашивания образцов в период нормального изнашивания. Интенсивность изнашивания оказалась равной  $2,74 \cdot 10^{-8}$  (для пары «сталь с шероховатостью  $Ra$  2,2 – металлокерамика»). Снижение шероховатости стальной поверхности до  $Ra$  0,18 привело к снижению интенсивности изнашивания до величины  $1,06 \cdot 10^{-8}$ . При этом интенсивность изнашивания пары трения «сталь с шероховатостью  $Ra$  0,18 – сталь с шероховатостью поверхности  $Ra$  0,18» составила  $1,88 \cdot 10^{-8}$ .

Установлено, что лучшее сочетание коэффициента трения и износа у пары «сталь 65Г – металлокерамика». Чем больше шероховатость для этого сочетания, тем выше износ, но, с другой стороны, и выше коэффициент трения скольжения и покоя.

Оптимальные сочетания коэффициентов трения и износа определены, когда шероховатость стальной поверхности  $Ra$  1,25. У поверхности с шероховатостью  $Ra$  выше 1,2 наблюдается повышенный износ (больше, чем у стали 65Г). В случае, когда  $Ra$  ниже 0,63, установлен недостаточный коэффициент трения покоя и скольжения для эффективной работы предохранительной муфты.

Таким образом, анализ полученных результатов сравнительных испытаний показывает, что предложенный фрикционный спеченный порошковый материал и разработанная технология его изготовления позволили обеспечить высокую износостойкость дисковой фрикционной муфты и приемлемые коэффициенты трения покоя и скольжения.

**Кондратович Вадим Валентинович**

ЗАО «Термотрон-завод», г. Брянск

Генеральный директор

Тел. (4832) 29-65-58

E-mail: [luba@termotron.ru](mailto:luba@termotron.ru)

УДК. 616.073

М.В. ЯКОВЕНКО, Б.А. ЕГОРОВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ АППАРАТНОГО КОНТРОЛЯ УДАРНОГО ОБЪЕМА В УСЛОВИЯХ КОСВЕННОГО ТОКОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НЕИЗОЛИРОВАННОГО СЕРДЦА

*Статья посвящена доказательству функциональной связи ударного объема с силой косвенно воздействующего на него электрического тока на основе проведенных ранее экспериментальных исследований и анализа известных теоретических моделей сердечнососудистой системы в аспекте разработки технически биоуправляемой физиоаппаратуры.*

*The report is devoted to the proof of functional linkage of systolic output with the strength of indirect influence of current on it that is based upon the formerly carried experimental studies and analysis of well-known theoretical model of heart-vascular system in terms of the development of technically biocontrolled instrumentation.*

**Актуальность.** Широкое и разнообразное применение электрического тока для восстановительного лечения (физиотерапия) обусловлено доказанными терапевтическими эффектами, простотой их технической реализации, а также возможностью локализации воздействия, в отличие от фармакологических методов.

Однако говорить о полной локальности воздействия и отсутствии воздействия на организм в целом, включая сердечнососудистую систему (ССС), было бы некорректно, хотя бы потому, что организм – это система, стремящаяся к гомеостазу, который нарушается при воздействии электрическим током. Если предположить, что косвенное воздействие электрическим током на пациента оказывает изменение в деятельности ССС, то, учитывая, что до 80% населения нашей страны подвержены сердечнососудистым заболеваниям, но лишь до 20-30% знают об этом, неконтролируемое изменение состояния ССС при проведении токовых процедур может привести к нежелательным последствиям, вплоть до летального исхода [1].

Контроль состояния сердца в процессе токовой физиотерапии в настоящее время не осуществляется из-за целого ряда причин:

1) известный в физиологии закон Франка-Старлинга, объясняющий приспособительную функцию сердца к внешним воздействиям, применим лишь для изолированного сердца и в условиях изолированного сердца, т.е. в реальных условиях не формализован;

2) невозможно совместно использовать стандартную токовую физиоаппаратуру и стандартную электрокардиоаппаратуру по техническим и медицинским ограничениям;

3) использование не электрических методов контроля состояния ССС, таких как рентгеноскопия, эхотомография и т.д. в массовом процессе обслуживания пациентов в условиях неклинических стационаров имеет очевидную сложность и дороговизну;

4) существующие модели ССС в отношении описания процессов изменения состояния ССС под действием внешних токовых нагрузок недостаточно достоверны.

Проведенные на кафедре ПМиС ОрелГТУ исследования реакции ССС в ответ на токовое физиотерапевтическое воздействие позволили доказать наличие качественной зависимости между величиной воздействующего тока физиотерапевтического диапазона (0-50 мА) и изменением показателей ССС, в частности, ударного объема крови (SV) [2, 3]. Вместе с тем, теории классической биомеханики кровообращения, классической

гидродинамики, информационно-энергетического взаимодействия объектов живой и не живой природы и т.д. не объясняют причины возникновения обнаруженного эффекта, следовательно, проведение теоретических исследований по данному направлению является актуальным.

