

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель:

Голенков В. А. д.т.н., проф.

Зам. председателя:

Степанов Ю. С. д.т.н., проф.

Светкин В. В. к.т.н. доц.

Колчунов В. И. д.т.н., проф.

Садков В. Г. д.т.н., проф.

Куликов А. Ф. к.т.н. доц.

Фролова Н. А. к.социол.н., доц.

Соков О. А. к.т.н., доц.

Борзенков М. И. к.т.н., доц.

Поландова Л. И.

Одолеева М. В.

РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор:

Степанов Ю. С. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Киричек А. В. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Подмастерьев К. В. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Константинов И. С. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Гордон В. А. д.т.н., проф.

Иванов Б. Р. д.т.н., проф.

Распопов В. Я. д.т.н., проф.

Технический редактор:

Марков В. В. к.т.н.

Художественный редактор

Барсуков Г. В. к.т.н. доц.

Компьютерная верстка:

Марков В. В. к.т.н.

АДРЕС РЕДАКЦИИ СЕРИИ

302020 Россия, Орел,

Наугорское шоссе, д. 29

Кафедра ПМиС

Редколлегия журнала

Известия ОрелГТУ.

Серия «Фундаментальные

и прикладные проблемы

техники и технологии»

тел: (4862) 41-98-76, 41-98-22

факс: (4862) 41-98-22

E-mail: pms35@mail.osu.ru

Зарегистрировано в Министерстве РФ

по делам печати, телерадиовещания

и средств массовой информации

Свидетельство. ПИ № 77-15496

от 20 мая 2003 г.

Формат 69×90/8

Печать ризография

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 12

Тираж 500 экз.

© ОрелГТУ, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

• ПРИБОРЫ, МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ	3
Есипов В.Н., Жердов В.А., Незнанов А.И. Статические характеристики гидроакустического датчика негоризонтальности с механическим маятниковым чувствительным элементом	4
Ногачева Т.И., Кузнецова Е.В., Серeda О.Г. Исследование метода определения термоэлектрической способности поверхности материала	8
Подмастерьев К.В., Петрова О.С. Анализ методов и средств регулирования и контроля температуры воздуха в помещениях лечебно-профилактических учреждений	12
Ешуткин Д.Н., Грядунова Е.Н. Безударный режим движения корпуса гидравлических ударных механизмов	17
Петрусенко И.А. Метод точечного нагрева поверхности материала уменьшающимся по экспоненциальному закону током	21
Волков М.А., Иванов Ю.Б., Наумов Е.Ю. Светочастотные преобразователи для цифровых приборов неразрушающего контроля	24
Лисичкин В.Г. Повышение точности автогенераторных датчиков	27
Баранов В.Л., Кудряшов М.А. Экспериментальная оценка возможности применения модели вращения коаксиальных цилиндров для представления вращательного движения компонент пуля стрелкового оружия	31
Поландов Ю.Х., Барг М.А., Власенко С.А. Экспериментальная установка для исследования взрывов газозвушдушной смеси	33
Сафонова Т.Н. Критерии и методы контроля катодного механизма иницирования пробоя в импульсном режиме	35
• ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ	38
Бобров А.В., Лукин М.В., Дёмина Л.Б. Послойное распределение эффективности предпосевного информационного воздействия на семена пшеницы с применением торсионного генератора на светодиодах	39
Егоров Б.А., Бодров М.А., Яковенко М.В. Исследование динамических характеристик ударного объёма сердца человека при косвенном воздействии физическими факторами	41
Бобров А.В. Собственные информационные поля объектов живой и неживой природы	43
• ТРИБОЛОГИЯ И ТРИБОМОНИТОРИНГ	53
Марков В.В. Анализ возможности учёта эффекта приработки рабочих поверхностей подшипника качения при математическом моделировании его электрического сопротивления	54
Мишин В.В., Семёнов В.В. Исследование эксплуатационных параметров новых подшипников после приработки	59
Кузнецова Е.В. Анализ влияния одновременного включения множества источников термоЭДС на результаты измерения максимальной температуры в зоне трения	62
Пахолкин Е.В., Сидоров А.М. Разработка на основе электрических методов трибомониторинга диагностического обеспечения узлов трения с ресурсным режимом смазки	65
• ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ	71
Молчанов В.И., Афонин А.П. Расчётно-экспериментальное определение напряжений изгиба капролоновых зубьев червячных колес	72
Сухарский И.Н., Тарапанов А.С., Полохин О.В., Гордиенко А.П., Алымов А.В. Системный анализ процесса получения червячных зубчатых колес	75
Тарасов Д.Е. Повышение эксплуатационных свойств тяжело нагруженных деталей машин посредством учёта технологических факторов статико-импульсной обработки	80
• ТЕХНОЛОГИИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ	85
Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Михеев А.В., Ravipudi Venkata Rao, Nagarsheth H. I. Моделирование условий зарождения трещины в хрупкой пластине при сверхзвуковом взаимодействии с абразивной частицей	86
• ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ И ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ	92
Киричек А.В., Афонин А.П., Афанасьев Б.И. Способ накатывания наружных прямоугольных резб	93
Бородин М.В., Брусков С.И., Тарапанов А.С. Расчёт параметров шероховатости при точении винтовых поверхностей круглого сечения	95
Киричек А.В., Соловьёв Д.Л. Деформационное упрочнение отверстий с использованием пролонгированных ударных импульсов	101

Бородин М.В., Брусов С.И., Тарапанов А.С. Повышение эффективности обработки ротора героторного одновинтового насоса	103
Киричек А.В., Соловьёв Д.Л., Поляков А.В. Рациональное распределение энергии удара при статико-импульсном деформационном упрочнении	105
Маликов А.А., Валиков Е.Н., Ямников А.С. Прогрессивная технология зубообработки	107
Маликов А.А., Валиков Е.Н., Ямников А.С., Белякова В.А. Расчёт координат точек режущих кромок шевера - прикатника	110
<i>ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА И ЭКОЛОГИИ</i>	118
Углова И.В., Лисовская З.П. Стандарты ИСО серии 14000: история создания и практика сертификации	119
Гушина Т.В. Эффективность средств индивидуальной защиты	124
Гушина Т.В. Методология безопасности ландшафтных работ	126
<i>ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ</i>	128
Гордон В.А., Волчков А.А. Влияние жесткости опорных связей на частоты собственных изгибных колебаний балки	129
Екимова Л.С. Процесс движения тел эллипсоидной и шарообразной формы по наклонным плоскостям	134
Копова В.И. Определение ванадия в сточных водах титано-магниевого производства с помощью пленочного ионоселективного электрода	137
Куценко С.А., Хрулева Ж.В., Цымай Д.В. Очистка кислых сточных вод от цинка	139
Копова В.И. Определение ионов ванадия в сточных водах титано-магниевого производства экстракционно-фотометрическим методом	141
Бондаренко М.В., Куценко С.А. О возможном влиянии фотоллиза воды на эволюцию атмосферы Земли	143
Куценко С.А., Цымай Д.В., Суханова В.А., Малофеев С.М. Термодинамическая оценка равновесных составов в системе $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{SO}_2$	146

**ПРИБОРЫ, МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
И ДИАГНОСТИКИ**

УДК 531.74.082.4

Канд. техн. наук, доц. Есипов В.Н., канд. техн. наук, доц. Жердов В.А., студ. Незнанов А.И.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НЕГОРИЗОНТАЛЬНОСТИ С МЕХАНИЧЕСКИМ МАЯТНИКОВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

The converting functions of the hydroacoustic sensor of the corner of not horizontal position with the mechanical pendulum sensitive element are found out. Experimental static characteristics for different ways of inclusion of the acoustic channel are shown.

Введение

Одним из путей улучшения технических характеристик датчиков негоризонтальности является использование жидкостных двухкомпонентных и механических маятников, помещенных в полость, полностью заполненную жидкостью [1]. Проблема съема информации может быть решена с помощью ультразвуковых методов измерения. В этом случае датчики представляют собой систему, включающую механическую подсистему в виде корпуса с полостью, полностью заполненной двумя несмешивающимися жидкостями с различной плотностью или одной жидкостью с размещенной в ней на торсионном подвесе или в специальных опорах пластиной со смещенным центром масс, и ультразвуковую подсистему съема информации.

В результате проведения исследований разработаны принципы построения, схемные решения и получены функции преобразования однокоординатных и двухкоординатных датчиков негоризонтальности [1]. Информативными параметрами являются амплитуда или частота электрических выходных сигналов.

В работе [2] дан комплексный анализ метрологических характеристик гидроакустических датчиков негоризонтальности, приведены экспериментальные статические и динамические

характеристики жидкостных датчиков. Последние подтверждают результаты математического моделирования механических подсистем датчиков [3] и их превосходство по частным динамическим характеристикам по сравнению с используемыми в настоящее время средствами для измерения негоризонтальности железнодорожного пути.

В то же время в указанной работе не приведены экспериментальные характеристики жидкостно-механических датчиков, что не позволяет провести сравнительную оценку жидкостных и жидкостно-механических датчиков негоризонтальности. Таким образом, задачей дальнейших исследований является экспериментальные исследования жидкостно-механических датчиков и уточнение их функций преобразования.

Функции преобразования датчиков

В работе [4] получено следующее выражение для напряжения на пьезоприемнике при наклонном падении ультразвука на маятниковую пластину:

$$U_{\text{пр}} = K_{\text{дат}} \cdot K_{\text{отр}} \frac{S_{\text{пр}}}{\pi \cdot r^2} = K_{\text{дат}} \cdot K_{\text{отр}} \left(1 - \frac{2L\alpha}{\pi \cdot r} \right), \quad (1)$$

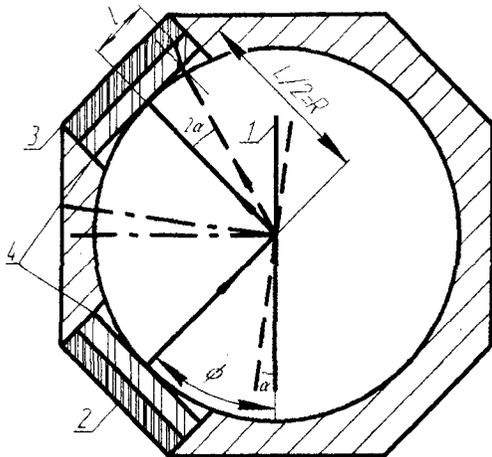
$$K_{\text{дат}} = \frac{2e_{33}^2 U_0 e^{-\beta l}}{\pi f_0 \rho_1 c_1 \varepsilon_{33} t} \eta_0^2; \quad K_{\text{отр}} = \frac{\frac{n^2 - \sin^2 \varphi - m^2 \cos^2 \varphi}{m \cos \varphi (n^2 - \sin^2 \varphi)} \sin \left(\frac{2\pi f_0 h}{c_1} \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} \right)}{\sqrt{4 + \frac{(m^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi - n^2)^2}{m^2 \cos^2 \varphi (n^2 - \sin^2 \varphi)}} \sin \left(\frac{2\pi f_0 h}{c_1} \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} \right)}$$

Здесь, использованы следующие условные обозначения: $K_{\text{дат}}$ – постоянная, определяемая конструктивными параметрами датчика; $K_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения ультразвука от пластины; $S_{\text{пр}}$ – площадь перекрытия пьезоприемника фронтом ультразвуковой волны; $n = c_1/c_2$ и $m = \rho_2/\rho_1$ – коэффициенты; c_1 и c_2 – скорости звука в жидкой среде заполнения датчика и в материале пластины; ρ_1 и ρ_2 – плотности среды заполнения и материала пластины; U_0 – амплитуда напряжения, подаваемого на пьезоизлучатель; r и t – соответственно, радиус и толщина пьезопластины; L – длина акустического

пути; h – толщина маятниковой пластины; f_0 – частота ультразвуковых колебаний; φ – начальный угол падения ультразвука на пластину; α – угловое отклонение пластины; β – пространственный коэффициент затухания ультразвука по амплитуде; e_{33} – пьезоэлектрическая постоянная пьезокерамики; ε_{33} – диэлектрическая проницаемость пьезокерамики; η_0 – акустико-механический коэффициент полезного действия.

В соответствии с выражением (1) функция преобразования линейная. В действительности она является нелинейной, т.к. при наклонном падении

ультразвуковой волны на пьезоприемник её фронт имеет форму эллипса. В реальных конструкциях датчиков излучение ультразвука в жидкость и его прием может осуществляться непосредственно, через криволинейную поверхность внутренней полости (цилиндр, сфера) или через специальные вставки в виде дисков (рис. 1).



1 – пластина; 2 – пьезоизлучатель;
3 – пьезоприемник; 4 – диски

Рис. 1. Схема падения и отражения ультразвуковой волны

В последнем случае необходимо учитывать коэффициент прохождения ультразвуковой волны через материал вставки $K_{про}$, который согласно [5] вычисляется по формуле:

$$K_{про} = \frac{2n_t^2(1 + ctg^2\theta_0)A}{m(A^2 + 4ctg^2\theta_0 a_t a_l) + n_t^4(1 + ctg^2\theta_0)^2 a_l}$$

$$\theta_0 = \frac{\pi}{2} - 2\alpha; a_l = \sqrt{n_t^2 + (n_t^2 - 1)ctg^2\theta_0};$$

$$a_t = \sqrt{n_t^2 + (n_t^2 - 1)ctg^2\theta_0}; A = n_t^2 + (n_t^2 - 2)ctg^2\theta_0;$$

$$m = \rho_3 / \rho_1; n_l = c_1 / c_3; n_t = c_1 / c_4.$$

где $\theta_0, a_t, a_l, A, m, n_l, n_t$ – переменные;

ρ_3 – плотность материала вставки;

c_3 и c_4 – соответственно, скорости продольных и поперечных ультразвуковых колебаний в нём.

Площадь перекрытия пьезоприёмника фронтом волны может быть определена как площадь криволинейной трапеции, образованной пересечением окружности пьезоприёмника и эллипса проекции фронта волны (рис. 2).

В данной системе координат уравнения окружности и эллипса имеют вид:

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad (2)$$

$$\frac{(x-l)^2}{r_1^2} + \frac{y^2}{r^2} = 1; l = \frac{L}{2} \cdot tg2\alpha + d \cdot tgy, \quad (3)$$

где r_1 – больший радиус эллипса, равный:

$$r_1 = \frac{r}{\cos \gamma}; \gamma = \arcsin\left(\frac{c_3}{c_1} \sin 2\alpha\right), \quad (4)$$

где γ – угол преломления ультразвуковой волны при прохождении через материал вставки;
 l – смещение центра эллипса относительно центра поверхности пьезоприёмника;
 d – толщина вставки (рис. 3).

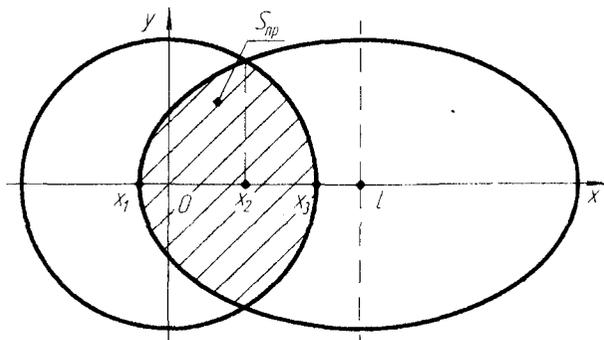


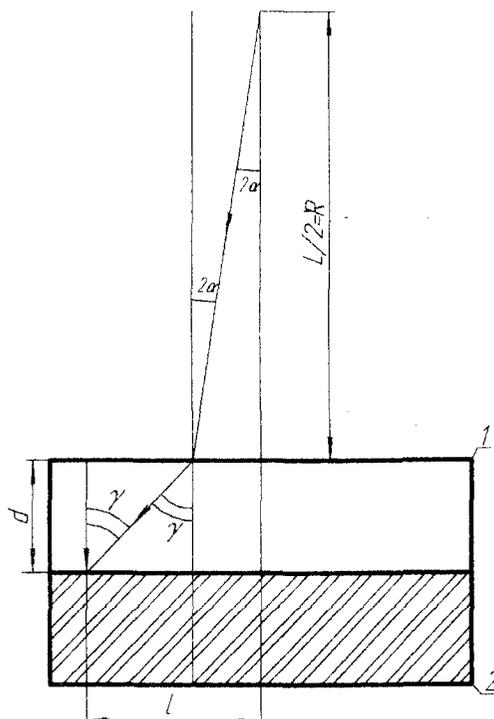
Рис. 2. Схема перекрытия пьезоприёмника фронтом ультразвуковой волны

Координаты точек фигуры пересечения можно получить на основе решения системы неравенств:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 \leq r^2, \\ (x-l)^2 \cos^2 \gamma + y^2 \leq r^2, \end{cases} \quad (5)$$

откуда находим:

$$\begin{cases} x_1 = l - r_1, \\ x_2 = \frac{l \cos \gamma}{\cos \gamma + 1}, \\ x_3 = r. \end{cases} \quad (6)$$



1 – вставка в виде диска 4; 2 – пьезоприемник

Рис. 3. Схема прохождения ультразвуковой волны через диск

Используя уравнения (2) и (3), представим площадь перекрытия формулой:

$$S_{пр} = 2 \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{r^2 - x^2} dx + 2 \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{r^2 - (x-l)^2 \cos^2 \gamma} dx.$$

Умножением конечного выражения на $\cos^2 \gamma$ одновременно учтём, что энергия ультразвуковой волны равномерно распределена по площади эллипса, которая равна

$$S_{эл} = \pi \frac{r^2}{\cos \gamma},$$

а также то, что только составляющая продольных колебаний, перпендикулярная поверхности пьезопластины, приводит к возникновению заряда в ней.

Таким образом, выражение для напряжения на пьезоприемнике будет определяться формулой

$$U_{пр} = K_{дат} \cdot K_{отр} \cdot K_{про} \cdot \frac{S_{пр}}{\pi r^2} \cdot \cos^2 \gamma. \quad (7)$$

При использовании маятниковой пластины «на просвет» (рис. 4) напряжение на пьезоприемнике определяется выражением:

$$U_{пр} = K_{дат} \cdot K_{пр} \cdot \frac{S_{пр}}{\pi r^2}. \quad (8)$$

где $K_{пр}$ – коэффициент прохождения ультразвуковой волной пластины.

$$K_{пр} = 0.5 \left[4 + \frac{(\alpha^2 + m^2 - n^2)^2}{m^2(n^2 - \alpha^2)} \sin^2 \left(\frac{2\pi f_0 h}{c_1} \sqrt{n^2 - \alpha^2} \right) \right]^{-1}$$

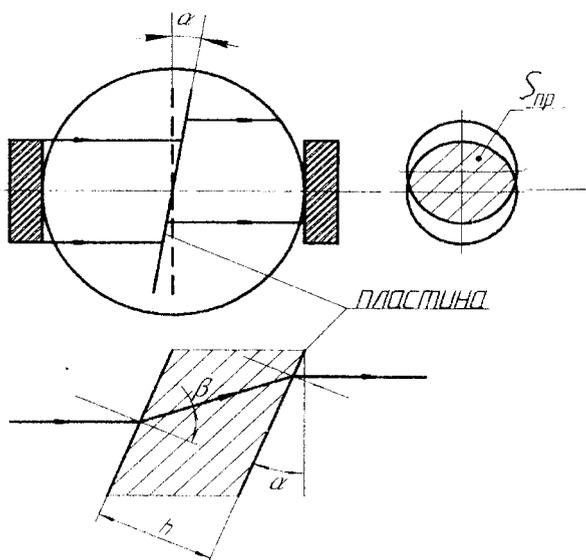


Рис. 4. Схема излучения и приёма ультразвуковой волны

Используя закон преломления и геометрические соотношения, определим площадь перекрытия пьезоприемника фронтом волны:

$$S_{пр} = \pi r^2 \frac{rh \cdot \sin(\beta - \alpha)}{\cos \beta}; \beta = \arcsin \left(\frac{c_2}{c_1} \cdot \sin \alpha \right); \quad (9)$$

где β – угол преломления.

Выражение для напряжения на приемнике с учётом (9) имеет вид:

$$U_{пр} = K_{дат} \cdot K_{пр} \cdot \left(1 - \frac{h \sin(\beta - \alpha)}{\pi \cdot r \cos \beta} \right). \quad (10)$$

Экспериментальные статические характеристики

Внешний вид экспериментального образца датчика представлен на рис. 5.

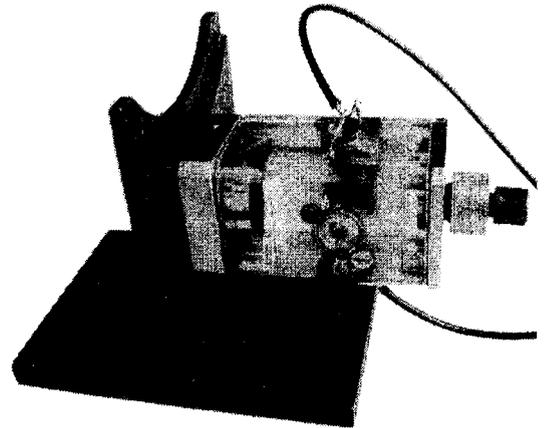


Рис. 5. Внешний вид гидроакустического датчика

Датчик имеет цилиндрическую камеру, в которой на двух торсионных диаметром 52,28 мкм подвешен чувствительный элемент в виде алюминиевой пластины размерами 20x30 мм и толщиной 143 мкм. Для смещения центра масс использован мерный груз, который закреплён в нижней части пластины. Камера заполнена трансформаторным маслом. В качестве образцового средства для задания углов негоризонтальности применялась оптическая делительная головка.

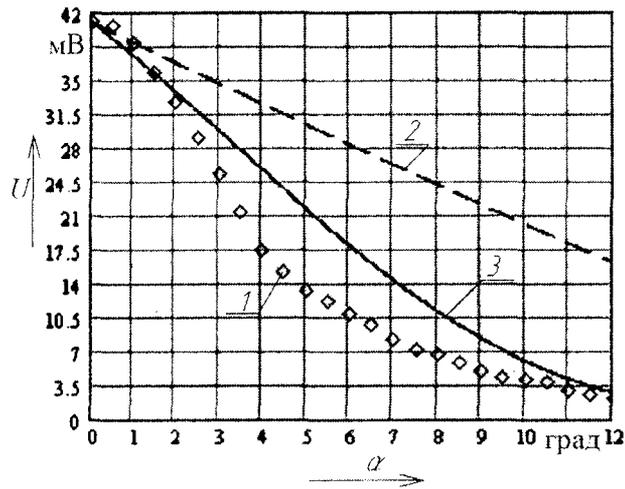
На рис. 6 изображены экспериментальная характеристика датчика при использовании пластины в качестве отражающей границы, а также две теоретические зависимости 2 и 3, построенные соответственно по выражениям (1) и (7). Излучение ультразвука осуществлялось через прямолинейную поверхность под углом 45° к пластине. Уточнённая функция преобразования более адекватно описывает экспериментальную зависимость.

С целью упрощения конструкции датчика представляет интерес вариант излучения ультразвука через цилиндрическую поверхность (рис. 7). Для сравнения здесь же представлена предыдущая характеристика. Из графиков следует, что характер зависимости не меняется, однако в данном случае диапазон измерений получается меньше.

Экспериментальные характеристики при использовании пластины «на просвет» для аналогичных вариантов излучения ультразвука

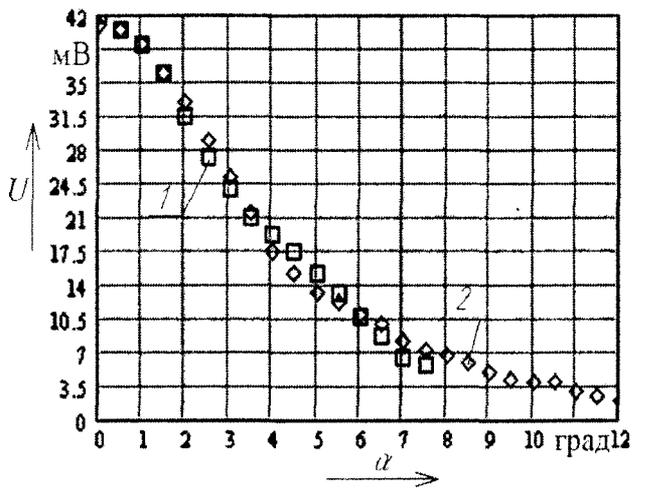
показаны на рис. 8. Здесь излучение ультразвука через прямолинейную поверхность позволяет получить более линейную характеристику и несколько больший диапазон измерений.