Целью данной работы является теоретическое доказательство взаимосвязи величины воздействующего тока и изменения УО, выявление основных факторов, влияющих на изменение УО, разработка модели ССС, объясняющей обнаруженные экспериментальным путем эффекты. Результаты теоретических исследований должны быть представлены в форме, удобной для практического применения при разработке соответствующей биоуправляемой аппаратуры.

В ходе анализа известных моделей ССС [1, 4, 5] выяснено, что наиболее полное ее описание предложено в работе [5] А.П. Прошина и Ю.В. Солодянникова. За основу ими взято следующее. ССС представляется в виде замкнутой гидравлической системы, состоящей из резервуаров и магистралей, рисунок 1.

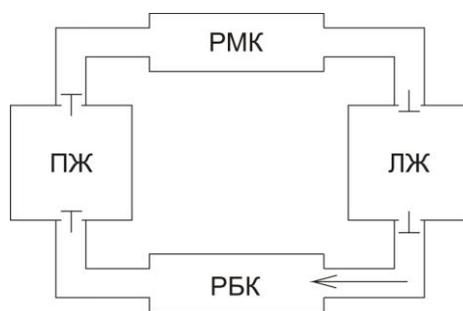


Рисунок 1 – Гидравлическая система кровообращения

Резервуарами являются ЛЖ – левый желудочек сердца и левое предсердие, РБК – артериальный и венозный резервуары большого круга кровообращения, ПЖ – правый желудочек сердца и правое предсердие, РМК – артериальный и венозный резервуары малого круга кровообращения. Система клапанов обеспечивает однонаправленное движение тока крови, обозначенное стрелкой на схеме, по этой кольцевой системе. Магистрали соединяют резервуары между собой.

Очевидно, что параметры, описывающие резервуары, не являются константами, они изменяются под действием управляющих сигналов, которые, в свою очередь, формируются в результате изменения функций вектора состояния системы. Таким образом, имеем объект контроля, управляемый двумя основными контурами.

1-й контур – контур управления ударным выбросом желудочков  $SV$ , где реализуется принцип *регуляции сердечного выброса* в полном соответствии с законом Франка-Старлинга. Управляющим параметром здесь является величина систолического давления в желудочках.

2-й контур – контур *информационного управления*, реализует многообразные взаимозависимости состояний системы кровообращения, опосредованные через нервную и гормональную подсистемы организма. Управляющим сигналом в этом контуре является величина комплексного нервно-гуморального фактора  $\gamma$ -фактора, являющегося численным выражением суммарного сигнала управляющего воздействия

$$SV = k_i \delta(V_i), \quad (1)$$

где  $\delta$  – функция, определяющая зависимость ударного объема от значения конечного диастолического объема желудочка

$$\delta(V_i) = \frac{n_i}{1 + \beta_1 e^{-\alpha(V_i - u_i)}} - \frac{n_i}{1 + \beta_2 e^{-\alpha(V_i - u_i)}}; \quad (2)$$

$k_i$  – инотропный коэффициент желудочка представляется функцией двух переменных – инотропного состояния желудочка  $k_{i0}$  и функции нервно-гуморального  $\gamma$ -фактора

$$k_i = k_{i0} + 0,25\delta(k_{i0})\sigma(\gamma), \quad (3)$$

где единичное частное состояние  $\gamma$ -фактора по симпатическому каналу может определяться внешними факторами возбуждения системы.

Посредством функции симпатической инотропной чувствительности миокарда  $k_i$  возможно варьировать величину ударного объема крови в широких диапазонах. В свою очередь, единичное частное состояние  $\gamma$ -фактора по симпатическому каналу может определяться внешними факторами возбуждения системы. На основании этого можно предположить, что ударный объем крови изменяется, и значительно, от воздействия электрическим током на организм человека. Кроме того однозначно определено, что величина ударного объема крови будет определять артериальное давление в магистральных сосудах, однако по зависимости, которую необходимо исследовать экспериментально.

С другой стороны, обработка результатов экспериментальных исследований изменения зависимости  $SV$  от тока с использованием известной эмпирической формулы Старра, применяемой в разработке искусственного сердца, а также с учетом механизма регуляции Франка-Старлинга, позволила получить зависимость ударного объема от силы тока с приемлемой для использования в системах управления точностью [7]

$$SV = \left( SVn + \frac{dP_S + 2dP_D}{0,3 \cdot HR} \right) \cdot \left( \frac{i}{10} + 1,2 \right), \quad (4)$$

где  $dP_S$  – приращение систолического давления, мм.рт.ст.;

$dP_D$  – приращение диастолического давления, мм.рт.ст.;

$HR$  – частота сердечных сокращений, уд/мин;

$SVn$  – ударный объем крови в покое, мл;

$i$  – коэффициент тока.

Сравнивая выражения (3) и (4), можно сделать вывод, что в зависимости от величины  $i$  ( $\sigma(\gamma)$ ) изменение  $SV$  будет приводить к одному из известных в классической теории колебаний явлений – установлению периодического или аperiodического процессов, что согласуется с теоретической моделью. Так как процессы, происходящие в живом организме, носят аperiodический характер, что вполне согласуется с законом Франка-Старлинга, остается предположить, что  $i$  является возбуждающим фактором, выводящим ССС на режим аperiodической стабилизации, т.е. коэффициент  $i$  является нейрогуморальным фактором, принятым в рассматриваемой модели за  $\gamma$ -фактор.

Таким образом, на основании теоретических исследований, а также синтеза теоретических заключений и экспериментальных подтверждений, была получена зависимость, определяющая связь  $SV$  с внешним воздействующим фактором – силой тока, согласующаяся с теоретическими исследованиями.

Разработанную модель ССС следует считать механоэнергетической.

В дальнейшей работе выявлены критерии регулирования  $SV$  в условиях токового воздействия для каждого удара сердца. Такими критериями являются амплитудные выбросы и временные характеристики. Для разработки аппаратуры определены параметры переходной характеристики  $SV$  [7].

По результатам работы над поставленной задачей сделаны следующие выводы:

– развита теория механоэнергетической модели работы ССС;

– доказана количественная связь между косвенным воздействием тока физиотерапевтического диапазона и изменениями  $SV$ , получено математическое выражение,

функционально описывающее эту связь;

– разработаны основы математического аппарата метода контроля  $SV = f(P)$ , как часть общей научной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Техника и методика проведения физиотерапевтических процедур [Текст]: справочник; под ред. В.М. Боголюбова и Т.Н. Пономаренко // Тверь: Губернская типография. – 2002. – 250 с.
2. Егоров, Б.А. Предпосылки разработки биоуправляемой электромедицинской физиоаппаратуры [Текст]/ Б.А. Егоров, М.В. Яковенко, М.А. Евзельман; под ред. проф. С.П. Маркина // Проблемы восстановительного лечения: Сборник научных трудов. – Т.5. – Воронеж: Воронежская государственная медицинская академия, 2005.
3. Егоров, Б.А. Использование изменения ударного объема сердца человека для биоуправления физиоаппаратами [Текст]/ Б.А. Егоров, М.В. Яковенко // Сборник докладов 9-й Международной конференции «Медико-экологические информационные технологии – 2006». – Курск: Изд. КГТУ, 2006.
4. Парашин, В.Б. Биомеханика кровообращения [Текст]: учеб. пособие / В.Б. Парашин, Г.П. Иткин; под ред. С.И. Щукина // Москва: Издательство МГТУ им. Баумана – 2005.
5. Прошин, А.П. Математическое моделирование системы кровообращения и его практические применения [Текст]/ А.П. Прошин, Ю.В. Солодяников // Автоматика и телемеханика, Т. 67. – 2006 – № 2.
6. Лишук, В.А. Математические модели сердечнососудистой системы. [Текст]/ Итоги науки и техники. Бионика, биокибернетика, биоинженерия. – Т. 7. – М., ВИНТИ. – 1990.
7. Егоров, Б.А. Исследование динамических характеристик ударного объема крови в аспекте построения биоуправляемых физиоаппаратов [Текст]/ Б.А. Егоров, М.В. Яковенко // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2007 – № 3.

### **Яковенко Михаил Викторович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (0862) 41-98-76  
E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

### **Егоров Борис Александрович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (0862) 41-98-76  
E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

## ХРОНИКА

### 15-й МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС ПО ЗВУКУ И ВИБРАЦИИ

Среди мероприятий, организуемых Международным институтом акустики и вибрации (ПАН), наиболее впечатляющими являются ежегодные Международные конгрессы по звуку и вибрации (ICSV), которые проводятся с 1990 года. Очередной конгресс проходил с 6 по 10 июля в г. Дайджоне (Science City of Daejeon), Республика Корея, на базе Корейского института науки и технологии (Korean Advanced Institute of Science and Technology – KAIST).

Встреча в Дайджоне была организована в лучших традициях этих конгрессов: обширная научная программа, включающая шесть программных лекций, около 400 научных докладов, 39 экспозиций от 33 компаний из 9 стран, различные социальные и экскурсионные программы. В работе конгресса участвовали 405 ученых из 41 страны.