Возможна модификация предыдущего случая, когда ультразвук излучается не перпендикулярно



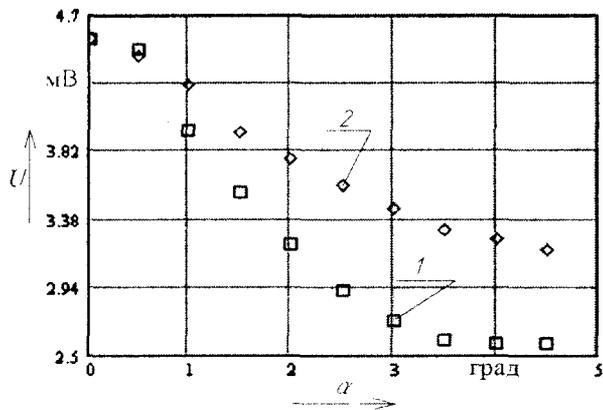
1 – экспериментальная характеристика; 2 – теоретическая характеристика по зависимости (1); 3 – характеристика по зависимости (7)

Рис. 6. Экспериментальные и теоретические характеристики при использовании пластины в качестве отражателя ультразвука



1 – излучение ультразвука через цилиндрическую поверхность; 2 – излучение ультразвука через прямолинейную поверхность

Рис. 7. Экспериментальные характеристики при использовании пластины в качестве отражателя ультразвука



1 – излучение ультразвука через цилиндрическую поверхность; 2 – излучение ультразвука через прямолинейную поверхность

Рис. 8. Экспериментальные характеристики при использовании пластины «на просвет»

Выводы

1 Полученная в этой работе функция преобразования для случая использования маятникового чувствительного элемента в качестве отражателя ультразвука более адекватно, чем известная зависимость, описывает экспериментальную характеристику.

2 Гидроакустические датчики с механическим маятниковым чувствительным элементом позволяют получить более широкий диапазон измеряемых углов по сравнению с чисто жидкостными датчиками (соответственно, 12° и 2,5°).

3 В указанных датчиках имеется возможность изменять чувствительность, линейность характеристики и диапазон измерений за счёт

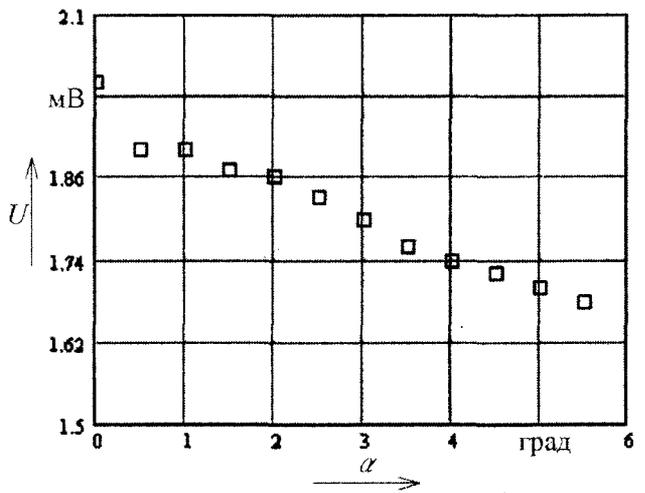


Рис. 9. Экспериментальная характеристика при излучении ультразвука вдоль пластины

соответствующего выбора режима включения акустического канала.

Литература:

1 Есинов В.Н. Гидроакустические маятниковые датчики негоризонтальности / В.Н. Есинов, А.В. Есинов // Датчики и системы, 2003. – №5. – С. 27-30.
 2 Есинов В.Н. Метрологические характеристики гидроакустических датчиков негоризонтальности / В.Н. Есинов, А.В. Есинов // Датчики и системы, 2005. – №1. – С. 42-46.
 3 Есинов В.Н. Математическое моделирование гидроакустических датчиков негоризонтальности /

В.Н. Есинов, А.В. Есинов // Датчики и системы, 2004. – №1. – С. 15-17.
 4 Есинов А.В. Гидроакустические средства контроля негоризонтальности железнодорожного пути: Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Орел: ОрелГТУ, 2004.
 5 Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973.

УДК 612.3.082.62:6

Канд. техн. наук, доц. Ногачева Т.И., асп. Кузнецова Е.В., асп. Серeda О.Г.
 (Орловский государственный технический университет)
 Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms@mail.ostu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПОСОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА

Here has been investigated influence of nonlinearity of the semi-natural thermocouples used for definition of thermoelectric ability of a surface of materials. Researches were spent for two materials at a motionless heating element and at its repeated lifting and lowering. On the basis of the received data it is obvious, that at calculation of factor of transformation of the semi-natural thermocouples it is expedient to consider nonlinearity of characteristics. The experimental data have been approximated by linear dependence of a kind: $E_2 = a \cdot E_1 \pm \epsilon$. Their dispersion which characterizes reproducibility of results of the measurements became from 10^{-7} up to 10^{-9} . Also at repeated lifting and lowering of a heating element the dispersion has increased. The reasons of it are enumerated.

Многие физические и механические свойства материалов достаточно хорошо коррелируют с их термоэлектрическими свойствами, которые могут быть достаточно просто определены без разрушения материала. Из термоэлектрических свойств наиболее просто определяется термоэлектрическая способность (ТЭС), под которой понимают абсолютную термоЭДС или абсолютный коэффициент термоЭДС, характеризующий физические свойства данного индивидуального вещества, с помощью соотношения $E_{\tilde{\mu}} = S \cdot \nabla \theta$, здесь под $E_{\tilde{\mu}}$ – понимают напряженность электрического поля в данном веществе или градиент электрохимического потенциала $\tilde{\mu}$ электрона [1]. Обычно измеряют дифференциальную термоЭДС пары металлов, представляющую собой разность абсолютных значений термоЭДС в каждом металле: $S_{AB} = S_A - S_B$. Тогда абсолютная термоЭДС металла исследуемого материала может быть определена, если составить термопару из исследуемого металла и стандартного термоэлектрода с известной термоэлектрической способностью.

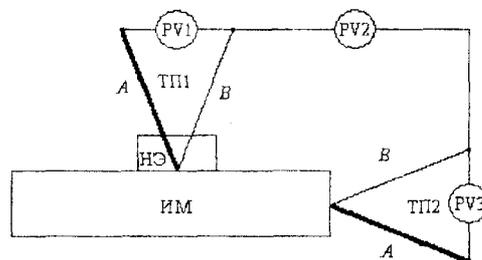


Рис. 1. Схема исследования ТЭС

Схема, реализующая метод определения ТЭС материала [2] представлена на рис. 1. С помощью измерительного прибора PV2 измеряется дифференциальная термоЭДС полустественной термопары, образованной исследуемым материалом (ИМ) и термоэлектродами В, одновременно являющимися электродами двух одинаковых стандартных термомпар ТП1 и ТП2. Эти термопары предназначены для измерения температур в точках контакта исследуемого материала с указанными электродами. Градиент температур, создается нагревательным элементом (НЭ). Показания измерителей PV1 и PV3, соответствующие значениям термоЭДС, возникающих в точках касания стандартных термомпар с исследуемым материалом, определяются выражениями:

$$E_1 = S_{AB} \cdot (\theta_1 - \theta_3), \tag{1}$$

$$E_3 = S_{AB} \cdot (\theta_2 - \theta_3), \quad (2)$$

где S_{AB} – дифференциальная термоЭДС термопар ТП1 и ТП2, называемая обычно коэффициентом преобразования термопар;

θ_1, θ_2 – соответственно, температуры в точках контакта исследуемого материала с электродами В;

θ_3 – температура окружающей среды.

В соответствии с выражениями (1) и (2):

$$\theta_1 = \frac{E_1}{S_{AB}} + \theta_3, \quad (3)$$

$$\theta_2 = \frac{E_2}{S_{AB}} + \theta_3. \quad (4)$$

Выражение, связанное с показаниями измерительного прибора PV2:

$$E_2 = S_{BM} \cdot (\theta_1 - \theta_2), \quad (5)$$

где S_{BM} – дифференциальная термоЭДС полустественной термопары.

Значение S_{BM} в контролируемой точке определяется по выражению, полученному путем подстановки формул (3) и (4) в уравнение (5):

$$S_{BM} = \frac{E_2}{E_1 - E_3} \cdot S_{AB}. \quad (6)$$

Если за начало отсчета принять значение E_3 , то выражение (6) принимает вид:

$$S_{BM} = \frac{E_2}{E_1} \cdot S_{AB}. \quad (7)$$

В этом случае отношение E_2/E_1 пропорционально коэффициенту преобразования полустественной термопары для диапазона температур $\theta_1 - \theta_2$.

При измерении точка контакта термопары ТП1 с ИМ нагревается с помощью НЭ. Затем через некоторый промежуток времени достаточный для установления термодинамического равновесия, при котором показания приборов перестают изменяться, регистрируются значения термоЭДС. Потом НЭ выключается и ИМ охлаждается до температуры окружающей среды, что соответствует нулевым показаниям всех измерительных приборов. После этого нагревательный элемент вновь включается и измерения повторяются

Подобным образом измерения проводятся заданное число раз. По данному принципу были исследованы образцы из стали Ст45 и латуни ЛС59. В таблице 1 приведены показания приборов PV1 и PV2 для стали Ст45 и латуни ЛС59. При каждом измерении нагрев образца проводился до температуры, при которой показания прибора PV3 были одними и теми же. В третьих графах таблицы 1 приведены значения отношения E_2/E_1 . Внизу этих граф приведены средние значения отношений $(E_2/E_1)_{cp}$ и их дисперсии $D(E_2/E_1)$.

Таблица 1 – Результаты исследования образцов стали Ст45 и латуни ЛС59

Сталь Ст45			Латунь ЛС59		
E_1 , мкВ	E_2 , мкВ	E_2/E_1	E_1 , мкВ	E_2 , мкВ	E_2/E_1
615,7	472,0	0,7666	618,9	453,7	0,7331
615,9	471,2	0,7651	618,3	450,7	0,7289
617,1	472,0	0,7649	615,6	451,9	0,7341
618,7	473,9	0,7660	614,2	447,8	0,7291
617,1	472,1	0,7650	618,7	453,5	0,7330
617,1	473,9	0,7679	617,4	453,2	0,7340
618,4	473,1	0,7650	614,5	451,0	0,7339
616,5	471,6	0,7650	619,8	454,3	0,7330
614,7	470,9	0,7661	615,7	450,1	0,7310
618,2	474,8	0,7680	618,9	453,0	0,7319
617,8	472,0	0,7640	620,4	454,1	0,7319
618,2	474,8	0,7680	615,8	450,8	0,7321
619,3	473,8	0,7651	616,4	450,6	0,7310
618,2	474,2	0,7671	618,9	453,0	0,7319
619,8	475,4	0,7670	617,4	452,6	0,7331
620,6	476,0	0,7670	618,9	454,3	0,7340
621,8	475,7	0,7650	618,7	454,1	0,7340
620,5	476,5	0,7679	618,3	453,2	0,7330
619,5	474,5	0,7659	616,5	450,7	0,7311
619,6	474,0	0,7650	617,1	451,1	0,7310
620,8	476,8	0,7680	618,7	453,5	0,7330
621,9	475,1	0,7639	615,8	450,8	0,7321
621,8	477,5	0,7679	620,4	455,4	0,7340
622,1	477,8	0,7680	617,4	453,1	0,7339
619,1	473,6	0,7650	618,4	453,3	0,7330
$(E_2/E_1)_{cp}$		0,7661	$(E_2/E_1)_{cp}$		0,7324
$D_1(E_2/E_1)$		$1,875 \cdot 10^{-6}$	$D_1(E_2/E_1)$		$2,080 \cdot 10^{-6}$

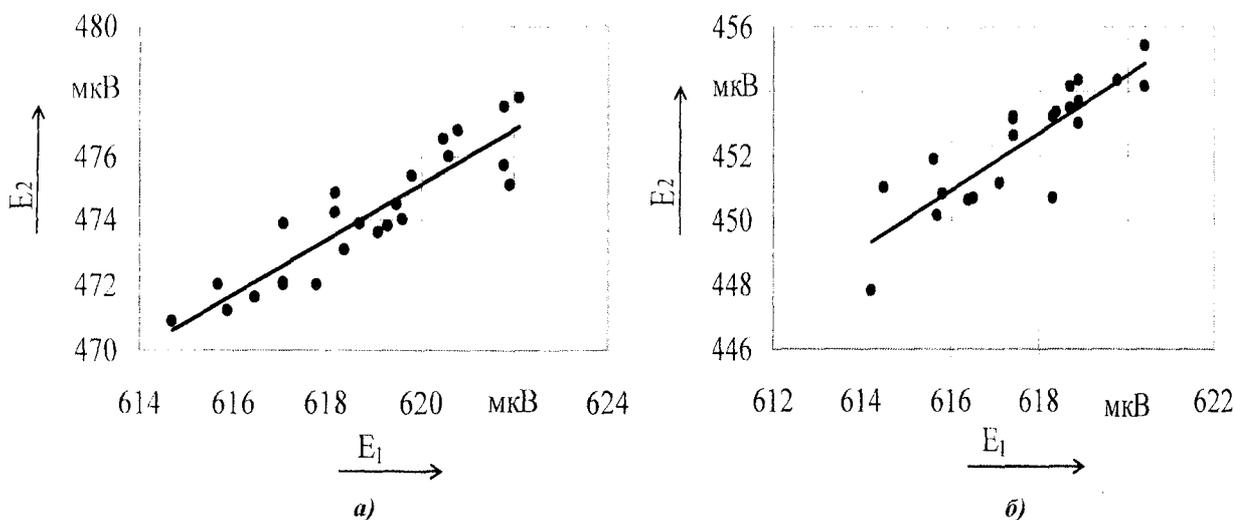


Рис. 2. Результаты измерений: а) для стали Ст45; б) для латуни ЛС59

Таблица 2 - Результаты исследования образцов при многократных подъемах и опусканиях нагревательного элемента для стали Ст45 и латуни ЛС59

Сталь Ст45			Латунь ЛС59		
E_1 , мкВ	E_2 , мкВ	E_2/E_1	E_1 , мкВ	E_2 , мкВ	E_2/E_1
614,7	473,0	0,7695	615,6	458,0	0,7440
617,9	476,5	0,7712	615,7	456,8	0,7419
620,0	478,0	0,7710	610,3	454,7	0,7450
621,3	478,1	0,7695	618,9	461,1	0,7450
618,4	476,7	0,7709	620,8	460,6	0,7419
617,0	475,7	0,7710	614,2	456,4	0,7431
620,6	477,6	0,7696	614,0	456,8	0,7440
617,2	475,8	0,7709	618,0	459,8	0,7440
621,5	478,3	0,7696	619,8	461,1	0,7439
618,6	476,2	0,7698	615,4	456,0	0,7410
620,7	476,7	0,7680	620,4	459,1	0,7400
622,0	477,9	0,7683	619,8	461,8	0,7451
620,3	478,5	0,7714	617,2	458,6	0,7430
621,2	478,7	0,7706	617,3	458,7	0,7431
623,4	479,6	0,7693	620,8	460,6	0,7419
624,6	480,2	0,7688	615,8	458,2	0,7441
619,8	478,0	0,7712	615,3	456,6	0,7421
614,4	472,9	0,7697	616,5	457,4	0,7419
614,1	474,6	0,7728	616,8	459,5	0,7450
615,0	472,1	0,7676	618,4	460,0	0,7439
620,2	478,3	0,7712	617,4	456,9	0,7400
621,0	477,3	0,7686	615,4	457,9	0,7441
624,2	478,5	0,7666	618,7	459,7	0,7430
622,0	479,5	0,7709	615,2	457,0	0,7428
618,9	478,0	0,7723	616,2	457,8	0,7429
$(E_2/E_1)_{ср}$		0,7700	$(E_2/E_1)_{ср}$		0,7430
$D_1(E_2/E_1)$		$2,047 \cdot 10^{-6}$	$D_1(E_2/E_1)$		$2,127 \cdot 10^{-6}$

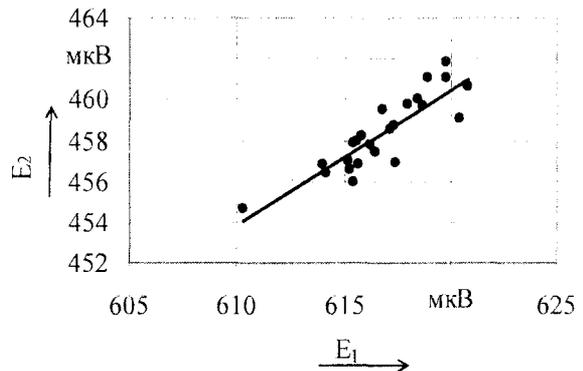
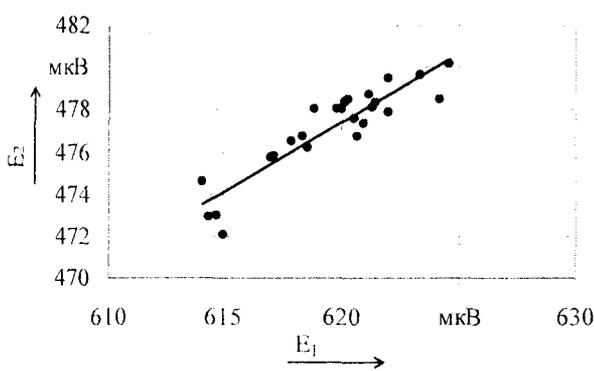


Рис. 3. Результаты измерений при многократных подъемах и опусканиях нагревательного элемента: а) для стали Ст45; б) для латуни ЛС59

Различие значений E_1 объясняется различием значений температур θ_1 при каждом измерении.

Из-за нелинейности зависимости термоЭДС термопар от разности температур, рассчитанные значения дисперсии $D_1(E_2/E_1)$ не характеризуют воспроизводимость результатов измерений. Поэтому на рис. 2 в координатах $(E_1; E_2)$ показаны точки, соответствующие результатам измерений. Поскольку в малом диапазоне изменения температур θ_1 зависимости $E_1 = f(\theta_1 - \theta_3)$ и $E_2 = f(\theta_1 - \theta_3)$ можно принять линейными, то результаты измерений аппроксимируем также линейными зависимостями. В данном случае они имеют вид:

1) для стали Ст45: $E_2 = 0,853 \cdot E_1 - 53,715$;

2) для латуни ЛС69: $E_2 = 0,8889 \cdot E_1 - 96,621$.

На рис. 2 они изображены прямыми линиями. Дисперсия D_{11} отношений (E_2/E_1) после аппроксимации составила:

1) для стали Ст45: $D_{11}(E_2/E_1) = 7,805 \cdot 10^{-8}$;

2) для латуни ЛС59: $D_{11}(E_2/E_1) = 1,148 \cdot 10^{-7}$.

Полученные значения дисперсий характеризуют воспроизводимость результатов измерений в одной точке исследуемой поверхности. На основании проведенных исследований видно, что при расчёте коэффициента преобразования полуконтактной термопары целесообразно учитывать линейность характеристик.

При определении термоэлектрической неоднородности поверхности образцов исследуемых материалов термопару ТП1 приходится переносить из одной точки поверхности ИМ в другую. Поэтому необходимо исследовать влияние многократной установки измерительной термопары на исследуемую поверхность. При этих измерениях нагревательный элемент был непрерывно включен и вместе с термопарой периодически поднимался и опускался на контролируемую поверхность. Как и в предыдущем случае, измерения проводилось при установившемся термодинамическом равновесии. Результаты многократных измерений приведены в таблице 2.

Обработка результатов измерений была проведена так же, как и в первом случае. Характеристики $(E_2/E_1)_{ср}$ и $D_1(E_2/E_1)$ приведены внизу таблицы 2.

Зависимость $E_1 = f(E_2)$ в координатах $(E_1; E_2)$, соответствующая результатам измерений показана точками на рис. 3. При этом уравнения аппроксимаций, представленные прямыми линиями, имеют вид:

$$1) \text{ для стали Ст45 } E_2 = 0,6537 \cdot E_1 + 72,069;$$

$$2) \text{ для латуни ЛС69 } E_2 = 0,6614 \cdot E_1 + 50,375.$$

Дисперсия отклонений результатов измерений от линейной зависимости составила:

$$1) \text{ для стали Ст45 } D_{22}(E_2/E_1) = 2,534 \cdot 10^{-7};$$

$$2) \text{ для латуни ЛС59 } D_{22}(E_2/E_1) = 1,162 \cdot 10^{-7}.$$

Полученные результаты показывают, что дисперсия увеличилась:

$$1) \text{ для стали Ст45:}$$

$$\text{на } \Delta D(E_2/E_1) = D_{22}(E_2/E_1) - D_{11}(E_2/E_1) = 1,753 \cdot 10^{-7};$$

$$2) \text{ для латуни ЛС59:}$$

$$\text{на } \Delta D(E_2/E_1) = D_{22}(E_2/E_1) - D_{11}(E_2/E_1) = 1,400 \cdot 10^{-9}.$$

Увеличение дисперсии во второй серии измерений, где многократно поднимался и опускался нагревательный элемент, по сравнению с первой, в которой нагревательный элемент оставался неподвижным, может объясняться тремя причинами:

1) непопаданием спая термопары ТП1 в одну и ту же точку;

2) непостоянством усилия прижатия при повторных опусканиях термопары на поверхность;

3) постепенным изнашиванием поверхностного слоя при многократных опусканиях спая термопары на поверхность образца.

Последняя причина практически не оказала влияние на результаты измерения, что подтверждается отсутствием в них тренда, который был бы следствием износа.

При этом полученные значения дисперсий $D_1(E_2/E_1)$ и $D_2(E_2/E_1)$ результатов измерений по отношению к уравнению аппроксимации показывают: с одной стороны высокую точность измерений термоэлектрической способности стали Ст45 и латуни ЛС59 и с другой стороны некорректность оценки дисперсий коэффициента преобразования.

Литература:

1 Блат Ф. Дж. Термоэлектродвижущая сила металлов: Пер. с англ. Ф. Дж. Блат, П.А. Шредер, К.Л. Фойлз; Под ред. Д.К. Белащенко. – М: Металлургия, 1980. – 248 с.

2 Ногачева Т.И. Локальный метод измерения термоэлектрической способности поверхностного слоя металлических изделий и его использование при неразрушающем контроле других физических величин / Т.И. Ногачева, Е.В. Кузнецова // Известия Орел ГТУ. Сер. Машиностроение. Приборостроение. – 2005. №2. – С. 7-14.

УДК 620.1

Д-р техн. наук, проф. Подмастерьев К.В., асп. Петрова О.С.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ ЛЕЧЕБНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ

In this article is making an analysis the methods and means of regulation and checking the temperature of air in the logging of medical or prophylactic institutions. The known principles of regulation the temperature are considered. The constructions of means of check and regulation the temperature of air in the logging of medical or prophylactic are offer.

Санитарными нормами и правилами (СНиП) в лечебно-профилактических учреждениях (ЛПУ) у отопительных приборов предусмотрена установка регулирующей арматуры [1]. Регулирование температуры воздуха в помещениях ЛПУ может осуществляться устройствами ручного регулирования

и устройствами контроля и регулирования. Устройства контроля и регулирования наиболее эффективны, так как автоматически поддерживают заданную температуру в помещениях ЛПУ [2], обеспечивая при этом экономию тепловой энергии. Это связано с тем, что при превышении заданной (в

соответствии со СНиП [2]) температуры воздуха в помещении на 1 °С перерасход тепловой энергии составляет 6 % [3].

Температура воздуха в помещениях ЛПУ определяется как результат совместного влияния температуры наружного воздуха, скорости и направления ветра, солнечной радиации, эффективности работы отопительных приборов, бытовых тепловыделений и ряда некоторых других факторов.

Обеспечение требуемого значения температуры воздуха в помещениях ЛПУ может осуществляться различными принципами, из которых основными являются [4]:

- принцип регулирования по возмущению (принцип Понселе-Чиколева);
- принцип комбинированного регулирования;
- принцип программного регулирования;

принцип регулирования по отклонению регулируемого параметра (Ползунова-Уатта).

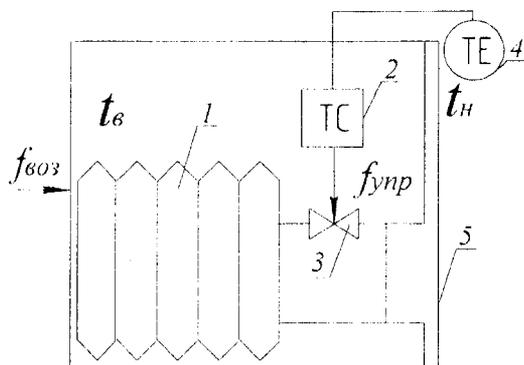
Рассмотрим каждый из них более подробно.

Принцип регулирования по возмущению (рис. 1) ориентирован на возмущающее воздействие (температуру наружного воздуха) и преобразование

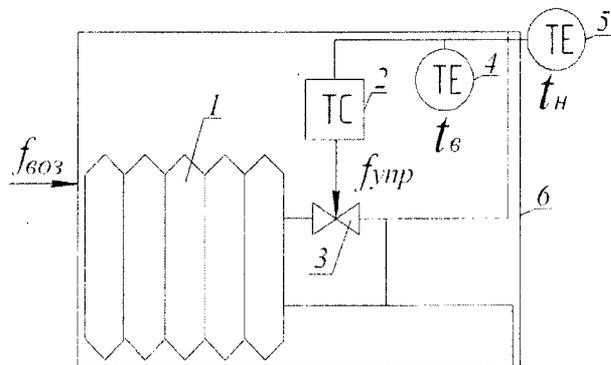
его в управляющее воздействие [4]. О точности регулирования температуры воздуха в помещениях информации нет, так как система разомкнутая и не имеет обратной связи. Управление осуществляется косвенно с помощью температурного графика.

При комбинированном принципе регулирования (рис. 2) [4] датчики температуры устанавливаются не только снаружи, но и внутри контрольного помещения. Изменение температуры в помещении вызывает срабатывание установленного внутри него датчика. А при изменении температуры наружного воздуха срабатывает датчик, контролирующий температуру наружного воздуха. Этот принцип используется при пофасадном регулировании и учитывает влияние интенсивности солнечной радиации, скорости и направления ветра.

Принцип программного регулирования (рис. 3) [4] реализует заранее заданную программу изменения значения температуры. Программное регулирование позволяет осуществлять снижение температуры в помещении в ночное время, праздничные и выходные дни, что обеспечивает дополнительную экономию тепловой энергии.



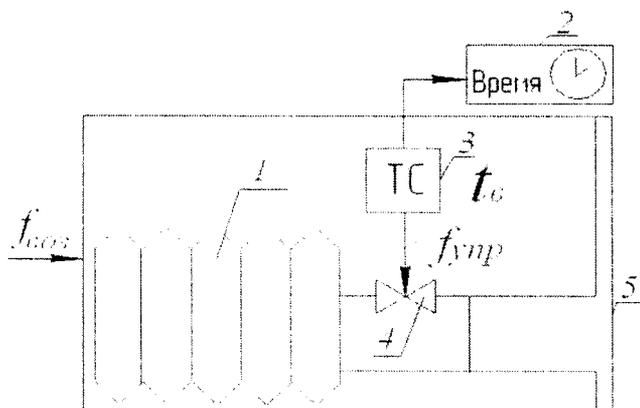
1 – отопительный прибор; 2 – управляющее устройство; 3 – регулирующий орган; 4 – датчик температуры; 5 – помещение; $f_{воз}$ ($f_{упр}$) – возмущающее (управляющее) воздействие; $t_в$ – температура воздуха в помещении, t_n – температура наружного воздуха



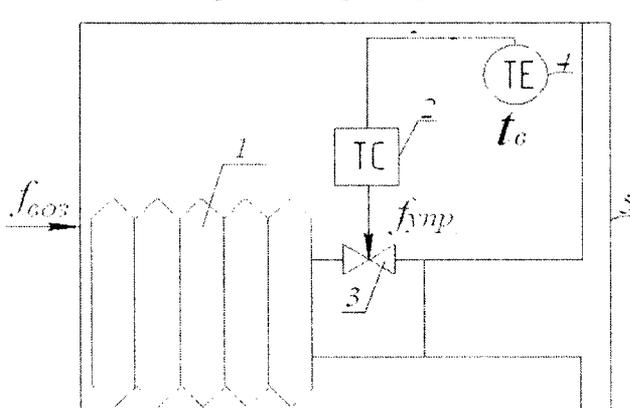
1 – отопительный прибор; 2 – управляющее устройство; 3 – регулирующий орган; 4, 5 – датчик температуры; 6 – помещение; $f_{воз}$ – возмущающее воздействие; $f_{упр}$ – управляющее воздействие; $t_в$ – температура воздуха в помещении; t_n – температура наружного воздуха

Рис. 1. Схема реализации принципа регулирования по возмущению

Рис. 2. Схема реализации принципа комбинированного регулирования



1 – отопительный прибор; 2 – программное устройство; 3 – управляющее устройство; 4 – регулирующий орган; 5 – помещение; $f_{воз}$ – возмущающее воздействие; $f_{упр}$ – управляющее воздействие; $t_в$ – температура воздуха в помещении



1 – отопительный прибор; 2 – управляющее устройство; 3 – регулирующий орган; 4 – датчик температуры; 5 – помещение; $f_{воз}$ ($f_{упр}$) – возмущающее (управляющее) воздействие; $t_в$ – температура воздуха в помещении

Рис. 3. Схема реализации принципа программного регулирования

Принцип регулирования по отклонению регулируемого параметра (принцип Ползунова-Уатта) (рис. 4) основан на измерении отклонения регулируемой величины – температуры воздуха в помещении $t_{в}$ – от заданного значения и преобразовании её в управляющее воздействие – перемещение клапана регулятора, изменяющего теплоотдачу отопительного прибора. При этом температура воздуха в помещении изменяется и возвращается к заданному значению [2].

Достоинством такого принципа является то, что результат воздействия устройства контроля и управления направлен на изменение контролируемого параметра $t_{в}$, поэтому нет необходимости в жестких требованиях к теплофизическим характеристикам объекта. К недостатку принципа регулирования по отклонению $t_{в}$ относится то обстоятельство, что срабатывание устройства контроля происходит при отклонении $t_{в}$ на величину, превышающую зону нечувствительности устройства контроля и регулирования. Тем не менее, данный принцип

Рис. 4. Схема реализации принципа регулирования по отклонению регулируемого параметра

является наиболее приемлемым для решения задачи контроля и регулирования температуры воздуха в помещениях ЛПУ, т.к. только он позволяет учесть бытовые тепловыделения.

Для реализации выбранного принципа в помещениях ЛПУ необходимы технические средства – устройства контроля и регулирования, устанавливаемые возле отопительных приборов (рис. 5). Анализируя возможные подходы к решению данной задачи, отметим, что можно использовать приборы прямого действия и непрямого действия.

Устройства регулирования температуры непрямого действия требуют дополнительного источника энергии и более дорогие по сравнению с устройствами прямого действия. Поэтому для контроля и регулирования температуры воздуха в ЛПУ наиболее целесообразно использовать устройства прямого действия, что, кстати, и делается в настоящее время в развитых европейских странах [5].

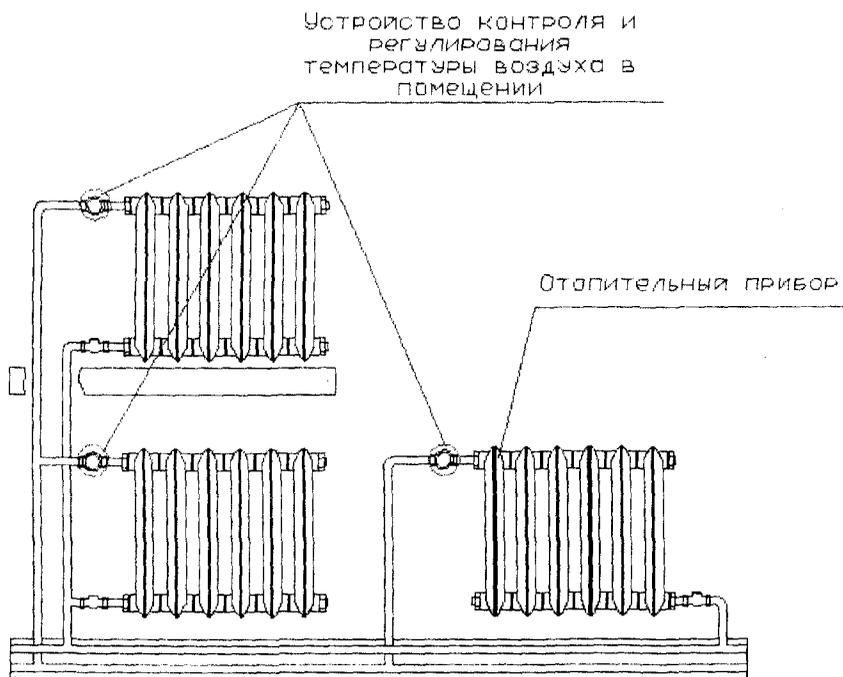


Рис. 5. Установка устройств контроля и регулирования температуры воздуха в помещении возле отопительных приборов в ЛПУ

Следует отметить, однако, что за рубежом для отопления ЛПУ используются двухтрубные системы отопления (параллельное подключение отопительных приборов). Поэтому устройства контроля и регулирования, выпускаемые ведущими зарубежными фирмами, например, фирмами Danfoss (Дания), Heimeier (Германия), SOPAC (Франция), ориентированы именно на эти системы отопления. Устройства контроля и регулирования, выпускаемые отечественной промышленностью, в частности ОАО «Теплоконтроль» (г. Сафоново) также наиболее эффективны для двухтрубных систем или

однотрубных систем отопления с насосной циркуляцией.

В то же время более 90 % отечественных зданий ЛПУ отапливаются однотрубными системами центрального отопления (последовательное подключение отопительных приборов) [5]. В этой связи необходимо проанализировать возможность решения поставленной выше задачи обеспечения заданного температурного режима в помещениях ЛПУ с помощью существующих серийных устройств контроля и регулирования. На рис. 6 в качестве примера представлено устройство контроля и

регулирования, работающее по отклонению параметра t_a в помещении [6].

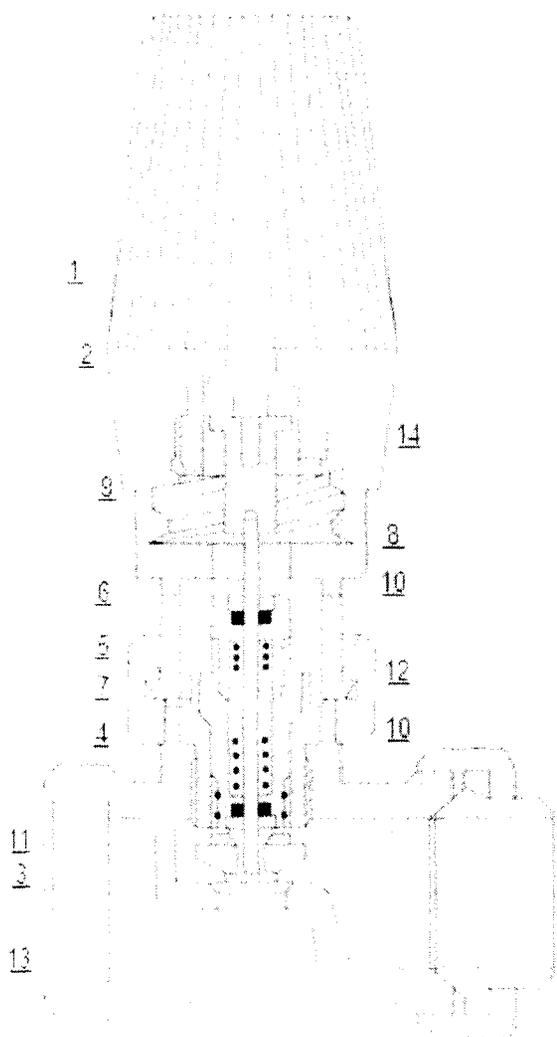
Устройство работает следующим образом. При повышении температуры воздуха в помещении увеличивается объём (давление) термочувствительного элемента датчика 8 температуры, воздействие от которого передается через теплоизолирующую втулку 14 и шток 15 на регулирующий орган 1, вызывая его перемещение, что приводит к уменьшению расхода теплоносителя и, следовательно, к понижению температуры в помещении. При понижении температуры воздуха в отапливаемом помещении объём (давление) термочувствительного элемента датчика температуры 8 уменьшается и под действием возвратной пружины (на рисунке не показана) регулирующий орган перемещается, что приводит к увеличению расхода теплоносителя через отопительный прибор и повышению температуры в помещении. Рассчитанное на двухтрубную систему отопления [7], это устройство имеет высокое гидравлическое сопротивление. Поэтому установка его в однотрубную систему отопления ЛПУ приведет к снижению теплоотдачи отопительного прибора в помещении ЛПУ.

– запорное устройство; 14 – теплоизолирующая втулка

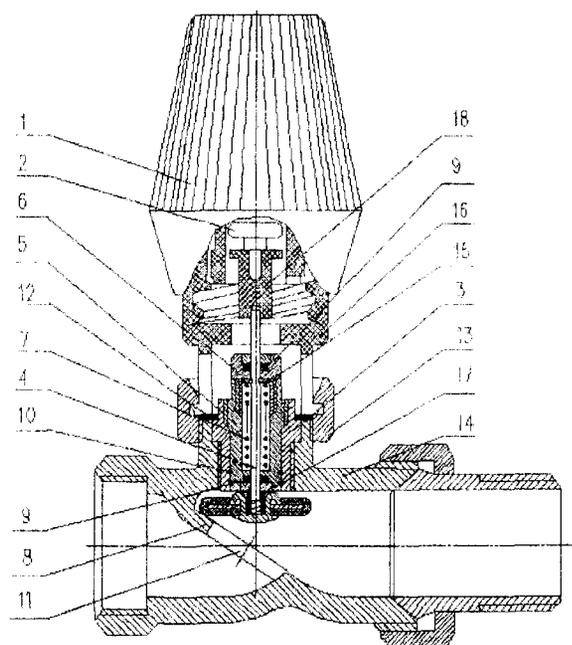
Рис. 6. Устройство контроля и регулирования, работающее по отклонению параметра t_a

Таким образом, обеспечить заданный температурный режим в помещениях ЛПУ, оборудованных однотрубными системами отопления, с помощью существующих серийных устройств контроля и регулирования не представляется возможным, прежде всего, ввиду высокого гидравлического сопротивления этих устройств.

Проведенный анализ указывает на необходимость проведения исследований и разработки устройств контроля и регулирования с низким гидравлическим сопротивлением, способных обеспечить заданный температурный режим в помещениях ЛПУ. На основании анализа отечественных и зарубежных аналогов предложена конструкция устройства контроля и регулирования, представленная на рис. 7 [8].

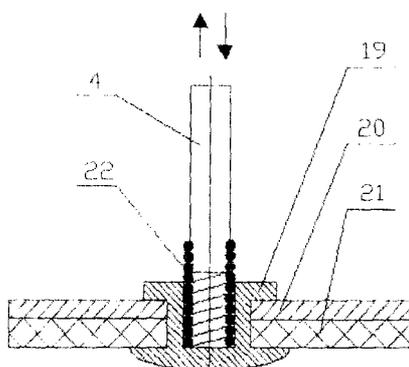


1 – кожух; 2 – датчик температуры; 3 – перегородка; 4, 5, 6 – втулки; 7 – возвратная пружина; 8 – основание; 9 – шток; 10, 11 – сальниковые уплотнения; 12 – накидная гайка; 13



1 – кожух; 2 – датчик температуры; 3 – клапан; 4 – шток; 5, 6 – втулки; 7 – возвратная пружина; 8 – перегородка; 9, 10 – сальниковые уплотнения; 11 – проходное отверстие; 12 – сменная прокладка; 13 – накидная гайка; 14 – трубопровод подачи теплоносителя; 15 – опорная шайба; 16 – основание; 17 – запорное устройство; 18 – теплоизолирующая втулка

Рис. 7. Конструкция устройства контроля и регулирования с низким гидравлическим сопротивлением



4 – шток; 19 – втулка; 20 – опорная шайба; 21 – уплотнительная прокладка; 22 – винтовая пружина

Рис. 8. Запорное устройство клапана в положении «Открыто»

Снижение гидравлического сопротивления устройства обусловлено наклонным расположением перегородки и большим диаметром проходного отверстия в перегородке (площадь перекрываемого отверстия в перегородке в 4 раза превышает площадь перекрываемого отверстия в существующем аналоге). За счет винтовой пружины запорного устройства клапана 3, один конец которой жестко закреплен во внутренней полости втулки 19, а другой жестко закреплен на конце штока 4, обеспечивается шарнирное соединение штока и запорного устройства клапана, что вместе с перегородкой, выполненной наклонно к оси трубопровода подачи теплоносителя, позволяет осуществлять плавное изменение количества теплоносителя при его регулировании, что в конечном счете снижает коэффициент гидравлического сопротивления потоку теплоносителя, поступающему из трубопровода в систему отопления.

Устройство работает следующим образом. При повышении температуры воздуха в отапливаемом помещении ЛПУ термочувствительный элемент датчика температуры 2 воздействует на шток 4, который перемещает запорное устройство 17 клапана 3 над проходным отверстием 11 перегородки 8. За счет пружины 22 запорное устройство поворачивается и диаметральной частью уплотнительной прокладки 21 упирается в наклонно расположенную перегородку 8 и, наклоняясь относительно оси штока, перекрывает проходное отверстие 11. При понижении температуры воздуха в отапливаемом помещении термочувствительный элемент датчика температуры 2 воздействует на

шток 4 в обратном направлении. Максимальный угол наклона запорного устройства клапана соответствует полному закрытию проходного отверстия в наклонной перегородке.

На рис. 8 представлено запорное устройство клапана в положении «открыто», содержащее втулку 19, связывающую опорную шайбу 20 и уплотнительную прокладку 21, причем во внутренней полости втулки закреплена винтовая пружина 22, верхний конец которой закреплен на конце штока 4. Прокладка 21 выполнена из фторопласта, а втулка после сборки её с прокладкой и шайбой развальцовывается. Крепление винтовой пружины во втулке и на конце штока осуществляется по прессовой посадке.

Конструктивной особенностью предложенного устройства контроля и регулирования температуры воздуха в помещениях ЛПУ является необходимость обеспечения большого хода штока клапана (3,5...4 мм). Для этого необходимо создать соответствующий датчик температуры, что является предметом дальнейших исследований.

Литература:

- 1 СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: Госстрой России, 2004. – 98 с.
- 2 Пособие по проектированию учреждений здравоохранения (к СНиП 2.08.02-89). Раздел 1. Общие положения. Инженерное оборудование. – М.: ГипроНИИЗдрава, 1990. – 65 с.
- 3 Латир М.А. И в XXI веке у нас неразрешимых проблем быть не должно // Энергосбережение. 2000. – № 1. – С. 3-7.
- 4 Мухин О.А. Автоматизация систем теплоснабжения и вентиляции. – Мн.: Высш. шк., 1986. – 304 с.
- 5 Богословский В.Н. Отопление / В.Н. Богословский, А.Н. Сканава. – М.: Стройиздат, 1992. – 735 с.
- 6 А.С. 1907931 СССР, МКИ G 05 D 23/00. Регулятор температуры / Л.Ф. Куклик, В.Д. Курбан, С.П. Петров. – Оpubл. 15.02.85, Бюл. № 6.
- 7 Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. – М.: Машиностроение, 1963. – 832 с.
- 8 Заявка на изобретение № 2005132121 РФ, МКИ⁷ G 05 D 23/02. Регулятор температуры / С.А. Чистович, С.П. Петров, А.И. Суздальцев, О.С. Петрова. – Оpubл. 17.10.05, Бюл. № 30.

УДК 621

Докт. техн. наук, проф. Ешуткин Д.Н., канд. техн. наук Грядунова Е.Н.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419872; E-mail: pmp@ostu.ru

БЕЗУДАРНЫЙ РЕЖИМ ДВИЖЕНИЯ КОРПУСА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

The method of indication of substance of filling applied to the control of tightness products. In clause dynamics of process bromiroving limiting hydrocarbons investigated. The limiting stage kinetic is certain and worked out the equation of distribution of particles of gas in the thermodynamic equilibrium environment. Minimal time of an establishment of stationary process is calculated.

В работах [1, 2] движение бойка ударных механизмов (УМ) изучалось при условии, что корпус неподвижен (относительное движение). Такой подход вполне оправдан в стационарных условиях, когда усилие подачи равно или превышает максимальную силу отдачи, действующую на корпус механизма. В других условиях (ручные отбойные и бурильные молотки, молоты манипуляторов машин) перемещение корпуса УМ необходимо учитывать.

Рассматривается гидравлический ударный механизм (рис. 1), состоящий из бойка 1, корпуса 2 и инструмента 3. Корпус и боёк образуют три гидравлические камеры: рабочего А, обратного Б хода и вспомогательную камеру В. К корпусу ударного механизма приложена постоянная сила R^* , меньшая по величине максимальной силы отдачи \bar{R} ($\bar{R}^* < \bar{R}$). Цикл движения бойка состоит из трех фаз: рабочий ход, разгон и торможение при обратном ходе. Продолжительность фаз соударения незначительна по сравнению с другими фазами и не учитывается. Цикл движения корпуса состоит из четырех фаз: разгон и торможение при движении от инструмента, разгон и торможение при движении к инструменту (рис. 1). Силы давления жидкости на боек и корпус во всех фазах движения постоянны.

1 Фаза рабочего хода бойка. Начало фазы характеризуется тем, что корпус прижат к бортику инструмента, боёк находится в крайнем левом положении, ($V_6 = 0$, $V_k = 0$). На боёк действует постоянная сила \bar{R} , на корпус ($\bar{R} - \bar{R}^*$). Окончание этой фазы движения соответствует моменту времени t_p , когда скорость бойка станет равной V . Тогда из условия $(R \cdot t_p) / m_6 = V$, получим:

$$t_p = \frac{2 \cdot m_6 \cdot V^2}{R \cdot 2V} = \frac{2T}{RV}, \quad (1)$$

где T энергия удара,
 V - предударная скорость бойка,
 m_6 - масса бойка.

Ускорения бойка и корпуса равны:

$$a_6 = R/m_6 ; a_k = R - R^*/m_k .$$

Введём обозначения:

$$m_6/m_k = \mu ; R^*/R = z .$$

Тогда получим:

$$a_k = a_k \cdot \mu \cdot (1 - z) ; \mu < 1 ; z < 1 .$$

За это время боёк пройдет путь:

$$x_6 = \frac{a_6 \cdot t_p^2}{2} = \frac{R}{m_6} \cdot \frac{4 \cdot T^2}{2 \cdot R^2 \cdot V^2} = \frac{T}{R} = l_p . \quad (2)$$

Перемещение корпуса за это же время:

$$x_k^{(1)} = \frac{a_k \cdot t_p^2}{2} = \frac{T}{R} \cdot \mu \cdot (1 - z) = l_p \cdot \mu \cdot (1 - z) . \quad (3)$$

Скорость корпуса в конце этой фазы движения:

$$V_k^{(1)} = V \cdot (1 - z) \cdot \mu ,$$

а его кинетическая энергия:

$$T = \frac{M_k \cdot V^2 \cdot \mu^2 \cdot (1 - z)}{2 \cdot X_1} = T \cdot \mu \cdot (1 - z)^2 ,$$

где X_1 - суммарный ход корпуса и бойка: вправо (рис. 1), где \bar{P}_0 - сила давления жидкости на боёк и корпус со стороны камеры обратного хода Б, $P_0 = \rho \cdot R$, $\rho < 1,0$. Под действием этой силы корпус тормозится (участок МО на диаграмме рис. 1), и его скорость уменьшается до нуля. Продолжительность торможения $t_k^{(2)}$ найдем, применив теорему об изменении количества движения:

$$X_1 = \frac{T}{R} \cdot [(1 + \mu \cdot (1 - z))] .$$

2 Фаза разгона бойка при обратном ходе. В это фазе на корпус действует сила ($\bar{P}_0 + \bar{R}^*$), направленная

$$0 = M_k V_k^{(1)} = -(P_0 + R^*) \cdot t_k^{(2)} .$$

Откуда получаем:

$$t_k^{(2)} = \frac{2T}{RV} \cdot \frac{(1 - z)}{(\rho + z)} = t_p \cdot \frac{(1 - z)}{(\rho + z)} . \quad (4)$$

Путь $X_K^{(2)}$, пройденный корпусом за это время, определим, применив теорему об изменении кинетической энергии:

$$0 - T_K^{(1)} = -(P_0 + R^*) \cdot X_K^{(2)};$$

$$X_K^{(2)} = \frac{T}{R} \cdot \mu \cdot \frac{(1-z)}{(\rho+z)} = l_p \cdot \mu \cdot \frac{(1-z)^2}{(\rho+z)} \quad (5)$$

Общий отход корпуса от буртика инструмента:

$$X_K^{(1)} + X_K^{(2)} = l_D \cdot \mu \cdot \frac{(1-z) \cdot (1+\rho)}{\rho+z} \quad (6)$$

на боек в этой фазе действует сила $P_0 = \rho \cdot R$, а его ускорение определяется по формуле:

$$a_b^{(2)} = \frac{\rho \cdot R}{m_b \cdot (1 + \mu_{ж})}$$

где $\mu_{ж} = m_{ж}^{пр} / m_b$, $m_{ж}^{пр}$ — приведенная к бойку масса жидкости сливного трубопровода.