Данный конгресс был пятнадцатым в ряду успешных научных встреч, проходивших в разных странах мира (2007 – Австралия, 2006 – Австрия, 2005 – Португалия, ...), что характеризует действительно интернациональную природу ПАН.



*Докладывает проф. Ю. Степанов*



*В эфире проф. Ю. Степанов*

Институт является некоммерческим международным научным обществом, основанным в начале 90-х годов, объединяющим ученых и научные общества многих стран. Институт содействует развитию наук об акустике и вибрациях и оказывает всестороннюю поддержку всем, кто специализируется в этих науках и их приложениях. Институт издает на английском языке реферируемый «Международный журнал по акустике и вибрациям» (ПАН) и ежегодный дайджест научных работ в этих направлениях. В настоящее время президентом ПАН является профессор Луис Бенто Коэльо (Португалия) и исполнительным директором – профессор Малколм Крокер (США). Издательский центр ПАН возглавляет профессор Балтийского государственного технического университета Н.И. Иванов (Санкт-Петербург). Всю информацию относительно ПАН и ПАН можно найти по адресу: <http://www.iiav.org>.

ICSV15 проходил в Центре съездов (Convention Centre) Дайджона. Этот город с населением 1,5 миллиона человек географически находится в центре Южной Кореи, является главным городом провинции и пятым крупнейшим городом Кореи.



*(слева направо): проф. В. Гордон, проф. Б. Коэльо, проф. Ю. Степанов*

Как в «мекке» мировой науки и технологии, в Дайджоне расположены 200 научно-исследовательских учреждений, включая университеты, правительственные и корпоративные институты. Около 800 корпораций с 25-тысячным персоналом работают в регионе. В Дайджоне расположена штаб-квартира Всемирной Ассоциации Технополисов. В 1993 г. в Дайджоне проводилась Всемирная выставка (World Expo), в 2002 г. в городе проводились игры Чемпионата мира по футболу. Город самодостаточен, в нем гармонично сочетается благополучная среда, индустрия, коммерческая активность, научные исследования и передовые методы обучения и воспитания.

Церемония открытия конгресса 7 июля 2008 года началась с приветственных слов руководителя конгресса профессора Чон-Вон Ли, президента Корейского общества инженеров-акустиков профессора Сун-Ву Ким и президента ПАУ Л.Б. Коэльо. После церемонии состоялась первая программная (keynote) лекция профессора Патриции Дэвис (США). Перед лекцией участников конгресса приветствовали артисты традиционной корейской музыки и танцами.



*На открытии конгресса*



*ОрелГТУ известен даже в корейских яслях*

По окончании церемонии состоялась экскурсия в Корейский музыкальный и культурный центр. Вечером в одном из отелей города состоялся вечер встречи (welcome reception), на котором участники конгресса познакомились друг с другом, приветствовали старых друзей, делились планами и лакомились блюдами корейской и(или) европейской кухни.

8-10 июля участники конгресса работали в своих секциях, знакомились с экспонатами выставки, в которой участвовали крупнейшие производители современной научной и производственной продукции, такие как Brüel and Kjær, Dantec Dynamics, Data Physics, G.R.A.S. Sound and Vibration, Oros, SINUS Messtechnik GmbH и другие. В эти же дни проводились экскурсии в горную деревню близ Дайджона, в Институт машиноведения и материалов (KIMM), в Исследовательский аэрокосмический институт (KARI), в Музей науки, в ресторан, где участники могли принять участие в традиционной корейской чайной церемонии.

На церемонии закрытия после выступления профессора Чон-Вон Ли состоялась презентация следующего, 16 конгресса, который будет проходить 5-9 июля 2009 г. в г. Кракове (Польша). Выступивший руководитель ICSV16 профессор Марек Павельчик познакомил делегатов конгресса с предполагаемой программой конгресса и с достопримечательностями Кракова и Польши и пригласил принять участие в этом конгрессе.



*Руководство следующего, 16 конгресса в Кракове проф. Я. Чеслик (слева), проф. М. Павельчик (справа)*



*Выступление Китайской делегации на банкете*

Далее работа конгресса проходила в столице страны – городе Сеуле. Сеул – третий крупнейший столичный район в мире. Половина населения Южной Кореи проживает в Сеуле и его окрестностях. Южная Корея входит в 10 крупнейших экономик мира, одна из наиболее технологически продвинутых стран, мировой лидер по компьютерным программам и играм, по дисплеям и мобильным телефонам, автомобилям. В Сеуле проводились летние Олимпийские игры 1988 г. Стандарт жизни в Сеуле близок к стандартам многих стран Западной Европы.



*Панорама Сеула*

Информацию об ICSV15 можно получить по адресу: <http://www.icsv15.org>.

*Ю. Степанов, В. Гордон – члены ИАВ*