За время t_1 боек проходит путь, значение которого определяется по следующей формуле:

$$X_1^{(6)} = \frac{\rho \cdot R \cdot t_1^2}{2 \cdot m_b \cdot (1 + \mu_{ж})};$$

скорость бойка в конце разгона равна:

$$V_1^{(6)} = \frac{\rho \cdot R}{m_b \cdot (1 + \mu_{ж})} \cdot t_1.$$

3 Фаза торможения бойка при обратном ходе. В этой фазе на боек действует сила \vec{R} , под действием которой он тормозится, и его скорость уменьшается до нуля. Путь торможения бойка $X_T^{(6)}$ найдем, применив теорему об изменении кинетической энергии:

$$0 - \frac{m_b \cdot V_1^{(6)^2}}{2} = -R \cdot X_T^{(6)}.$$

Отсюда получаем:

$$X_T^{(6)} = \frac{\rho^2 R \cdot t_1^2}{2 \cdot m_b \cdot (1 + \mu_{ж})^2}.$$

Суммарный путь бойка $[X_1^{(6)} + X_T^{(6)}]$ должен быть равен его перемещению в фазе рабочего хода l_p . Тогда получим:

$$\frac{\rho \cdot R \cdot t_1^2}{2m_b(1 + \mu_{ж})} + \frac{\rho^2 R \cdot t_1^2}{2m_b(1 + \mu_{ж})^2} = \frac{T}{R}.$$

После преобразования находим:

$$t_1 = t_p \cdot \frac{(1 + \mu_{ж})}{\sqrt{\rho(1 + \mu_{ж} + \rho)}}.$$

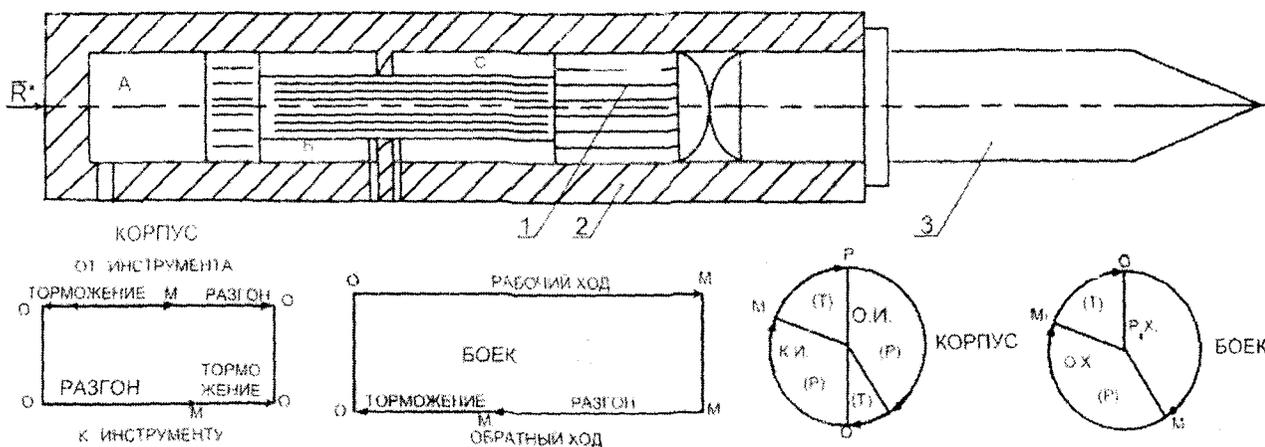


Рис. 1. Диаграмма движения бойка и корпуса

Длительность $t_T^{(6)}$ фазы торможения бойка найдём по теореме об изменении количества движения:

$$0 - m_b \cdot V_1^{(6)} = -R \cdot t_T^{(6)},$$

С учетом найденного выражения для t_1 :

$$V_1^{(6)} = V \cdot \frac{\rho}{\sqrt{\rho \cdot (1 + \mu_{ж} + \rho)}}.$$

тогда:

$$t_T^{(6)} = t_p \cdot \frac{\rho}{\sqrt{\rho \cdot (1 + \mu_{ж} + \rho)}}.$$

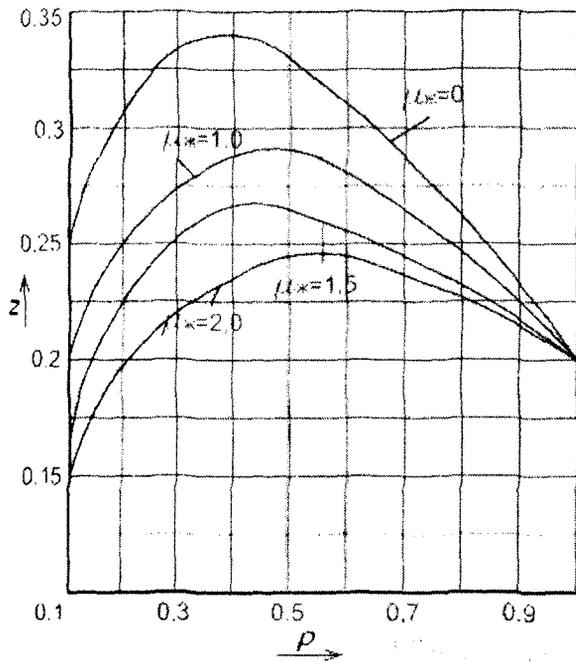


Рис. 2. Зависимости коэффициента силы нажатия от относительной величины усилия обратного хода

Так как $t_k^{(2)} < t_1$, то за оставшееся время $t_1 - t_k^{(2)}$ корпус под действием силы $P_0 + \bar{R}^*$ движется ускоренно вправо. На рис. 1 это участок O_1M_1 , при этом его ускорение равно:

$$a_k^{(3)} = \frac{P_0 + \bar{R}^*}{M_k}$$

В конце фазы разгона бойка корпус имеет скорость:

$$V_k^{(3)} = V \cdot \mu \left[\frac{(1 + \mu_{жк})}{\sqrt{\rho \cdot (1 + \mu_{жк} + \rho)}} - \frac{(1 - z)}{(\rho + z)} \right] \quad (7)$$

За это время корпус проходит путь, значение которого можно определить с помощью следующего выражения:

$$X_k^{(3)} = \frac{R(\rho + z)}{2M_k} (t_1 - t_k^{(2)})^2 = l_p \cdot \mu \times \left[\frac{(1 + \mu_{жк})}{\sqrt{\rho \cdot (1 + \mu_{жк} + \rho)}} - \frac{(1 - z)}{(\rho + z)} \right]^2 \quad (8)$$

В этой фазе на корпус действует сила $\bar{R} - \bar{R}^*$, направленная влево (рис. 1). Под действием этой силы он получает замедление $\bar{R} - \bar{R}^*/M_k$ и за время $t_k^{(4)}$ его скорость уменьшается до нуля, а корпус подходит буртику инструмента. Так как время $t_k^{(4)}$ по длительности равно фазе торможения бойка t_T , то по условию $V_k^{(3)} - \frac{R - R^*}{M_k} \cdot t_T = 0$, получим:

$$\frac{(1 + \mu_{жк})}{\sqrt{\rho \cdot (1 + \mu_{жк} + \rho)}} - \frac{(1 - z)}{(\rho + z)} = 0 \quad (9)$$

Это одно из условий существования безударного режима движения корпуса. Графические зависимости коэффициента силы нажатия z от относительного усилия ρ приведены на рис. 2.

Путь, пройденный корпусом за время $t_k^{(4)} = t_T$, найдём, приравняв кинетическую энергию корпуса к работе сил торможения:

$$0,5 \cdot M_k (V_k^{(3)})^2 = (R - R^*) X_k^{(4)}$$

$$X_k^{(4)} = l_p \frac{\mu}{(1 - z)} \left[\frac{(1 + \mu_{жк})}{\sqrt{\rho \cdot (1 + \mu_{жк} + \rho)}} - \frac{(1 - z)}{(\rho + z)} \right]^2 \quad (10)$$

Перемещение (отход) корпуса от инструмента влево $X_k^{(1)} + X_k^{(2)}$ должно быть равно перемещению вправо (к буртику инструмента), т.е. $X_k^{(3)} + X_k^{(4)}$.

$$X_k^{(3)} + X_k^{(4)} = l_p \frac{\mu}{(1 - z)} \times \left[\frac{(1 + \mu_{жк})}{\sqrt{\rho \cdot (1 + \mu_{жк} + \rho)}} - \frac{(1 - z)}{(\rho + z)} \right]^2 \cdot \left[\frac{(1 - z)(\rho + z) + 1}{(1 - z)} \right] \quad (11)$$

Приравнявая правые части уравнений (6) и (11), получим:

$$\frac{(1 - z)(1 + \rho)}{\rho + z} = \left[\frac{(1 + \mu_{жк})}{\sqrt{\rho \cdot (1 + \mu_{жк} + \rho)}} - \frac{(1 - z)}{(\rho + z)} \right]^2 \times \left[\frac{(1 - z)(\rho + z) + 1}{(1 - z)} \right] \quad (12)$$

Это второе условие существования безударного режима движения корпуса механизма. Графики зависимостей коэффициента силы нажатия от относительного усилия обратного хода, построенные в соответствии с уравнением (12) приведены на рис. 3.

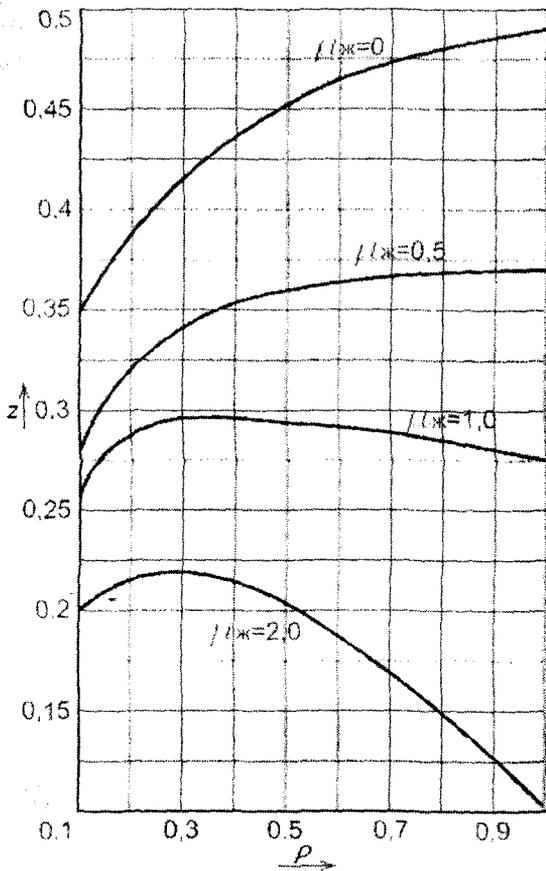


Рис. 3. Зависимости коэффициента силы нажатия от относительного усилия обратного хода

Таким образом, получены условия существования безударного режима движения корпуса гидравлических ударных механизмов: необходимость выполнения соотношения между силой подачи R^* и силой P_0 , действующей на боек при обратном ходе.

$$\frac{(1 + \mu_k)}{\sqrt{\rho(1 + \mu_k + \rho)}} \cdot \frac{(1 - z)}{(\rho + z)} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{(1 + \mu_k)}{\sqrt{\rho(1 + \mu_k + \rho)}} \cdot \frac{(1 - z)^2}{(\rho + z)^2} = \frac{(1 - z)^2(1 + \rho)}{[(1 - z)(\rho + z) + 1](\rho + z)}$$

После некоторых преобразований получим:

$$\frac{\rho}{(1 + \mu_k + \rho)} = \frac{(1 - z)^2(1 + \rho)}{[(1 - z)(\rho + z) + 1](\rho + z)} \quad (14)$$

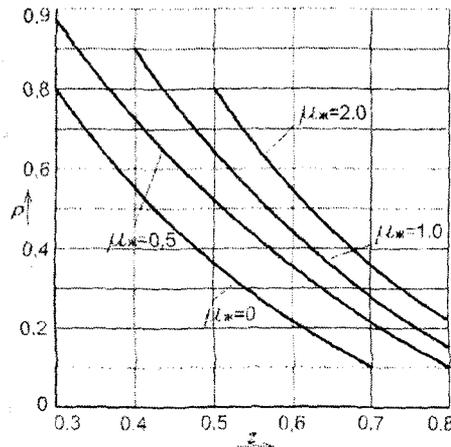


Рис. 4. Зависимости движущей силы от силы подачи при безударном режиме движения корпуса ударного механизма

В результате решения уравнение (14) получены графические зависимости относительных величин: движущей силы P_0 и силы подачи R^* (рис. 4).

Полученные зависимости позволяют утверждать следующее:

- безударный режим движения корпуса возможен при любом соотношении масс (μ) бойка и корпуса;
- для каждой величины приведенной массы жидкости существует определенная зона существования безударного режима движения корпуса;
- каждому значению силы подачи (z) соответствует строго определенное значение движущего усилия (ρ), при котором может быть выполнен данный режим движения.

Литература:

1 Янцен И.А. Основы теории и конструирования гидроннево-ударников / И.Ф. Янцен, Д.Н. Ешуткин, В.В. Бородин. – Кемерово, 1977.
 2 Горбунов В.Ф. Гидравлические отбойные и бурильные молотки / В.Ф. Горбунов, Д.Н. Ешуткин, Г.Г. Пивень, Г.С. Тен. – Новосибирск, 1982.

УДК 620.179.118.7

Асп. Петрусенко И.А.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орёл, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

МЕТОД ТОЧЕЧНОГО НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА УМЕНЬШАЮЩИМСЯ ПО ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМУ ЗАКОНУ ТОКОМ

To make method permitting anyone to determine metal slug parameters concerning different depths of this slug is very useful. Dynamic methods allow getting comprehensive facilities for research metals properties and ferrous compounds. Based on heating or cooling of the slug, previously mentioned methods let to determine gradients of different metals properties. One of these dynamic methods described in this article. This is spot heat method for material's surface rested on exponentially reducing current.

При исследовании свойств металлов и сплавов большое распространение получили методы, основанные на измерении параметров этих материалов при различных температурах.

Все технологические процессы обработки металлов и сплавов не позволяют получить полной их однородности, тем более что в некоторых случаях ее создают умышленно, так поверхностная закалка стали обуславливает изменение свойств металла, зависимое от глубины погружения в материал. В связи с этим разработка метода определения характеристик металла на различной глубине заготовок представляет достаточно большой интерес.

В условиях равномерного нагрева заготовки существующие методы позволяют измерить либо механические характеристики толстого поверхностного слоя, как, например, при методе определения твердости вдавливания индентором, либо электрические свойства этого слоя токовым или индуктивным методом, либо интегральные характеристики всего образца по его модулю упругости, электропроводности и т. д.

Большие возможности исследования свойств металлов и сплавов дают динамические методы, основанные на нагреве или охлаждении заготовки и позволяющие определить градиенты для различных свойств материала.

Одним из таких является метод точечного нагрева поверхности образца исследуемого материала. Нагрев, в этом случае, может проводиться либо источником с постоянной высокой температурой, что исследовано в работе [1], либо источником с изменяющейся температурой, что менее изучено. В связи с этим рассмотрим метод точечного нагрева поверхности материала уменьшающимся по экспоненциальному закону током.

В цепи, проиллюстрированной рис. 1, во время замыкания ключа K_1 источник питания E заряжает конденсатор C_k . На заготовку перпендикулярно ее поверхности с постоянным усилием прижатия опущен спай термопары, через который после

размыкания K_1 и замыкания ключа K_2 в материал заготовки проходит уменьшающийся по экспоненциальному закону ток I разряда конденсатора, нагревающий как спай термопары, так и находящиеся под ним слои образца исследуемого материала:

$$I = I_0 e^{\frac{-t}{R_{\text{ц}} C_k}}, \quad (1)$$

где I_0 – ток в начальный момент времени после замыкания ключа K_2 ;

t – время, прошедшее после замыкания ключа K_2 ;

$R_{\text{ц}}$ – сопротивление цепи разряда конденсатора;

C_k – емкость конденсатора.

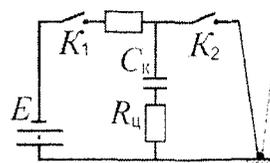


Рис. 1. Цепь разряда конденсатора

При расчете нагрева термопары и образца примем модель, в которой спай термопары имеет сферическую форму и из него выходят два провода термопары, что иллюстрирует рис. 2.

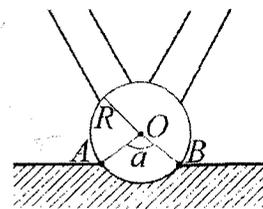


Рис. 2. Внедрение спая в заготовку

Под действием постоянной прижимающей силы спай радиусом R вдавливаем в поверхность исследуемого материала. Причём степень вдавливания может быть охарактеризована плоским углом внедрения α , образованным двумя проходящими через центр спая (точка O на рис. 2) и точки касания поверхностей спая и образца (A и B на рис. 2) прямыми.

Телесный угол ω внедрения сая в исследуемый материал выражаем через плоский угол:

$$\omega = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (2)$$

Площадь поверхности контакта сая с исследуемым материалом:

$$S = \frac{S_{\text{шара}} \omega}{4\pi} = \frac{4\pi R^2 \omega}{4\pi} = R^2 \omega. \quad (3)$$

Разделим образец на равные по толщине dr и концентрически расположенные относительно поверхности сая сферические слои (рис. 3).

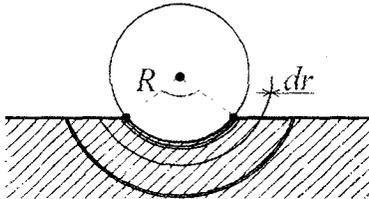


Рис. 3. Деление образца на слои dr

Плоский центральный угол дуги α_r , образованной двумя прямыми, проходящими через центр сая и точки касания поверхностей сая и образца (точки C и D на рис. 4):

$$\alpha_r = 2 \left(\frac{2\pi}{360} \arccos \left(\frac{R \cos \frac{\alpha}{2}}{r} \right) \right), \quad (4)$$

где r – радиус окружности, образующей сферический слой.

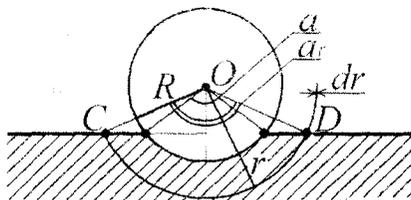


Рис. 4. Расчет центрального угла α_r

Телесный угол ω_r , соответствующий плоскому углу α_r :

$$\omega_r = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\alpha_r}{2} \right). \quad (5)$$

Площадь поверхности сферического слоя S_r :

$$S_r = r^2 \omega_r. \quad (6)$$

Сопротивление сферического слоя

dR_{r_i} проходящему через него току:

$$dR_{r_i} = \rho \frac{dr}{S_r}. \quad (7)$$

где ρ – удельное сопротивление материала образца при температуре T .

При прохождении тока через образец последний нагревается, меняя свое удельное сопротивление:

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (8)$$

где ρ_0 – табличное значение удельного сопротивления;

β – температурный коэффициент сопротивления материала образца;

ΔT – разность температур ($\Delta T = T - T_0$);

T – температура до которой нагрет материал;

T_0 – начальная температура, при которой определено значение ρ_0 .

Мощность dP , продуцируемая током при прохождении им сферического слоя:

$$dP = I^2 dR_{r_i}. \quad (9)$$

мощность dP_{yx} , уходящая из сферического слоя:

$$dP_{yx} = \frac{S_r \lambda dT}{dr}, \quad (10)$$

где λ – удельная теплопроводность материала образца.

Мощность $dP_{прих}$, приходящая из предыдущего сферического слоя:

$$dP_{прих} = S_r \lambda \left(\frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} dr \right). \quad (11)$$

Общая мощность $dP_{нагр}$, которая обуславливает нагрев материала сферического слоя:

$$dP_{нагр} = dP_{прих} - dP_{yx} + dP. \quad (12)$$

Подставив формулы (9), (10), (11) в формулу (12), получаем:

$$\begin{aligned} dP_{нагр} &= S_r \lambda \left(\frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} dr \right) - S_r \lambda \frac{dT}{dr} + I^2 dR_{r_i} = \\ &= S_r \lambda \frac{dT}{dr} + S_r \lambda \frac{d^2T}{dr^2} dr - S_r \lambda \frac{dT}{dr} + I^2 dR_{r_i} = \\ &= S_r \lambda \frac{d^2T}{dr^2} dr + I^2 dR_{r_i} \end{aligned} \quad (13)$$

Объем dV сферического слоя:

$$dV = (dV_{сегм} - dV_{кон}) - (V_{сегм} - V_{кон}), \quad (14)$$

где $dV_{сегм}$ – объем сегмента шара с телесным углом ω ;
 $dV_{кон}$ – объем конуса, заключенного внутри $dV_{сегм}$;
 $V_{сегм}$ – объем сегмента шара с телесным углом ω ;
 $V_{кон}$ – объем конуса, заключенного внутри $V_{сегм}$.

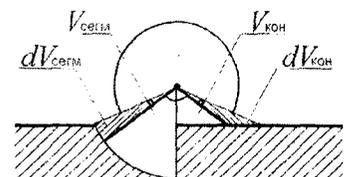


Рис. 5. Деление на сегменты

Расчет dV проиллюстрирован рис. 5.

$$dV_{сегм} = V_{шара} \frac{\omega_r}{4\pi} = \frac{4\pi}{3 \cdot 4\pi} r^3 \omega_r = \frac{1}{3} r^3 \omega_r. \quad (15)$$

$$V_{сегм} = V_{шара} \frac{\omega}{4\pi} = \frac{4\pi}{3 \cdot 4\pi} R^3 \omega = \frac{1}{3} R^3 \omega. \quad (16)$$

$$V_{кон} = \frac{1}{3} \pi \left(R \sin \frac{\alpha}{2} \right)^2 R \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (17)$$

$$dV_{\text{кон}} = \frac{1}{3} \pi \left(r \sin \frac{\alpha_r}{2} \right)^2 R \cos \frac{\alpha}{2} \quad (18)$$

Подставляя формулы (15), (16), (17), (18) в формулу (14), получаем:

$$dV = \frac{1}{3} \left[\begin{aligned} & \left(r^3 \omega_r - \pi \left(r \sin \frac{\alpha_r}{2} \right)^2 R \cos \frac{\alpha}{2} \right) \\ & - \left(R^3 \omega - \pi \left(R \sin \frac{\alpha}{2} \right)^2 R \cos \frac{\alpha}{2} \right) \end{aligned} \right] \quad (19)$$

Масса сферического слоя m_r :

$$m_r = \zeta dV, \quad (20)$$

где ζ - плотность материала образца.

Изменение температуры сферического слоя dT , приобретенное им в результате нагрева материала током I в течение интервала времени $d\tau$.

$$dT = \frac{dP_{\text{нагр}} d\tau}{C m_r} \quad (21)$$

Подставив формулы (7), (13), (20) в формулу (21), получаем:

$$dT = \left(\frac{S_r \lambda d^2 T}{dr^2} dr + I^2 \frac{dR}{r} \right) \frac{d\tau}{C \zeta dV} = \left(\frac{S_r \lambda d^2 T}{dr^2} dr + \frac{I^2 \rho}{S_r} dr \right) \frac{d\tau}{C \zeta dV} = \frac{dr d\tau}{C \zeta dV} \left(\frac{d^2 T}{dr^2} S_r \lambda + \frac{I^2 \rho}{S_r} \right) \quad (22)$$

Здесь переменные заданы выражениями:

$$S_r = r^2 \omega_r; \quad I = I_0 e^{-\frac{\tau}{R_r C_r}}; \quad \rho = \rho_0 (1 + \beta \cdot \Delta T)$$

$$dV = \frac{1}{3} \left[\begin{aligned} & \left(r^3 \omega_r - \pi \left(r \sin \frac{\alpha_r}{2} \right)^2 R \cos \frac{\alpha}{2} \right) \\ & - \left(R^3 \omega - \pi \left(R \sin \frac{\alpha}{2} \right)^2 R \cos \frac{\alpha}{2} \right) \end{aligned} \right]$$

Полученное уравнение (22) решаем численным методом. Приведём его решение в виде рис. 6 для условия, что $R = 25$ мкм, $\alpha = 90^\circ$, ширина каждого слоя $\Delta = 4 \cdot 10^{-5}$ м, номер слоя $n \in [1; 20]$, $T_0 = 20^\circ \text{C}$, $\rho_0 = 3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, $I_0 = 100$ А, $\zeta = 7812$ кг/м³, $C = 480$ Дж/(К·кг), время действия тока на материал образца с начала момента движения тока по слоям делим на равные интервалы τ по $2 \cdot 10^{-5}$ с, $\beta = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $R_{\text{ц}} = 0,05$ Ом, $C_{\text{к}} = 0,01$ Ф.

Расчёт показывает, что первый слой материала при заданных условиях прогревается в течение восьми принятых интервалов времени, что соответствует 16 мкс и затем начинает остывать за счёт ухода теплоты в более глубокие слои материала.

При необходимости более быстрого нагрева поверхностного слоя до максимальной температуры целесообразно уменьшать значение постоянной времени разряда конденсатора. На основании данных расчёта так же видно, что через промежуток больший восьми принятых интервалов времени более нагретыми оказываются внутренние слои исследуемого материала образца.

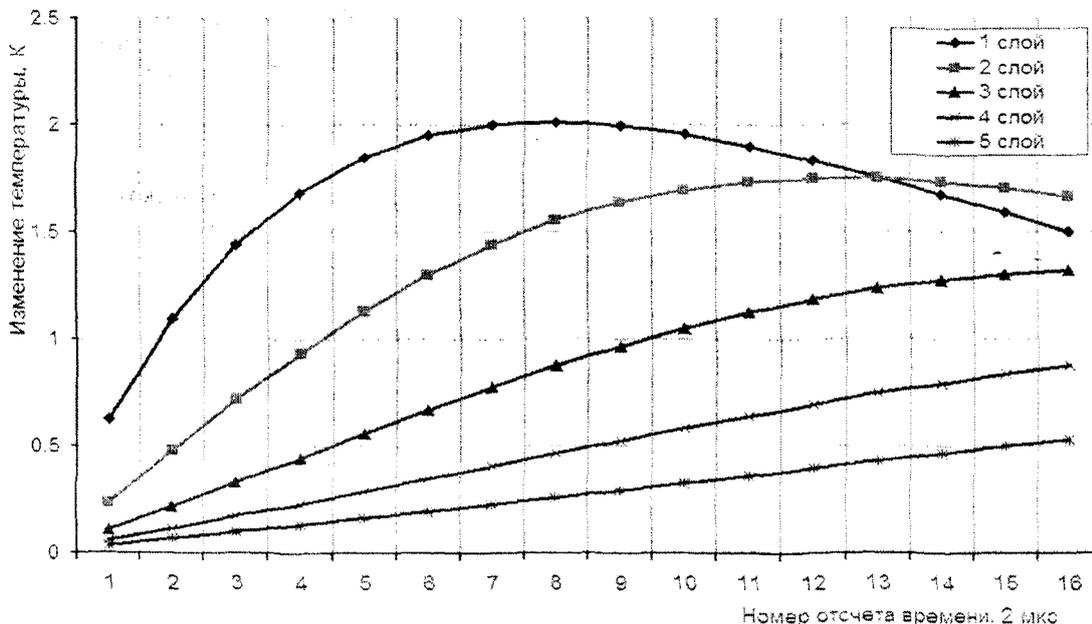


Рис. 6. Изменение с течением времени температуры в слоях исследуемого материала

Литература:

1. Нестерович Ю.И. К вопросу контроля механических свойств изделий термoeлектрическим

методом // Матер. ВНТК «Диагностика веществ, изделий и устройств». — Орёл, ОрёлГТУ, 1999. — С. 135-137.

УДК 621.383.(088.8)

Волков М.А., канд. техн. наук Иванов Ю.Б., Наумов Е.Ю.
(Академия ФСО)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

СВЕТОЧАСТОТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

The photo-diode with the combined feedback on the basis of univocal operational amplifiers and digital microcircuits is offered to be applied converters to increase of sensitivity and accuracy of the digital control of sizes of light exposure or a light stream.

Преобразователи излучения в частоту импульсов применяют в приборах фотометрического контроля запыленности и задымленности помещений, в хроматографической аппаратуре, в системах телеметрии, системах пожарной сигнализации, в волоконно-оптических системах связи и т.п. Повышение качества современных электронных компонентов позволяет обеспечить высокую стабильность фотоэлектрического преобразования и расширить диапазон контроля световых параметров. В частности, применение современных фотодиодов и фотоприемных модулей, например, типов ФП1-850, PD-1375 и т.п., с темновым током не более (1...5) нА и задержкой срабатывания менее (1...4) нс даёт возможность значительно повысить световую чувствительность и расширить динамический диапазон фотоприемников.

Вследствие этого точностные характеристики аппаратуры контроля практически ограничиваются только параметрами электронных компонентов и узлов, применяемых для преобразования световых величин в электрические величины (в напряжение, в частоту или скважность импульсов).

Существующие способы фотоэлектрического преобразования основаны на использовании фотодиода, включаемого на входе операционного усилителя с резистором R_{OC} в цепи обратной связи, служащего для преобразования фототока в напряжение, которое затем сравнивается с допустимым уровнем или кодируется для дальнейшей цифровой обработки информации. Чувствительность таких устройств ограничена нестабильностью входных токов операционных усилителей, а также влиянием температуры на значение темнового тока применяемых фотодиодов [1].

Современные зарубежные усилители на МОП транзисторах, например, типа LMС7101, имеют относительно малые входные токи (от 0,1 до 1 нА) и однополярное напряжение питания (от 3 до 5 В). Это упрощает их согласование как с фотодиодом, так и цифровой частью аппаратуры. В итоге, чувствительность фотоэлектрических преобразователей практически ограничивается номиналом и нестабильностью резистора R_{OC} , применяемого в традиционной схеме для преобразования тока фотодиода $I_{ФД}$ пропорционального световому потоку, в выходное напряжение усилителя $U_{ВЫХ} = I_{ФД} R_{OC}$ [2].

Использование непосредственного преобразования фототока $I_{ФД}$ в частоту импульсов $f_{ВЫХ}$ даёт возможность уменьшить инструментальную погрешность и упростить цифровые узлы аппаратуры контроля, поскольку кодирование частоты импульсов является наиболее простой операцией по сравнению с аналого-цифровым преобразованием напряжения.

При разработке светочастотных преобразователей в общем случае требуется учитывать ряд противоречивых требований, относящихся к чувствительности, точности, линейности, быстродействию, аппаратурным затратам, надежности и энергопотреблению аппаратуры контроля. Одновременное выполнение всех этих требований является довольно сложной задачей, поэтому практически учитывают наиболее существенные из них, в зависимости от назначения или области применения фотометрических приборов.

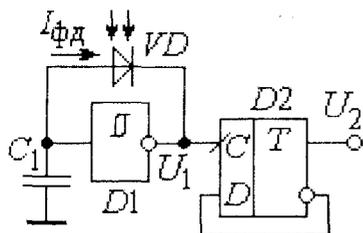
Наиболее простыми являются светочастотные преобразователи на основе триггера Шмитта, в которых фотодиод VD включается в цепь отрицательной обратной связи и одновременно используется для линейного заряда фототоком $I_{ФД}$ времязадающего конденсатора C_1 и его быстрого разряда после срабатывания триггера Шмитта (рис. 1).

Частота выходных импульсов $f_{ВЫХ}$ в преобразователе на логическом триггере Шмитта (рис. 1, а) зависит от его зоны гистерезиса $\Delta U_T \approx (0,5...1)$ В и прямо пропорциональна току $I_{ФД}$ фотодиода: $f_{ВЫХ1} = I_{ФД} / \Delta U_T C_1$. При заряде конденсатора C_1 выходное напряжение КМОП триггера Шмитта $D1$ определяется напряжением питания $U_1 \approx U_{ПИТ} = 5$ В. К фотодиоду VD приложено обратное напряжение, поэтому его ток $I_{ФД}$ линейно зависит от силы света. После срабатывания триггера Шмитта $D1$ диод VD открывается, и через него конденсатор C_1 быстро разряжается до начального состояния.

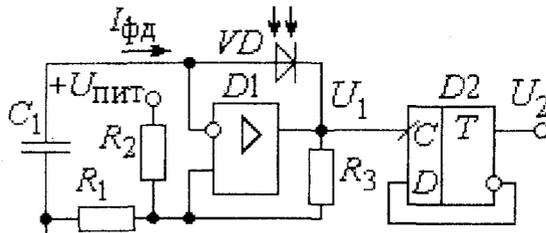
При таком режиме работы на выходе триггера Шмитта $D1$ формируются короткие импульсы нулевого уровня, частота $f_{ВЫХ1}$ которых понижается вдвое D -триггером $D2$. На выходе этого триггера формируется последовательность импульсов, имеющих частоту $f_{ВЫХ2} = f_{ВЫХ1} / 2$ и скважность $Q = 2$.

Экспериментально установлено, что применение триггера Шмитта типа К561ТЛ1А с конденсатором C_1

≈ 200 пФ и триггером $D2$ типа К561ТМ2 позволяет обеспечить чувствительность схемы $S_1 = \Delta f_{\text{вых2}} / \Delta I_{\text{ФД}} \approx 5$ кГц/мкА и высокую линейность характеристики преобразования при частоте выходных импульсов до 200 кГц. Недостатком схемы такого частотного



а



б

Рис. 1. Светочастотные преобразователи на триггерах Шмитта

Значительно лучшей стабильностью характеризуется светочастотный преобразователь с триггером Шмитта на операционном усилителе $D1$ с однополярным напряжением питания (рис. 1, б). В этом устройстве делителем на резисторах $R_1 = R_2$ задается начальное напряжение на неинвертирующем входе усилителя, примерно равное половине напряжения питания. Третьим резистором R_3 устанавливается ширина зоны гистерезиса $\Delta U_{\Gamma} = U_{\text{пит}} R_1 / 2R_3 \approx 2$ В триггера Шмитта. При этом частота импульсов на выходе второго триггера $D2$ зависит от напряжения питания $U_{\text{пит}} = 5$ В и прямо пропорциональна току $I_{\text{ФД}}$ фотодиода: $f_{\text{вых2}} = I_{\text{ФД}} R_3 / U_{\text{пит}} R_1 C_1$. Изменение зоны гистерезиса для подстройки чувствительности такого преобразователя сравнительно просто реализуется регулировкой или подбором резистора R_3 , установленного в цепи положительной обратной связи триггера Шмитта на усилителе $D1$.

Для формирования стабильной зоны гистерезиса ΔU_{Γ} можно использовать положительную обратную связь по переменному току. В преобразователе фототока в частоту (рис. 2) током $I_{\text{ФД}}$ фотодиода VD линейно заряжаются конденсаторы C_1 и C_2 до порога срабатывания $U_{\text{пор}} \approx 0,5U_{\text{пит}}$ логического повторителя на элементе "Исключающее ИЛИ" $D1.1$. При его переключении через конденсатор C_2 подается импульс положительной обратной связи, повышающий напряжение на входе элемента $D1.1$ до напряжения питания. После этого переключается логический инвертор на элементе $D1.2$, открывается фотодиод VD в цепи отрицательной обратной связи генератора и быстро разряжает оба конденсатора до исходного состояния.

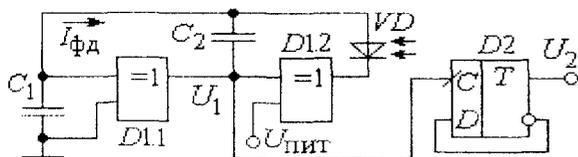


Рис. 2. Схема преобразователя на основе генератора импульсов

В схеме преобразователя (рис. 2) емкостным делителем C_1 и C_2 формируется зона гистерезиса, равная $\Delta U_{\Gamma} = U_{\text{пит}} C_1 / (C_1 + C_2) \leq 0,5U_{\text{пит}}$, от которой зависит частота выходных импульсов. При

преобразователя (рис. 1, а) является влияние температуры на стабильность частоты импульсов из-за уменьшения зоны гистерезиса ΔU_{Γ} при повышении температуры.

выполнении условия $C_1 = C_2$ частота последовательности импульсов на выходе триггера $D2$ будет прямо пропорциональна току $I_{\text{ФД}}$ фотодиода и определяется формулой $f_{\text{вых2}} = I_{\text{ФД}} / 2U_{\text{пит}} C_1$.

Общим достоинством рассмотренных схем (рис. 1 и 2) является простота практической реализации, так как они содержат минимальное количество компонентов. В частности, в последнем устройстве достаточно использовать одну микросхему типа К561ЛП2 в качестве повторителя $D1.1$ и логического инвертора $D1.2$, и микросхему К561ТМ2 – в качестве триггера $D2$.

Такие светочастотные преобразователи целесообразно использовать в микроамперном диапазоне выходного тока фотодиода. Однако в высокочувствительных фотоприемных устройствах, предназначенных для контроля слабых световых потоков, необходимо использовать другие схемотехнические решения, основанные на применении интеграторов на операционных усилителях с импульсной обратной связью.

В высокочувствительном светочастотном преобразователе (рис. 3) применен интегратор на операционном КМОП усилителе $D1$ с однополярным напряжением питания $U_{\text{пит}} = 5$ В, охваченный цепью положительной обратной связи на резисторах $R_1 - R_3$. При этом резисторы $R_2 = R_3$ одновременно задают напряжение начального смещения $U_{\text{см}} \approx 0,5U_{\text{пит}}$ на неинвертирующем входе $D1$. На инвертирующем входе $D1$ собран триггер Шмитта, имеющий зону гистерезиса $\Delta U_{\Gamma} = U_{\text{пит}} R_4 / R_5 \approx 2$ В.

Линейный заряд интегрирующего конденсатора C_1 в первом такте преобразования выполняется током $I_{\text{ФД}}$ фотодиода VD до момента срабатывания триггера Шмитта. Во втором такте происходит разряд конденсатора C_1 через ключевой транзистор VT и токоограничивающий резистор R_6 .

При выборе тока разряда $I_{\text{РАЗ}}$ конденсатора C_1 через транзистор VT по условию $I_{\text{РАЗ}} \gg I_{\text{ФД}}$, время разряда будет намного меньше длительности первого такта, поэтому частота импульсов прямо пропорциональна току фотодиода и определяется формулой: $f_{\text{вых}} = I_{\text{ФД}} R_5 (R_1 + 0,5R_2) / U_{\text{пит}} R_1 C_1 R_4$.

Особенностью данного устройства является значительное повышение скорости интегрирования малых значений фототока за счет применения

интегратора с положительной обратной связью. По сравнению с обычной схемой интегратора (рис. 1, б), в которой скорость заряда времязадающего конденсатора C_1 определяется выражением $V_C = I_{ФД}/C_1$, [В/мкс], в интеграторе с положительной обратной связью (рис. 3) скорость заряда повышается до уровня:

$$V_{C, \text{пос}} = I_{ФД} \cdot (R_1 + 0,5R_2) / R_1 C_1 = V_C \cdot (R_1 + 0,5R_2) / R_1, \text{ [В/мкс]}.$$

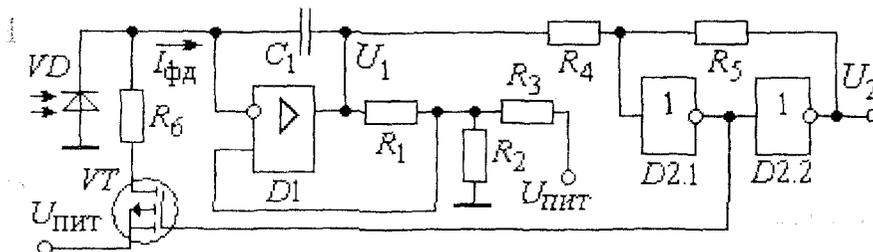


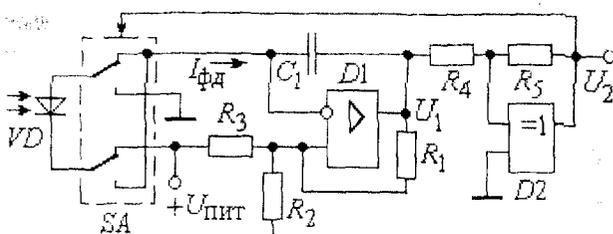
Рис. 3. Схема высокочувствительного частотного преобразователя

При сравнительно малых темновых токах современных фотодиодов основное влияние на точность частотного преобразования слабого светового потока оказывают инструментальные погрешности операционного усилителя. Поэтому в высокочувствительных преобразователях нужно применять усилители с низким напряжением смещения, малым температурным дрейфом и с наноамперными входными токами. Кроме того, для исключения этих составляющих погрешности можно использовать автоматическую коррекцию – изменять направление тока фотодиода в разных тактах преобразования.

В двухтактном преобразователе (рис. 4) фотодиод VD через переключатель SA сначала подключается к входу интегратора D1 катодом, а во втором такте – анодом. Поэтому в первом такте преобразования выходное напряжение интегратора U_1 линейно нарастает пропорционально фототоку $I_{ФД}$ до момента срабатывания триггера Шмитта на элементах D2, R4, R5, который управляет переключателем SA. Во втором такте напряжение U_1 линейно понижается до момента переключения триггера Шмитта в исходное состояние, после чего процесс повторяется. Чередование тактов заряда и разряда конденсатора C_1 вызывает появление на выходе триггера Шмитта прямоугольных импульсов, частота которых прямо пропорциональна току $I_{ФД}$ фотодиода и определяется выражением:

$$f_{\text{вых}} = I_{ФД} R_5 (R_1 + 0,5R_2) / 2U_{\text{пит}} R_1 C_1 R_4.$$

В устройстве за счет двукратного уменьшения частоты обеспечивается автоматическая компенсация аддитивных погрешностей интегратора.



Например, при выборе сопротивлений резисторов $R_1 = 2 \text{ кОм}$, $R_2 = R_3 = 200 \text{ кОм}$ достигается 50-кратное повышение скорости заряда интегрирующего конденсатора и, соответственно, аналогичное повышение чувствительности светочастотного преобразователя.

Рис. 4. Схема переключаемого светочастотного преобразователя

Во всех рассмотренных преобразователях минимальная частота выходных импульсов определяется темновым током или фоновой засветкой фотодиода. Для исключения влияния этих факторов целесообразно применять цифровую коррекцию результатов преобразования. Такая коррекция возможна в аппаратуре с собственным источником светового излучения и фотоприемным устройством, контролирующей изменение светового потока, проходящего через исследуемую среду или отражаемого от объекта. Синхронизация работы источника и приемника излучения позволяет реализовать модуляцию светового потока и снизить инструментальную погрешность [3].

В цифровом фотометре с автоматической коррекцией погрешностей, предназначенном для контроля оптических характеристик материалов (рис. 5), цикл измерения выполняется за два такта. В такте коррекции $T_{\text{кор}}$ микроконтроллер размыкает ключ SA, и темновой ток I_T фотодиода VD2 преобразуется в частоту f_T , которая в течение времени измерения $T_{\text{изм}}$ суммируется в реверсивном счетчике РСИ для получения кода $N_T = f_T T_{\text{изм}}$. Этот код записывается в регистр памяти микроконтроллера и используется в дальнейшем для коррекции результатов преобразования. Во втором такте замыкается ключ SA, через который на светодиод VD1 подается ток $I_{\text{пит}}$ от генератора тока ГТ, и преобразуется в частоту $f_{\text{вых}}$ ток $I_{ФД}$ фотодиода, пропорциональный световому потоку Φ_x , проходящему через объект контроля. За время измерения на реверсивный счетчик проходит число импульсов:

$$N_x = f_{\text{вых}} T_{\text{изм}} = (f_x + f_T) T_{\text{изм}}$$

пропорциональное сумме темнового и измеряемого тока фотодиода VD2.

Для автоматической коррекции результатов частотного преобразования в реверсивный счетчик РСИ записывается код N_T перед началом такта измерения. При этом счетчик сначала устанавливается микропроцессором в режим

вычитания, а после появления импульса на его выходе переполнения переводится в режим суммирования. Поэтому в конце цикла преобразования на выходах реверсивного счетчика формируется код:

$$N_{\text{ВЫХ}} = f_x T_{\text{ИЗМ}}$$

не зависящий от темнового тока I_T фотодиода $VD2$.

При контроле слабых световых потоков длительность такта измерения $T_{\text{ИЗМ}}$ устанавливается кратной периоду промышленной частоты, что позволяет снизить влияние наводок частоты 50 Гц на результат преобразования.

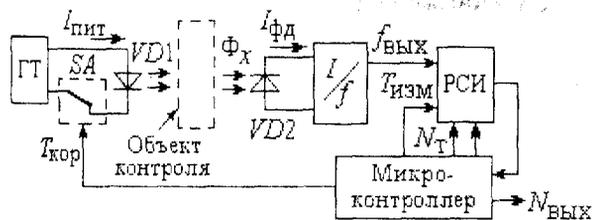


Рис. 5. Структурная схема цифрового светочастотного преобразователя

Применение микроконтроллера в составе цифрового фотометра позволяет не только повысить точность частотного преобразования, но и значительно расширить функциональные возможности прибора. В частности, для вычисления относительного или процентного изменения оптической плотности объекта контроля сравнительно просто реализовать измерение номинальной частоты (при отсутствии объекта контроля на входе фотодиода $VD2$), и использовать полученный результат для вычисления относительных величин последующих измерений. Для использования микроконтроллера в режиме измерения частоты его необходимо сконфигурировать таким образом, чтобы он производил подсчет импульсов измеряемой частоты за определенный промежуток времени, либо, наоборот подсчет числа импульсов известной частоты за период измеряемого сигнала. Первый

способ удобен для измерения высоких частот, второй – низких. При выборе режима работы микроконтроллера следует учесть, что тактовая частота контроллера должна превышать измеряемую частоту не менее чем в два раза. Обнаружение изменения измеряемого сигнала необходимо производиться по фронту тактового импульса. В противном случае если период измеряемого сигнала слишком короткий, то в регистрации могут быть пропуски. Результат удобнее будет отображаться на трех семисегментных индикаторах, показывающих значение тока фотодиода в мили- или микроамперах. Для индикации единиц измерения можно использоваться отдельные светодиоды. Кроме того, желательно предусмотреть спящий режим работы микроконтроллера, в который устройство будет переходить при пропадании сигнала. Частотомер можно собрать на базе микроконтроллера фирмы *Atmel ATmega 8*.

В результате проведенных исследований установлено, что использование фотодиодных преобразователей с комбинированной обратной связью на основе однополярных операционных усилителей позволяет повысить чувствительность и точность цифрового контроля величин освещенности. Введение в состав устройства микроконтроллера в режиме измерения частоты позволяет получить расширить возможности прибора и получать наряду с током фотодиода значения дополнительных величин.

Литература:

- 1 Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – В 3-х т. – Том 1. – М.: Мир, 1993. – С. 191.
- 2 Применение интегральных схем. Практическое руководство. Кн. 2. Пер. с англ. / Под ред. А. Уильямса. – М.: Мир, 1997. – С. 249.
- 3 Елисеев М.Ю. Фотодатчик. Авт. свид. СССР № 1420385, МПК G01J 1/44, 1988. – Бюл. № 32.
- 4 Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микро-контроллеров. Пер. с нем. – Киев: «МК-Пресс», 2006. – 208 с.

УДК 621

Зам. начальника кафедры Лисичкин В.Г.
(Академия ФСО)

Россия, г. Орел, тел. (4862)419947; E-mail: lisichkin@rekom.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ ДАТЧИКОВ

The basic methods of precision promotion of active oscillator sensors are considered. The potentials of proper selection of active oscillator frequency and operating point on output characteristic are displayed on the basis of resistive sensor model experimental investigations. It allows maximizing receptiveness, increasing dynamic range and reducing mistake of measurements.

Одним из основных направлений в разработке и производстве автоматизированных средств измерений является использование автономных устройств с микропроцессорным управлением, связанных

последовательным или параллельным интерфейсом с персональным компьютером. Наибольшее применение в качестве таких устройств находят автогенераторные измерительные приборы (АГИП), формирующие на

выходе гармонические или импульсные сигналы с амплитудой, частотой или фазой, изменяющимися в зависимости от параметров индуктивных или емкостных измерительных преобразователей. К достоинствам таких приборов относится многофункциональность, позволяющая с одного АГИП получать измерительную информацию о нескольких физических величинах, и простота осуществления первичной цифровой обработки сигнала в микроконтроллере. Кроме этого, автогенераторные приборы позволяют обеспечить более высокую мощность измерительного сигнала на начальном этапе измерений.

Важными характеристиками АГИП, предназначенных для автономного использования в многоцелевых измерительных комплексах, являются небольшие массогабаритные показатели, низкие удельное энергопотребление и стоимость на один канал преобразования информации, а также возможность достижения более высоких точности и стабильности измерений благодаря высокой помехоустойчивости частотных методов. Все это позволяет обеспечить приоритетность использования автогенераторных приборов в самых различных областях промышленности и сельского хозяйства.

Оценка точности АГИП имеет некоторые специфические особенности по сравнению с типовыми измерительными приборами. При работе автогенератора в стационарном режиме любое внешнее воздействие (как полезное, связанное со свойствами измеряемой среды, так и паразитное) может привести к изменению стационарного состояния: изменению амплитуды или частоты выходных колебаний, срыву и повторному возбуждению генерации с новыми параметрами, переходу в режим прерывистой генерации и изменению режима прерывистой генерации. Практическое использование отмеченных изменений может служить основой для измерения свойств контролируемой среды. В общем выходная величина y АГИП зависит не только от входной (контролируемой) величины x , но и от множества побочных влияющих величин $v(t) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, с учётом которых

$$y = f(x, x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Тогда полный дифференциал этой функции:

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x} dx + \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n.$$

Перейдя к конечным приращениям и выполнив несложные преобразования, можно получить выражение для относительного изменения выходной величины y :

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\partial y / y}{\partial x / x} \frac{\Delta x}{x} + \frac{\partial y / y}{\partial x_1 / x_1} \frac{\Delta x_1}{x_1} + \dots + \frac{\partial y / y}{\partial x_n / x_n} \frac{\Delta x_n}{x_n}$$

Введём следующие обозначения:

$$S_{y/x} = \frac{\partial y / y}{\partial x / x} = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y};$$

$$S_{y/x_i} = \frac{\partial y / y}{\partial x_i / x_i} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y}, i = 1, 2, \dots, n -$$

относительные чувствительности АГИП к изменению измеряемого параметра x и влияющих величин, соответственно;

$$\varepsilon = \Delta y / y; \varepsilon_x = S_{y/x} \cdot \frac{\Delta x}{x}; \Delta \varepsilon = \sum_{i=1}^n S_{y/x_i} \cdot \frac{\Delta x_i}{x_i}.$$

С учётом введенных обозначений можно записать:

$$\varepsilon = \varepsilon_x + \Delta \varepsilon = S_{y/x} \cdot \frac{\Delta x}{x} + \sum_{i=1}^n S_{y/x_i} \cdot \frac{\Delta x_i}{x_i}.$$

Очевидно, что первое слагаемое в последнем выражении показывает полезное изменение выходного параметра y при изменении измеряемой величины x , причём это изменение пропорционально чувствительности измерительного прибора к ее изменению Δx . Второе слагаемое позволяет оценить вклад паразитных факторов в формирование выходной величины, которые вносят погрешности в результаты измерений. Точность автогенераторного измерительного прибора можно характеризовать относительной погрешностью γ :

$$\gamma = \frac{\varepsilon + \varepsilon_x}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_x} + 1 = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_x} + 1 = \frac{\sum_{i=1}^n S_{y/x_i} \cdot (\Delta x_i / x_i)}{S_{y/x} \cdot (\Delta x / x)} \quad (1)$$

Анализ выражения (1) позволяет сделать очевидные выводы о путях повышения точности измерений. Прежде всего, необходимо минимизировать числитель выражения (1), то есть снижать чувствительность измерительного прибора к побочным влияющим воздействиям, а также принимать меры по уменьшению диапазона изменений влияющих величин. Однако полностью исключить действие влияющих величин, как правило, не удаётся, либо это может быть связано с неприемлемым усложнением измерителя. Максимизация знаменателя (ε_x) также приводит к уменьшению погрешности измерений, но для этого требуется увеличивать чувствительность АГИП к изменениям входной величины x по сравнению с чувствительностями к паразитным воздействиям.

Перечислить все паразитные воздействия, ухудшающие точность автогенераторных измерений, достаточно трудно, можно назвать наиболее важные. Первая группа побочных влияний относится к первичному измерительному преобразователю (датчику). Это зависимость показаний датчика от множества сопутствующих неконтролируемых параметров, а также нелинейность преобразования контролируемого параметра в выходной сигнал датчика. Погрешности датчика зависят от его конструктивного исполнения и наличия паразитных элементов, от диапазона изменения и характера измеряемой величины, количества и степени влияния внешних факторов, чувствительности датчика к изменениям контролируемого параметра и

паразитным воздействиям. Вторая группа паразитных влияющих величин относится к автогенератору. Это нестабильность работы, нелинейная зависимость выходного параметра автогенератора (амплитуды, частоты или фазы) от сигнала датчика, различного рода шумы и помехи, дрейф нуля и пр. Погрешности автогенератора зависят от вида резонансной системы, выбора схемы и типа нелинейного элемента, стабильности питающих напряжений и элементов автогенератора. Третья группа погрешностей относится к вычислительному преобразователю или собственно измерителю амплитуды, частоты или фазы АГИП, в которых заложена информация о контролируемых параметрах.

Рассмотрим подробнее вторую группу влияющих величин, относящихся непосредственно к автогенератору. Автогенераторный измерительный прибор работает в режиме большого сигнала. Это снижает влияние случайных составляющих погрешностей, обусловленных различного рода шумами, помехами и дрейфом нуля в выходной цепи прибора. Установка на нуль производится с помощью компенсационной цепи или дифференциальной схемы.

Под дрейфом нуля в АГИП следует понимать отклонение начального уровня частоты или фазы выходного сигнала под действием трудно учитываемых факторов. Дрейф нуля бывает вызван старением элементов схемы, изменением температуры, нестабильностью источников питания и, в итоге, нестабильностью коэффициента передачи отдельных звеньев автогенераторного прибора.

Нестабильность элементов измерительного автогенератора сильнее влияет на дрейф нуля, чем нестабильность звеньев, включенных после него. Это объясняется тем, что элементы измерительного автогенератора определяют как общую чувствительность прибора, так и его зону гистерезиса.

Одним из путей стабилизации параметров измерительных преобразователей является использование дифференциальных схем. Метод взаимной коррекции в ряде случаев позволяет обеспечить высокую точность АГИП в широком диапазоне изменений побочных факторов.

Стабильность параметров колебательной системы зависит от качества сосредоточенных элементов, а также от конструкции катушек индуктивности и измерительных преобразователей. К мерам по стабилизации колебательных систем измерительных автогенераторов можно отнести использование в качестве установочных материалов металлов и их сплавов со стабильными электрофизическими характеристиками; широкое применение серебряных и медных посеребренных проводов для катушек и монтажных соединений, использование высокочастотных стабильных электроизоляционных материалов для изготовления каркасов катушек индуктивности, установочных и проходных изоляторов.

Из внешних факторов, влияющих на стабильность измерительного автогенератора, наибольшее значение имеют изменения питающих напряжений и температуры окружающей среды.

Наиболее эффективным средством предотвращения влияния колебаний питающего напряжения является применение стабилизированных источников питания. В транзисторных схемах практически можно ограничиться стабилизацией тока в базовой цепи или применением дифференциальных каскадов со стабилизацией тока эмиттера.

Воздействие температуры изменяет начальный ток коллектора и крутизну амплитудной характеристики, сдвигая при этом рабочую точку транзистора. Коллекторный ток и коэффициент усиления растут с увеличением температуры. Изменение коэффициента усиления, связанное со сдвигом рабочей точки и сопровождаемое ростом коллекторного тока, носит более резкий характер, чем его непосредственное изменение при постоянной величине коллекторного тока i_k . Поэтому в первом приближении условием температурной стабильности транзисторного автогенератора можно считать $di_k / dt^{\circ} = 0$. Однако при температуре окружающей среды ниже нуля этого условия недостаточно, так как более сильно проявляется непосредственная зависимость крутизны характеристики от температуры.

Статические характеристики АГИП могут изменяться в результате изменений питающих напряжений, при смене нелинейных элементов из-за разброса их параметров, за счет температурных влияний, а также из-за воздействия побочных факторов на параметры измерительного преобразователя. Статическая характеристика автогенераторного прибора имеет нелинейный характер, что приводит к появлению нелинейных искажений. Выбор соответствующего нелинейного элемента с учетом вида характеристики измерительного преобразователя позволяет несколько снизить нелинейные искажения. Кроме этого, автогенераторный прибор содержит цепи отрицательной обратной связи на частоте сигнала. При работе прибора в узком диапазоне изменений выходного сигнала нелинейность статической характеристики выражена слабо, поэтому погрешность, вызванная нелинейностью, уменьшается приблизительно пропорционально глубине отрицательной обратной связи.

Влияние большинства дестабилизирующих факторов на частоту генерируемых колебаний сказывается, в основном, через изменение величин индуктивности и емкости колебательной системы автогенератора, причем здесь следует учитывать все индуктивности и емкости схемы, включая индуктивности монтажных проводов и вводов, а также междуэлектродные емкости нелинейных элементов. Поэтому в измерительных автогенераторах включение кварцевых резонаторов позволяет не только повысить стабильность измерительного режима, но и увеличить основную чувствительность измерительного прибора, особенно в схемах, реагирующих на частотную расстройку.

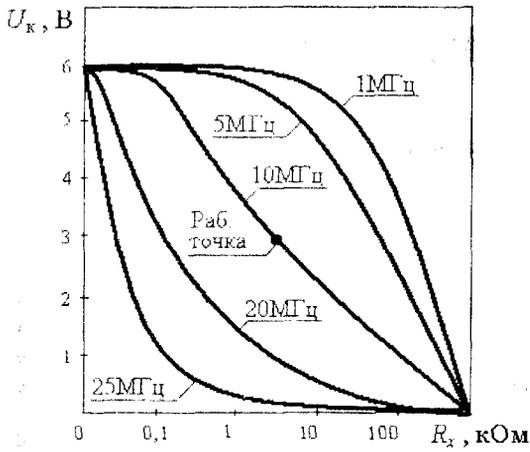


Рис. 1. Зависимость амплитуды выходного напряжения АГИП от измеряемого сопротивления при частотах (1...25) МГц

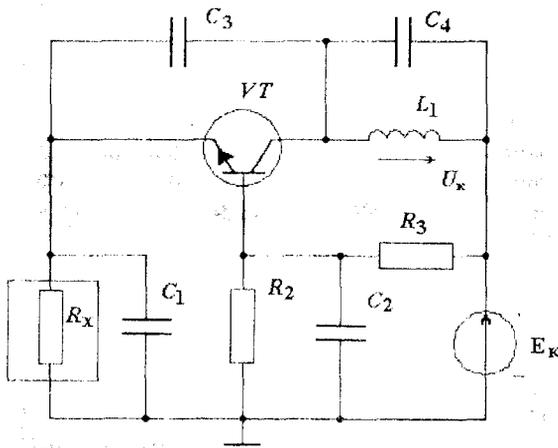


Рис. 2. Схема автогенератора с резистивным датчиком

Влияние внешних факторов на работу АГИП выражается в основном в воздействии на чувствительность, которая фактически является переменной величиной, зависящей от множества факторов. Поскольку точность измерительных преобразователей прямо пропорциональна чувствительности прибора к контролируемому параметру, как это следует из (1), то выбор схемы, режима работы, рабочей частоты автогенераторного измерительного прибора необходимо осуществлять с

учетом максимальной чувствительности АГИП к измеряемому параметру.

На рис. 1 представлены результаты экспериментального исследования автогенератора с резистивным датчиком, выполненного на основе транзисторного усилительного каскада с общей базой и емкостной обратной связью (схема на рис. 2). Моделирование эксперимента осуществлено в среде *Electronic Workbench*. Изменением режима работы транзистора и глубины отрицательной обратной связи по постоянному току, а также параметров колебательной системы, получено семейство зависимостей амплитуды генерируемых колебаний U_k от сопротивления резистивного датчика R_x при различных частотах генерируемых колебаний.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать ряд выводов. Во-первых, в зависимости от диапазона значений контролируемого параметра (в данном случае резистивного сопротивления при кондуктометрических измерениях) в значительных пределах может изменяться чувствительность ГИП. Это позволяет уменьшить погрешность измерений за счет правильного выбора рабочей точки на участке с максимальной чувствительностью прибора к измеряемому параметру.

Во-вторых, можно оптимизировать значение рабочей частоты в зависимости от области применения кондуктометрических измерений.

Это подтверждается графиками, изображенными на рис.1, из которых видно, что чем выше проводимость контролируемой среды, тем выше должна быть частота автогенератора для получения максимальной чувствительности АГИП.

Кроме того, как видно из рис. 1, правильный выбор рабочей точки и частоты автогенератора позволит существенно снизить нелинейность измерительного прибора, увеличить динамический диапазон измерений, что также должно привести к повышению точности.

Литература:

1 Арш Э.С. Автогенераторные методы и средства измерений. – М.: Машиностроение, 1979. – 256 с.

УДК 621.99

Д-р техн. наук, проф. Баранов В.Л., асп. Кудряшов М.А.
(Тульский государственный университет)
Россия, г. Тула, тел. (4872)351869, (4872)365907; E-mail: ua3pkb@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ ВРАЩЕНИЯ КОАКСИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КОМПОНЕНТ ПУЛЬ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

The experiment of the rotary movement possibility of multiarranging bullets by the use of the rotation of coaxial cylinders model is shown.

Пули патронов стрелкового оружия, производимые в Российской Федерации, представляют собой сложную, многокомпонентную конструкцию. На протяжении уже более ста лет в качестве основных компонентов пуль используют оболочку, рубашку и сердечник [1]. Современные научные исследования показывают важность изучения относительного вращательного движения компонентов данного вида боеприпасов [2].

В настоящей статье приведен способ измерения проворотов некоторых компонентов пуль на примере штатной, стоящей на вооружении пули Б-32 калибра 12,7 мм. Оценено также влияние конструктивных особенностей компонент на величину «проворотов» пули, с целью анализа возможности моделирования движения боеприпаса, как движения системы коаксиальных цилиндров.

Конструкция боеприпаса (в данном случае – пули Б-32) представлена на рис. 1 и включает:

- 1) биметаллическую оболочку;
- 2) свинцовую рубашку;
- 3) броневой сердечник;
- 4) зажигательный состав.

Необходимо измерить «проворот» сердечника относительно оболочки штатной пули и оценить влияние на него наличия в конструкции хвостовой конической части оболочки и зажигательного состава в головной параболической части оболочки.

Для этого проведен эксперимент, в ходе которого произведены стрельбы штатным боеприпасом, боеприпасами с измененной конструкцией, улавливание пуль после выстрела, измерение углов между оболочкой и сердечником.

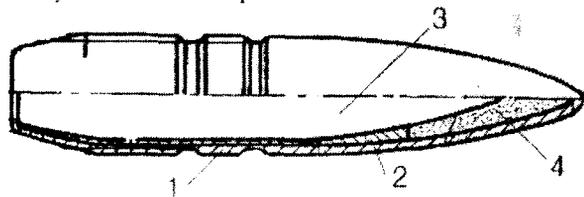


Рис. 1. Компоненты пули Б-32

Улавливание пули осуществлено в специально изготовленном пулеуловителе. Он выполнен таким образом, что пойманный боеприпас не деформируется.

Эскиз пулеуловителя приведен на рис. 2 (а и б), где выделены три основные части:

- 1) рамки с плотно развешанными вдоль линии огня лоскутами материи, рис. 2 (а и б);

2) картонные коробки, плотно набитые лоскутами материи, рис. 2, б;

3) металлическая труба – несущая конструкция, рис. 2, б.

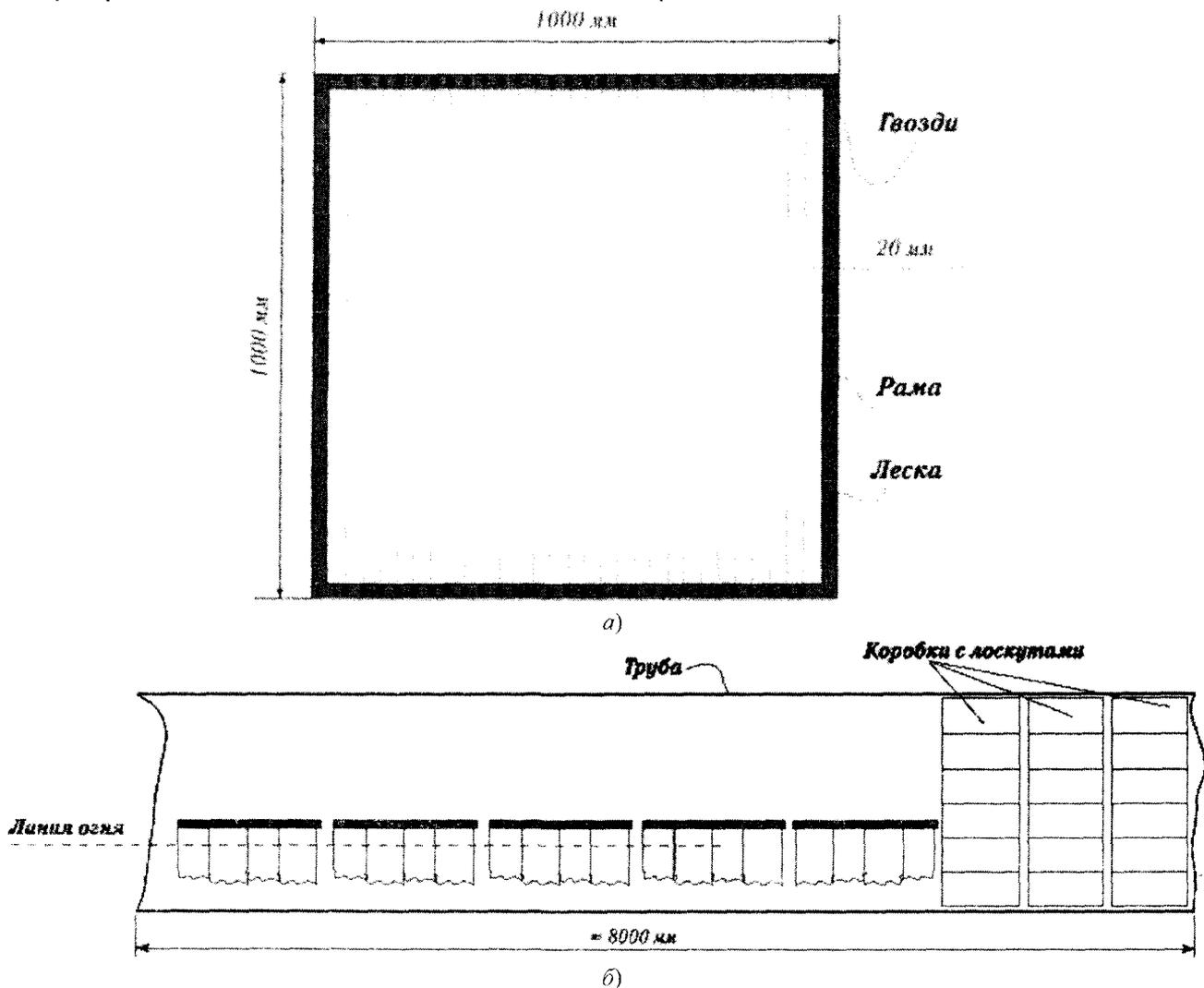


Рис. 2. Конструкция рамки (а) и пулеуловителя (б)

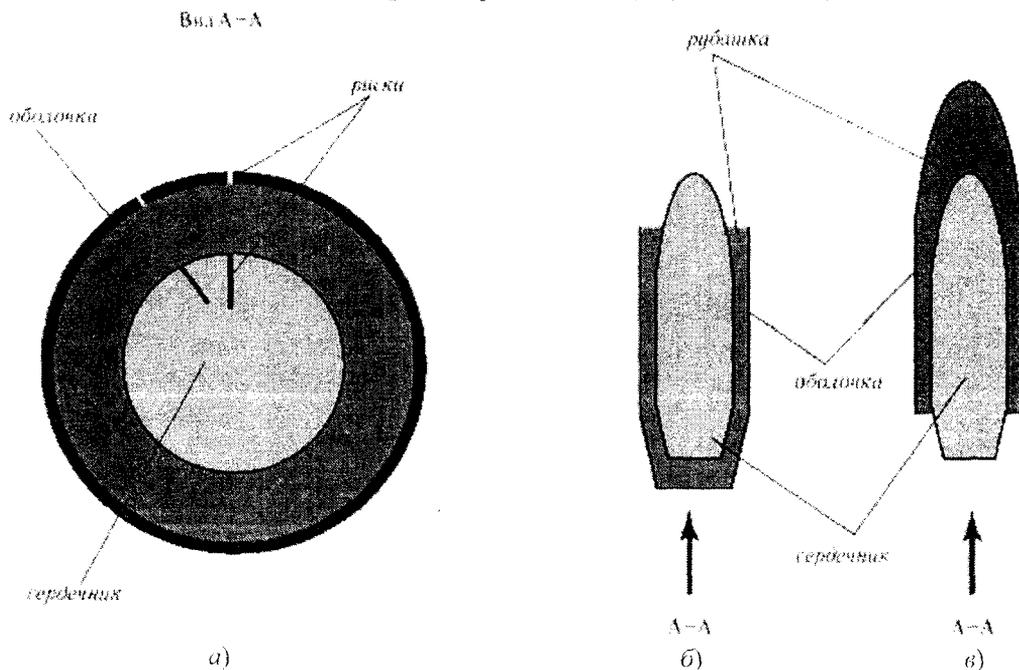


Рис. 3. Модернизация штатных пуль для эксперимента

Таблица 1 – Результаты измерений и оценка влияния конструктивных особенностей боеприпаса на проворот компонент

Боеприпас	Штатный	Без хвостовой части оболочки	Без головной части оболочки
Измеренный проворот сердечника относительно оболочки, угл. град.	343,2	312,9	310,4
Отклонение результатов от штатного боеприпаса, %	–	8,82	9,56

Принцип работы пулеуловителя прост: в процессе стрельбы по линии огня, проходящей через ткань, боеприпас наматывает ткань на оболочку, существенно снижая кинетическую энергию. Экспериментально установлено, что для полного торможения пули необходимо использование пяти рамок.

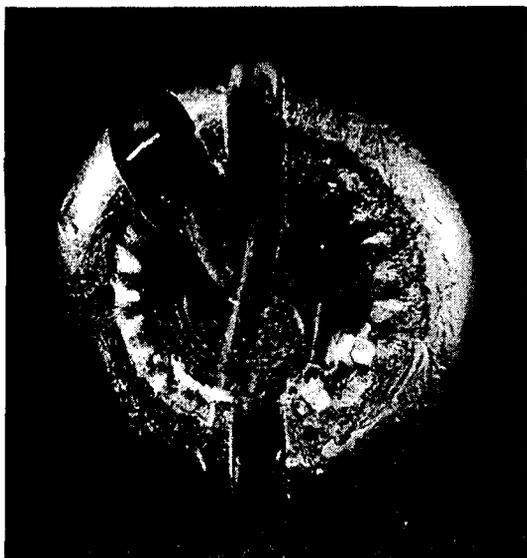


Рис. 4. Фотография торца пойманной пули

Далее производились демонтаж патронов и следующая модернизация штатных пуль:

- 1) на оболочку и сердечник нанесены риски, рис. 3, а;
- 2) удалялись головная параболическая часть вместе с зажигательным составом, рис. 3, б;

- 3) удалялись хвостовая, коническая часть, рис. 3, в;
- 4) снова осуществлялся монтаж патронов.

Затем были проведены серии выстрелов и улавливание пуль каждого вида. Торцы пойманных боеприпасов сфотографированы с восьмикратным оптическим увеличением и показаны на рис. 4. Углы между рисками измерены стандартными средствами программы *Adobe Photoshop*.

Средние арифметические значения для серий по пять выстрелов для каждого вида пули результаты измерений приведены в таблице 1. При измерении проворота учитывается, что пуля вращается по часовой стрелке и предполагается, что сердечник отстает от оболочки.

Указанное в таблице 1 влияние конструктивных особенностей пули на относительный проворот говорит о возможности представления боеприпаса системой коаксиальных цилиндров при математическом моделировании.

Отметим, что одновременное удаление у пуль головной и хвостовой части невозможно, т.к. оболочку боеприпаса разрывает в период форсирования.

Литература:

- 1 Кириллов В.М. Патроны стрелкового оружия / В.М. Кириллов, В.М. Сабельников. – М.: ЦНИИ информации, 1980. – 372 с.
- 2 Могильников С.Н. Движение снаряда в стволе и на траектории / С.Н. Могильников, В.В. Горбунов, Н.Ф. Левицкий. –Тула: ТулГУ, 2002. – 139 с.

УДК 536.436

Д-р техн. наук, проф. Поландов Ю.Х., асп. Барг М.А., канд., техн., наук, доц. Власенко С.А.
 (Орловский государственный технический университет)
 Россия, г. Орёл, тел. (4862)413295; E-mail: pms35@ostu.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВОВ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Series of experiments on investigation of gas-air mixture explosion in the close cylindrical horizontal volume have been realized. Influence of explosive valve placement and its dimensions upon explosion pressure in cylindrical volume was determined. Experiments show explosion is not dangerous under existing conditions.

Большинство теплоэнергетических установок, в конструкцию которых входит замкнутое топочное пространство, должны обладать взрывным клапаном, обеспечивающим сброс избыточного давления при взрыве топливно-воздушной смеси. Особенно актуально наличие такого клапана в установках, работающих на газе. При этом расположение таких

предохранительных устройств на поверхности топки, а также их конструкция и размеры не всегда оправданы с точки зрения безопасности и ресурсосбережения.

В связи с вышесказанным проведена серия экспериментов по исследованию влияния места расположения и размера взрывного клапана на

давление взрыва газозвушной смеси, распыленной в сосуде цилиндрической формы. Длина сосуда составила $L = 1,5$ м, а диаметр – $D = 0,2$ м (рис. 1, 2).

Сечение взрывного клапана выполнено круглым с накладками разных диаметров (20, 40, 70 мм).

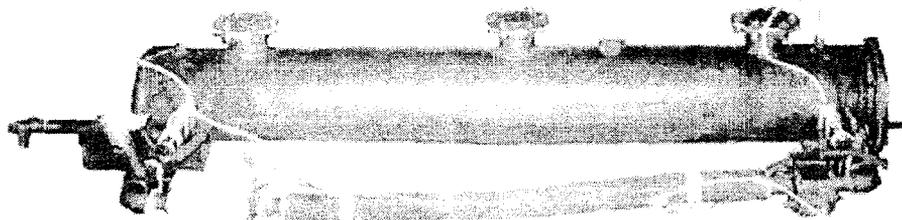
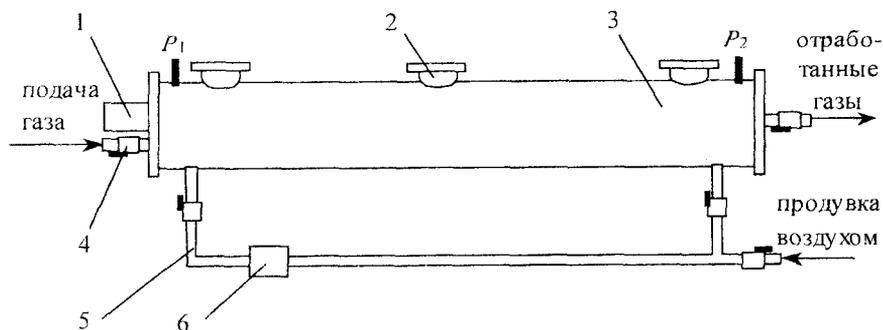


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки



1 – устройство зажигания; 2 – взрывной клапан; 3 – рабочая полость; 4 – запорный кран; 5 – циркуляционный контур; 6 – вентилятор; P_1, P_2 – преобразователи давления

Рис. 2. Схема экспериментальной установки

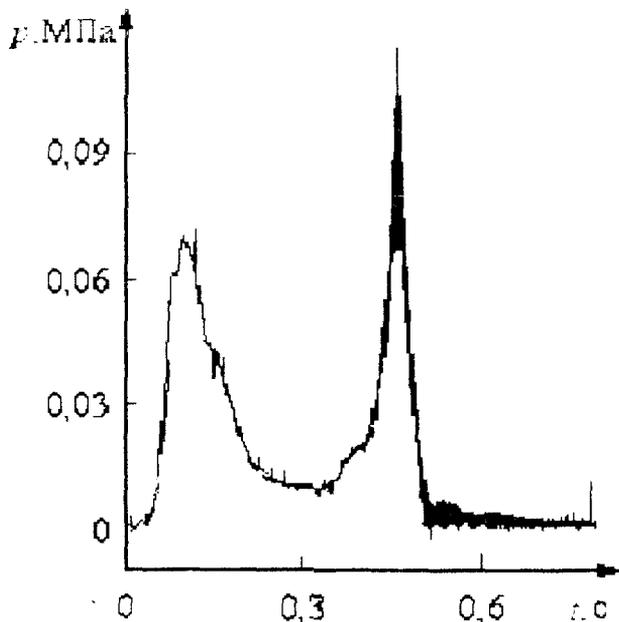


Рис. 3. График давления взрыва газозвушной смеси при $d = 40$ мм

В ходе исследования было произведено по пять опытов в девяти сериях экспериментов, отличающихся местом расположения взрывного клапана по длине сосуда: в начале, на середине и в конце сосуда, а также его диаметром. Перед каждым взрывом замкнутое пространство 3, имитирующее гонокку, заполнялось воздухом путем его продувки с

помощью вентилятора 6 через циркуляционный контур 5. После этого рабочая полость отсекалась от внешней среды запорными кранами 4 и заполнялась одним и тем же объемом смеси сжиженных газов (50 % пропан, 50 % бутан). После подготовки к эксперименту при помощи устройства зажигания 1 в рабочую полость подавалась искра, и происходило зажигание газозвушной смеси. Значение давления взрыва, полученного в результате этого, фиксировалось в двух точках (в начале и в конце сосуда) с помощью преобразователей давления марки КРТ-СТ-1,6-0,5-М (изготовитель ЗАО «ОРЛЭКС, г. Орёл») с диапазоном измерения давления от 0 до 1,6 МПа. Сбор и обработка экспериментальных данных проводились с помощью измерительно-вычислительного комплекса.

В каждом опыте характер изменения давления взрыва газозвушной смеси ожидался однообразным, и формы графиков давления взрыва предполагались в виде скачка, который определяет первоначальный рост давления и последующий его спад.

В ходе экспериментов выявлено, что в большинстве случаев опыты подтвердили ожидаемый результат, однако при расположении взрывного клапана на середине экспериментального сосуда и диаметрах взрывного клапана равного $d = 40$ мм и $d = 70$ мм график содержит два всплеска давления, причем в некоторых случаях второй всплеск превышал по амплитуде первый. Так, на рис. 3 показана динамика давления взрыва при

расположении взрывного клапана на середине экспериментального сосуда и диаметре отверстия (проходного сечения) $d = 40$ мм.

Численное моделирование процессов, протекающих в экспериментальной установке с помощью метода крупных частиц, о чём подробно освещено в работе [2], показало, что причиной повторного скачка давления является резкое увеличение площади поверхности фронта горения при

прохождении им сечения взрывного клапана. На рис. 4 представлен результат расчета давления взрыва при диаметре проходного сечения взрывного клапана $d = 40$ мм и его расположении на середине поверхности экспериментального сосуда.

Точки A, B, C, D на рис. 4, a характеризуют значение давления взрыва, которому соответствует фронт горения, показанный на рис. 4, b .

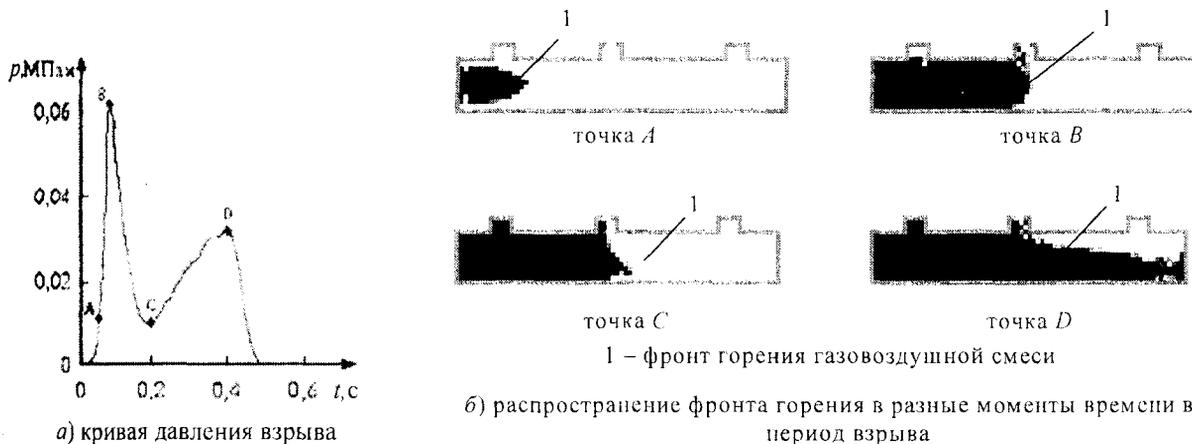


Рис. 4. Расчёт давления взрыва газовой смеси в сосуде при диаметре сечения взрывного клапана $d = 40$ мм

В целом, эксперименты показали, что в замкнутом объеме цилиндрической формы указанных размеров при взрыве газовой смеси развивается давление, значение которого не превышает 0,1 МПа. Таким образом, в данных условиях взрывы газовой смеси не приводят к выходу экспериментального оборудования из строя и не представляют опасности для человека.

Литература:

1 Барг М.А. Особенности моделирования процесса горения методом крупных частиц / М.А. Барг, Ю.Х. Поланов // Современные методы физико-математических наук. Труды международной конференции. – 9-14 октября 2006 г., г. Орел. Т. 2. – Орел: Издательство ОГУ, Полиграфическая фирма «Картуш», 2006 г. – 230 с.

УДК 537.521.6

Ст. преп. Сафонова Т.Н.

(Ливенский филиал Орловского государственного технического университета)
Россия, Орловская обл., г. Ливны., тел. (484677)77838; E-mail: mysca@liv.orel.ru

КРИТЕРИИ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАТОДНОГО МЕХАНИЗМА ИНИЦИИРОВАНИЯ ПРОБОЯ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

The cathode initiation of hole in the impulse regime is considered. The new criterions for the value the cathode mechanism of initiation and the method, which may be realization new criterions, are offer. The experimental confirmation the offered criterions and methods is receive.

Вакуумная электрическая изоляция нашла широкое применение в многочисленных высоковольтных приборах, аппаратах и конструкциях, таких как электронно-оптические преобразователи, фотоэлектронные умножители, вакуумные конденсаторы и разрядники, рентгеновские трубки и электронные микроскопы, ускорители и сепараторы заряженных частиц и т.п. Для обеспечения

необходимой электрической прочности вакуумной изоляции электроды высоковольтных электровакуумных приборов после завершения предварительной обработки подвергаются кондиционированию. Использование импульсного кондиционирования сокращает число возможных механизмов инициирования вакуумного пробоя, при этом основным остается катодный механизм,

обусловленный тепловым разрушением эмиттирующего микровыступа катода [1].

В импульсном режиме инициирование пробоя происходит при достижении длительностью высоковольтного импульса времени запаздывания пробоя $t_n = t_3$. При малых длительностях, $t_n < 10^{-6}$ с, катодное инициирование связано с выделением в эмиттере за время запаздывания энергии, равной энергии его разрушения [2]:

$$\int_0^{t_3} j^2(t) dt = const. \quad (1)$$

С ростом мощности эмиттера время запаздывания пробоя уменьшается. Для вычисления интеграла в критерии (1) необходимо знать плотность тока, что возможно лишь в случае эмиттера известной геометрии.

Для катода с большой рабочей поверхностью использование коэффициента усиления β , характеризующего ее состояние, приводит к критерию (2), в котором электрическая прочность E_0 и критическая микронапряженность $E_{кр}$ являются функциями времени запаздывания пробоя t_3 :

$$E = E_{кр} = \beta E_0. \quad (2)$$

Как в стационарном, так и в импульсном режиме оценка катодного инициирования основана на определении абсолютного значения пробивной микронапряженности βE_0 электрического поля и сравнении ее с критической величиной $E_{кр}$.

Обработка катода высоковольтными импульсами $t_n = t_3$ формирует поверхность, состояние которой определяется пробивной макронапряженностью E_0 [3]:

$$\beta = \left(\frac{E_{кр}}{E_0} \right)^{0.9} \Bigg|_{t_n=t_3} = 1,28 \cdot 10^9 E_0^{-0.9}. \quad (3)$$

Изменение состояния катодной поверхности в результате оптимальных режимов кондиционирования импульсами разной длительности можно связать с изменением электрической прочности и получить новые критерии катодного инициирования в импульсном режиме. Введя в рассмотрение коэффициенты относительного изменения качества поверхности $K_\beta = \beta_1/\beta_2$ и импульсной электрической прочности $K_U = U_2/U_1$, получим на основе соотношения (3) для оптимального режима импульсного кондиционирования [4]:

$$\frac{K_\beta}{K_U^{0.9}} \Bigg|_{t_n=t_3} = 1. \quad (4)$$

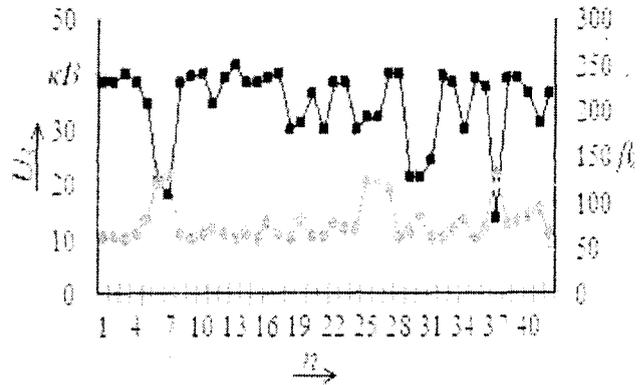


Рис. 1. Изменение напряжения первого пробоя и коэффициента усиления поля при воздействии импульсов $t_{и2} = 50$ нс; ■ - U ; ♦ - β

Выражение (4) является критерием катодного инициирования вакуумного пробоя, учитывающим изменения состояния поверхности катода и импульсной электрической прочности в результате оптимальных режимов кондиционирования.

Метод оценки катодного механизма состоит в определении относительных изменений состояния поверхности катода и импульсной электрической прочности в результате оптимальных режимов импульсного кондиционирования и проверке критерия (4).

Проверка предложенных критериев и методов оценки катодного инициирования осуществлена при минимальном перенапряжении на высоковольтных импульсах длительностью $t_{и1} = 200$ нс и $t_{и2} = 50$ нс. Из кривых $\beta = f(n)$ и $U(n)$, показанных на рис. 1 следует, что состояние поверхности коррелирует с пробивным напряжением. Корреляция массивов U и β вычислялась при помощи математического пакета *Microsoft Excel* и составила 79 %. Корреляция изменений U и β подтверждает ответственность катодных процессов за инициирование импульсного пробоя.

При обработке катода импульсами $t_{и1} = 200$ нс сформирована поверхность с коэффициентом усиления поля $72 \leq \beta_1 \leq 266$ при среднем значении $\bar{\beta}_1 = 110$ и относительном разбросе значений $\sigma_{\beta 1} / \bar{\beta}_1 = 0,49$.

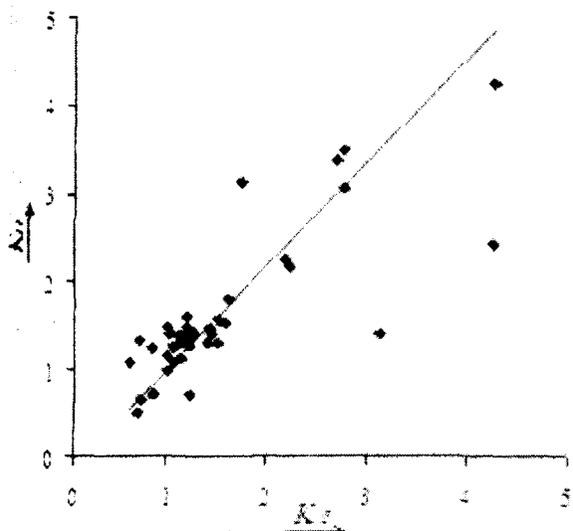


Рис. 2. Изменение пробивного напряжения с изменением состояния катодной поверхности в результате воздействия импульсного напряжения

Такому состоянию поверхности катода соответствует пробивное напряжение $9,3 \leq U_1 \leq 30,4$ кВ при среднем значении $\bar{U}_1 = 24,4$ кВ и относительном разбросе:

$$\sigma_{U_1} / \bar{U}_1 = 0,32.$$

Воздействие импульсов $t_{и2} = 50$ нс улучшило поверхность катода, снизив коэффициент усиления поля $59 \leq \beta_2 \leq 130$ и увеличило пробивное напряжение $13,8 \leq U_2 \leq 41,3$ кВ при $\bar{\beta}_2 = 77$ и $\bar{U}_2 = 34,19$ кВ и разбросах:

$$\sigma_{\beta_2} / \beta_2 = 0,27 \text{ и } \sigma_{U_2} / \bar{U}_2 = 0,20.$$

Четырехкратное уменьшение длительности от $t_{и1} = 200$ нс до $t_{и2} = 50$ нс сопровождалось ~40% повышением качества поверхности катода и электрической прочности и ~40% сокращением относительного разброса этих величин.

Катодное инициирование можно оценить и по относительным изменениям коэффициентов K_β и K_U в

ходе оптимального режима кондиционирования. Из зависимостей $\beta = f(n)$ и $U(n)$, показанных на рис. 1, рассчитаны относительные изменения коэффициента усиления поля и напряжения пробоя от импульса к импульсу. Зависимость $K_U = f(K_\beta)$, характеризующая изменение электрической прочности с изменением состояния катодной поверхности в результате воздействия импульсного напряжения приведена на рис. 2. Поскольку состояние катодной поверхности определяет пробивное напряжение, следуя критерию (4), экспериментальные точки должны удовлетворять степенной зависимости $K_U = (K_\beta)^{1,1}$, подтверждая катодный механизм инициирования.

Проверка критерия (4) по средним значениям:

$$\bar{K}_U = 1,60 \text{ и } \bar{K}_\beta = 1,52$$

дала погрешность менее 1 %. Точность оценки катодного инициирования по средним значениям с использованием предложенного критерия в два раза превысила точность оценивания по критерию, использующему абсолютные величины.

Литература:

- 1 Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
- 2 Емельянов А.А. Прогнозирование электрической прочности вакуумной изоляции в стационарном режиме / А.А. Емельянов, Г.М. Кассиров, А.Л. Филатов // Изв. вузов. Физика. – 1976. – № 11. – С. 138-140.
- 3 Емельянов А.А. О некоторых режимах повышения электрической прочности вакуумной изоляции // ПТЭ. – 1997. – №5. – С. 68-71.
- 4 Емельянов А.А. О катодном инициировании вакуумного пробоя в импульсном режиме / А.А. Емельянов, Е.А. Емельянова, Т.Н. Сафонова // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – Вып. 20 – С. 55-61

**ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ
И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ**

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

УДК: 612.014.462.9

Канд. биол. наук Бобров А.В., асп. Лунин М.В., инж. Дёмина Л.Б.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

ПОСЛОЙНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПОСЕВНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЕМЕНА ПШЕНИЦЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОРСИОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА СВЕТОДИОДАХ

Dependence of informational saturation (modality) of torsion radiation upon a combination order of two informational matrixes, through which this radiation is transmitted, has been investigated. It was discovered that modality of the affecting factor is defined mainly with informational properties of "outlet" matrix faced the object and value area for a index of its possible biological activity is limited with the values of biological activity for informational matrixes used separately.

Методика и эксперименты

Основным критерием эффективности информационного воздействия (ИВ) являлась зависимость роста растений от толщины слоя семян пшеницы. Информационное воздействие осуществлялось с применением импульсного излучателя, содержавшего 100 светодиодов типа КИПД40ж20-жпб, расположенных на площади 100х100 мм.

Параметры информационного воздействия: частота следования импульсов – 3200 имп/с; частота модуляции – 100 Гц; экспозиция – 12 с. Информационная матрица размером 100х100 мм содержала 3000000 единиц порошка натриевой соли бензилпенициллина.

Всего было проведено 2 серии экспериментов. Семена в экспериментальных образцах подвергались информационному воздействию; семена пшеницы в контрольном образце не обрабатывались.

В первой серии (лабораторные исследования, осень 2005 года) воздействие производилось на семена, размещенные в вертикальном контейнере высотой 35 см с площадью основания 8х8 см. Образцы семян отбирались из поверхностного слоя и из слоев, расположенных, соответственно, на расстоянии 5, 10, 15...35 см от поверхности. Для создания экспериментальных образцов отбор семян осуществляли через отверстия в стенках контейнера, сделанных на заранее заданных расстояниях от поверхностного слоя семян.

Экспериментальные и контрольный образцы содержали по 100 семян. Сразу после проведения информационного воздействия образцы высаживались во влажный песок. Выращивание производилось при общих для всех образцов световом и температурном (22...25 °С) режимах.

По прошествии 6...8 суток после посева сорневая часть растений каждого образца

отмывалась от песка и сушилась, после чего определялась масса растений данного образца и средняя масса одного растения в этом образце.

Результаты и обсуждение

Эффективность ИВ (в процентах) определялась по отношению величины средней массы одного растения в экспериментальном образце к величине средней массы растения в контроле. По полученным результатам строилась кривая зависимости эффективности ИВ от толщины слоя.

На рис. 1 представлен обобщенный результат первой серии из 8 экспериментов. Как видно на рис. 1, линия тренда однонаправлено возрастает от поверхностного слоя семян (5,2 %) к слою, отстоящему на 35 см от поверхности (22,5 %). Диаграмма содержит экстремальные значения, которые повторялись во всех экспериментах серии при значениях толщины слоя семян 15 и 30 см.

В 1-й серии экспериментов превышение среднего показателя роста растений экспериментальных образцов (для всех слоев семян толщиной от 0 до 35 см) над средним показателем роста контрольных растений составило 15%.

Эксперименты во второй серии (всего три) проводились летом 2006 г. в условиях длительного, от 1-о до 3-х месяцев, выращивания растений в открытом грунте. Толщина слоя семян, подвергаемых ИВ, была доведена до 45 см. Диаметр контейнера, в котором находились обрабатываемые семена, составлял 20 см. Каждый образец в количестве 50 семян высаживался в одной борозде. Экспериментальные и контрольные борозды чередовались.

Во всех экспериментах второй серии также наблюдалось немонотонное возрастание показателя роста растений с увеличением толщины слоя семян. Экстремальные значения показателя роста в основном сохранялись от опыта к опыту.

Первому максимуму во всех экспериментах

соответствует толщине слоя 15 см, второму максимуму - 25 см (в двух экспериментах). В третьем опыте с продолжительностью выращивания

120 суток второй максимум возник при толщине слоя в 30 см. Результаты этого опыта приведены на рис. 2.

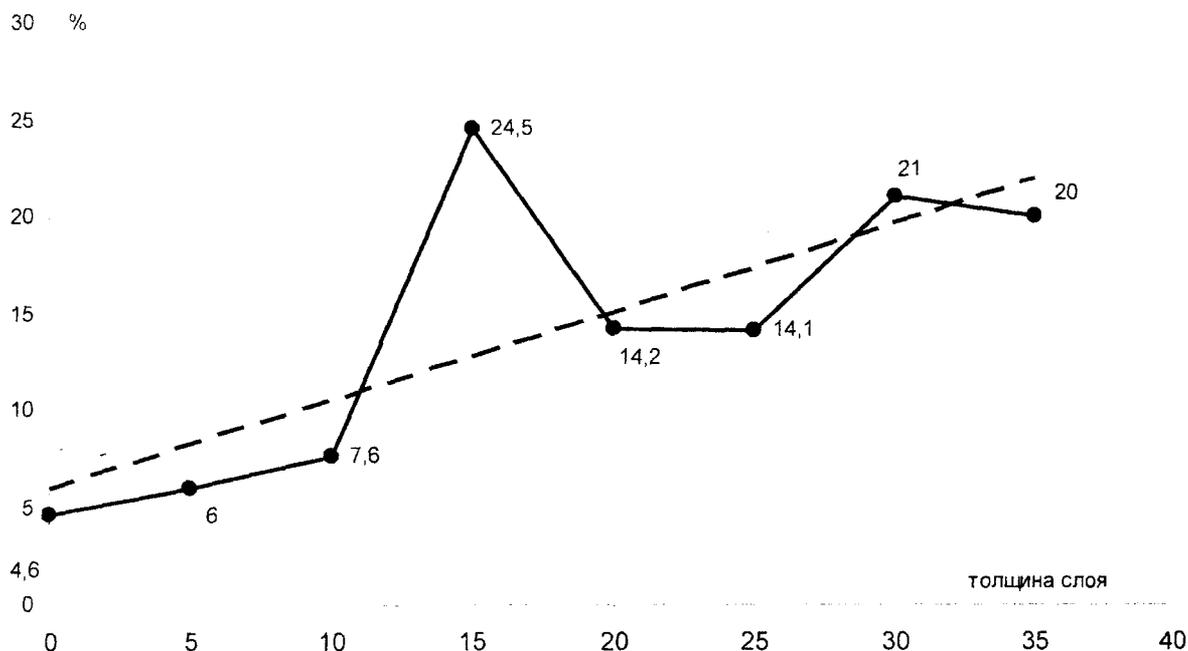


Рис. 1. Послойное распределение средней величины показателя роста пшеницы по результатам 8 опытов 1-й серии

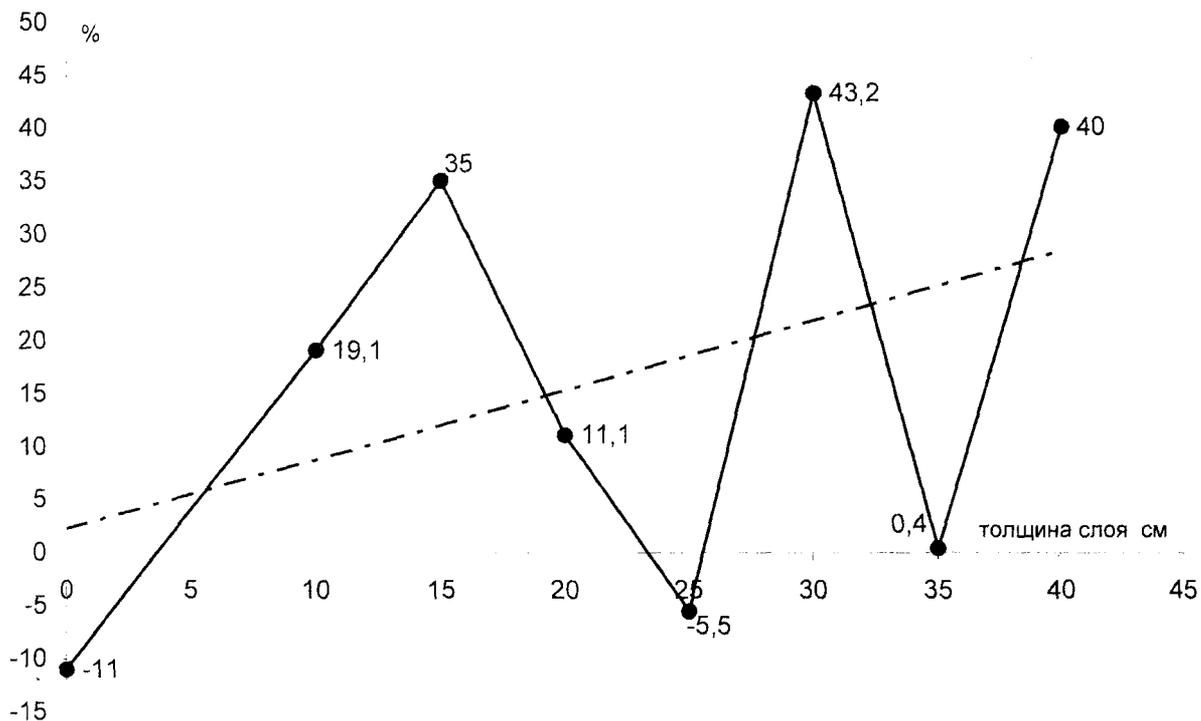


Рис. 2. Зависимость средней массы одного растения от толщины слоя семян пшеницы (вторая серия экспериментов, 120 суток)

Выводы

По результатам двух серий опытов получен вывод: эффективность информационного воздействия возрастает с увеличением толщины слоя семян. Эти результаты, по-видимому, объясняются воздействием на экспериментальные

образцы двух различных по своей природе факторов.

1 Согласно работе [2], генераторы торсионного поля характеризуются осевой симметрией с центром в точке расположения самого генератора и так называемыми «фокусами», расположенными на оси

симметрии, в которых величина индуцируемого торсионного поля резко возрастает. Экстремумы интенсивности роста семян пшеницы, возникающие в результате их предпосевной информационной обработки, обусловлены, по-видимому, наличием в используемых нами квантовых торсионных генераторов «фокусов».

2 В экспериментах, приведенных в работе [3] показано, что реакция биологического детектора – дрожжевых клеток – на воздействие торсионного излучения, пропущенного через две информационные матрицы, определяется, в основном, информационным наполнением (модальностью) матрицы, расположенной ближе к объекту воздействия. В экспериментах с семенами пшеницы в качестве первой матрицы использовался пенициллин. В качестве второй информационной матрицы, обращенной к семенам в исследуемом слое,

по существу, являлись семена пшеницы, отстоящие от поверхностного слоя.

Литература:

1 Проведение исследований и разработка технологии предпосевной обработки семян пропашных и зерновых культур в электромагнитных полях и технических средств для ее реализации. Заключительный отчет о научно-исследовательской работе по теме 1.33: ОрелГТУ, Орел, 2005, 43 с.

2 Акимов А.Е. Эвристическое обсуждение проблемы поиска дальнедействий. EGS-концепция, МНТЦ ВЕНТ, Препринт № 7А, М., 1991.

3 Бобров А.В. Модельное исследование полевой концепции механизмов сознания. Препринт № 2, Орел: ОрелГТУ, 2006. – 182 с.

УДК. 616.073

Канд. техн. наук, доц. Егоров Б.А., асп. Бодров М.А., асп. Яковенко М.В.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНОГО ОБЪЁМА СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА ПРИ КОСВЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ФИЗИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

The article contents mathematical description of systolic volume that based on experimental data. In addition, article includes review of different mathematical methods that can be applying description of systolic volume under eternal influence.

Контроль ударного объёма в биоуправляемых физиотерапевтических аппаратах происходит во времени, т.е. динамически, что предполагает знание динамических характеристик, однако исследование динамических характеристик ударного объёма сопряжено с определенными трудностями, связанными не только с аппаратами, применяемыми при измерениях, но и отсутствием методики обработки полученных данных. Исследование этих свойств позволило бы ответить на многие вопросы, связанные, в том числе с оценкой инерционности сердечнососудистой системы при токовом воздействии, необходимой длительности измерения ударного объёма, внесении корректив в метод измерения ударного объёма через артериальное систолическое давление. Целью проведенных исследований являлось исследование динамических характеристик ударного объёма, создание методики получения и обработки данных при таких исследованиях. Для воспроизведения воздействующего тока применялся аппарат электрофизиотерапии и электростимуляции «Амплипульс-7», род работы – I, частота модуляции 75 Гц, глубина модуляции 50%, место

наложения электродов – медиальная сторона последней трети предплечья и медиальная сторона средней трети плеча правой руки. Для измерения параметров работы сердца был использован эхотомоскоп ЭТС ДМУ-02-02 с датчиком 3 МГц, режим М с горизонтальной разверткой 3 с.

В качестве испытуемых выступали лица возраста от 22 до 50 лет. Эксперимент проводился следующим образом:

На каждого испытуемого воздействовали током силой в 1, 5, 10, 15, 20 и 25 мА. Через каждые 10 с с момента начала воздействия, производили съемку изображения экрана эхотомоскопа. Соответственно, в течение 3 мин получали 18 кадров на одну серию с изображением 2 – 3-х кардиоциклов на каждом кадре, после чего воздействующий ток отключался. После отключения тока испытуемому, согласно рекомендациям [1] предоставляли время на отдых, в течение которого каждые 10 с также продолжали фотосъемку экрана эхотомоскопа. В результате получили серию выборок из 150 кадров, содержащих информацию об амплитудно-временных характеристиках нарастания и снижения ударного объёма в указанном диапазоне воздействующих токов.

В результате эксперимента, получили массив фотоизображений по которому при помощи компьютерной программы CorelDRAW Graphics Suite 12 произвели измерение величины конечного систолического EVs и диастолического объёма EVd крови левого желудочка сердца и времени сокращения сердца. Каждый результат измерений соотносили со временем воздействия. Для калибровки и настройки программы использовались пять размеченных кадров, по которым настраивался и контролировался масштаб изображения в программе. Калибровка программы производилась путем сопоставления размерных линий на отснятом заранее размеченном кадре и размерных линий в окне программы.

Статистическая обработка экспериментальных данных производилась с использованием стандартных критериев. При этом проверялись различия между дисперсиями экспериментальных данных по критерию Фишера. В результате проверки по данному критерию выяснилось, что только для 20 мА, 0 мА возможна совместная обработка данных, следовательно, данные для 5,10 мА нельзя усреднять, т.к. испытуемые относятся к разным группам, в нашем случае имеют разный уровень физической подготовки.

Принимая во внимание вышесказанное, данные по 2 м испытуемым для 20 мА были усреднены и графически представлены на рис. 1.

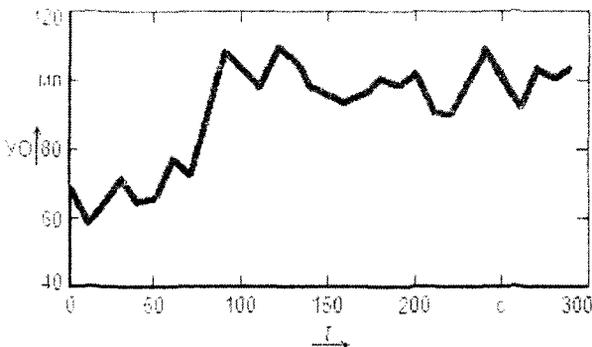


Рис. 1. Усредненные значения ударного объёма при воздействии током в 20 мА

Работа сердца в классической физиологии описывается механизмом Франка-Старлинга, который заключается в пропорциональном увеличении притока крови к сердцу при увеличении сердечного выброса. При этом считается, что даже при увеличении частоты сердечных сокращений кровенаполнение не изменяется, не смотря на сокращение диастолы, что связывают с действием симпатической нервной системы, обуславливающей увеличение кровенаполнение. В результате проведенных экспериментов было выявлено не пропорциональное увеличение конечнодиастолического объёма соответствующему значению ударного объема. Для описания реакции

сердца в области нарушения действия механизма Франка-Старлинга построим импульсную характеристику, используя соотношение (1):

$$W(t) = L^{-1}(W(s)). \quad (1)$$

Здесь $W(s)$ – передаточная функция ударного объёма сердца человека.

Передаточную функцию ударного объёма определим как отношение изображения выходного сигнала к изображению входного сигнала:

$$W(s) = \frac{X_{\text{вых}}(s)}{X_{\text{вх}}(s)}. \quad (2)$$

Исходя из определения передаточной функции, входным сигналом является функция изменения ударного объёма в покое, а выходным – функция изменения ударного объёма при воздействии током в 20 мА. Для получения аналитического выражения описывающего изменение ударного объема во времени в покое и при воздействии током в 20 мА произведем аппроксимацию экспериментальных данных с использованием полиномов вида (3):

$$d + c \cdot x + b \cdot x^n + a \cdot x^{n+1} + \dots + m \cdot x^i, \quad (3)$$

где a, b, c – коэффициенты полинома;

d – свободный член;

n – степень члена полинома;

i – степень полинома.

Применение полинома вида (6), обусловлено, прежде всего, отсутствием сведений об изменении ударного объёма под действием тока. Критериями выбора степени полинома являются: количество экспериментальных данных, влияющих факторов. На практике применяют полиномы 3-4 степени.

Учитывая данные предположения, выберем полином третьей степени. В результате аппроксимации получили полином вида (4):

$$UO(t) = 2,104 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0029 \cdot t^2 - 0,21 \cdot t + 69,08 \quad (4)$$

где $UO(t)$ – ударный объём, заданный в виде функции времени.

Выражение (5) описывает изменение ударного объёма при воздействии током в 20 мА:

$$UO(t) = 1,1 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 1,28 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0037 \cdot t^2 - 0,17 \cdot t + 70,084 \quad (5)$$

Передаточная функция $W(s)$ ударного объёма сердца человека может быть представлена в виде следующего выражения (6):

$$W(s) = \frac{1,1 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 1,28 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0037 \cdot t^2 - 0,17 \cdot t + 70,084}{2,104 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0029 \cdot t^2 - 0,21 \cdot t + 69,08} \quad (6)$$

При использовании обратного преобразования Лапласа над выражением (6), была получена

импульсная характеристика для тока в 20 мА, позволяющая определять реакцию сердечн-

сосудистой системы на токовые воздействия силой тока в 20 мА для любого человека.

Таким образом, в результате исследования получена частная динамическая характеристика сердца – импульсная характеристика.

Литература:

1 Егоров Б.А. *Современные математические методы в биомедицинских исследованиях* / Б.А. Егоров, М.А. Бодров, М.А. Евзельман, Ю.В. Золотарёв. – Орел: ОрелГТУ, 2006. – 101 с.

2 Егоров Б.А. *Аппроксимация откликов сердечно-сосудистой системы (ССС) человека на электровоздействия физиотерапевтического диапазона* / Б.А. Егоров, М.А. Бодров, Д.П. Санников, М.А. Евзельман // *Проблемы восстановительной медицины*.: Сб. науч. тр. межрег. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2005. – С. 53-67.

3 Егоров Б.А. *Теоретические аспекты биоуправления физиотерапевтической аппаратурой* / Б.А. Егоров, М.А. Бодров // *Медико-экологические информационные технологии* –

2005.: Сб. науч. тр. VIII междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2005.

4 Егоров Б.А. *Особенности аналитического описания изменения ударного объема сердца человека под влиянием внешней нагрузки* / Б.А. Егоров, М.А. Бодров // *Известия ОрелГТУ*. – Сер. *Машиностроение. Приборостроение*. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – №2. – С. 23-29.

5 Егоров Б.А. *Проблемы проектирования биоуправляемых аппаратов токовой терапии* / Б.А. Егоров, М.В. Яковенко // *Известия ОрелГТУ*. – Сер. *Машиностроение. Приборостроение*. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – №1. – С. 32-36.

6 Егоров Б.А. *Использование изменения ударного объема сердца человека для биоуправления физиоаппаратами* / Б.А. Егоров, М.А. Яковенко // *«Приборостроение-2005»: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф.* – Винница-Ялта, 2005. – С. 197-200.

УДК: 612.014.462.9

Канд. биол. наук Бобров А.В.

(Орловский государственный технический университет)

Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

СОБСТВЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОЛЯ ОБЪЕКТОВ ЖИВОЙ И НЕЖИВОЙ ПРИРОДЫ

In this article shown the results of researches the own informational radiations of objects of living and non-living nature. The results of experimental scientific researches are adduced.

Согласно фундаментальным представлениям, все неуравновешенные по спину – «спинирующие» объекты живой и неживой природы представлены в физическом вакууме (ФВ) собственными характеристическими полями, несущими сложную информацию о структуре спиновой системы объекта, и потому их называют информационными. Приобретение и перенос информации является специфическим и важнейшим свойством информационных полей физического вакуума [1]. При прохождении через вещество информационной матрицы неэлектромагнитного компонента излучения, исходящего от квантового генератора (КГ) – лазерного или светодиодного излучателя [2], это излучение в результате его взаимодействия с характеристическим полем информационной матрицы приобретает информацию о структуре спиновой системы её вещества.

Характеристические информационные поля, как поля физического вакуума, не связаны с энергией и массой и распространяются без затухания; скорость их распространения во много раз превышает скорость света. Подобно остаточным магнитным полям в

ферромагнетиках, информационные поля, после полного исчезновения породившей их спиновой структуры, могут неопределенно долго существовать в ФВ в виде фантомов. Так, французский ученый Дж. Бенвенисте в 1986 г. экспериментально обнаружил феномен передачи водой информации о веществе, с которым ранее она находилась в контакте. Еще раньше и до сегодняшнего дня в гомеопатии используют это свойство воды сохранять информацию об исцеляющем начале биологически активных соединений.

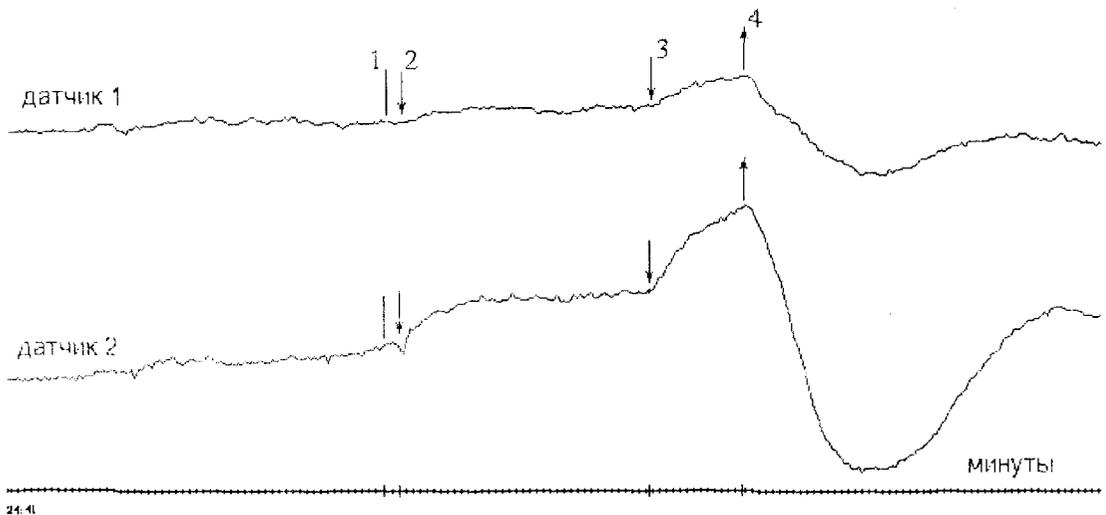
Целью наших исследований являлось экспериментальное подтверждение существования характеристических полей материальных объектов и их участия в различных процессах, включая процессы жизнедеятельности биологических объектов. Необходимым и достаточным признаком, доказывающим их существование, является обнаружение у них свойства нести информацию о веществе самих объектов или информацию, приобретенную в результате полевого взаимодействия различных объектов.

В 70-х годах прошлого столетия было обнаружено явление сдвига электрического потенциала на поверхностях коры головного мозга наркотизированного животного (мышцы, растения), возникающего при поднесении к ним твердого тела или руки человека. По величине и лабильности реакция на воздействие человека резко отличалась от реакции на воздействие неживых объектов и зависела от психической деятельности оператора и его психоэмоционального состояния [1, 3]. Подобная же реакция на дистантные воздействия была обнаружена в системе, состоящей из двух электродов, погруженных в воду. Показано, что она обусловлена реакцией приэлектродных двойных электрических слоев (ДЭС), чувствительных к воздействию физических факторов [4, 5]. Обнаруженное явление свидетельствовало о наличии у материальных объектов собственных полей неизвестной природы [1]. Эти результаты привели к созданию преобразователя (детектора) высокопроницающего

неэлектромагнитного компонента излучения человека (ВНКИЧ) – так называемой Токовой электродной системы [6], что позволило приступить к доказательству существования характеристических полей материальных объектов и к исследованию их свойств.

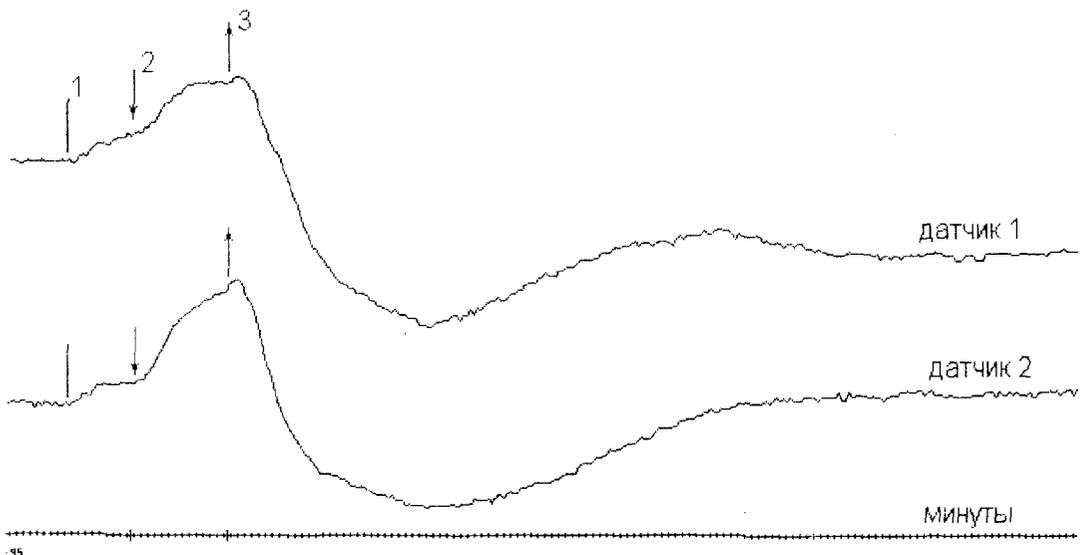
1 Информационные свойства собственных полей материальных объектов

1.1 Методика. Исследования, направленные на обнаружение информационных свойств указанных выше полей с целью определения их принадлежности к характеристическим полям объектов неживой природы, проводились с применением «Токовых» детекторов. Исследовалась реакция на воздействие пустого стеклянного сосуда и этого же сосуда, заполненного образцами неактивированной и активированной воды.



1 – приход экспериментатора в экспериментальное помещение; 2 – установка пустого сосуда; 3 – заполнение сосуда свежее активированной водой; 4 – удаление воды из сосуда. Расстояние $S = 5$ см

Рис. 1. Реакция датчиков на воздействие собственных полей неживых объектов: пустого сосуда и сосуда, содержащего активированную воду



1 – удаление пустого сосуда с расстояния $S = 5$ см на $S = 75$ см; 2 –
заполнение сосуда свежеактивированной водой; 3 – удаление воды

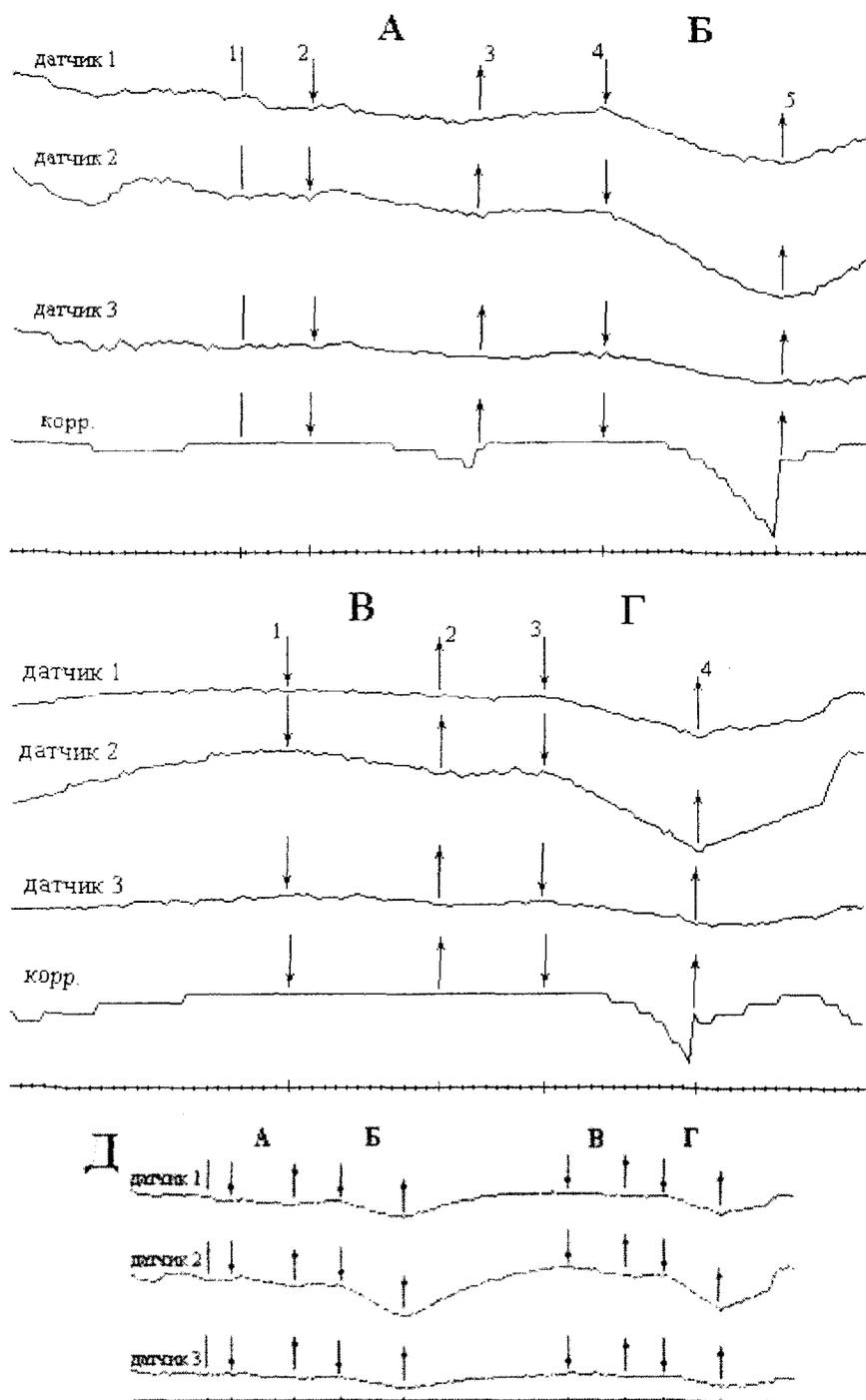
**Рис. 2. Реакция датчиков на перемещение пустого стеклянного сосуда
и последующее воздействие активированной воды**

Активация воды производилась путём информационного воздействия неэлектромагнитного компонента излучения, исходящего от светодиодного излучателя, пропущенного через вещество информационной матрицы – пенициллин в упаковке из полиэтиленовой пленки.

Эксперименты проводились с применением 2-х или 3-х Токовых детекторов, входивших в состав компьютеризованного комплекса, обеспечивавшего

длительную синхронную регистрацию потенциалов на выходах детекторов и позволявшего в режиме реального времени проследить корреляционную зависимость сигналов на выходах двух выбранных детекторов.

Детекторы и экспериментальные образцы располагались в стенном шкафу, в котором исключались быстрые температурные перепады. Расстояние между детекторами составляло 3-5 см.



1 – приход экспериментатора в ЭП; 2, 3 – заливка в сосуд и слив неактивированной воды; 3, 4 – заливка в сосуд и слив активированной воды; корр. – корреляционная кривая для датчиков 1 и 3; $S = 75$ см

Рис. 3. Результаты двух экспериментов, иллюстрирующие повторяемость реакции трех токовых датчиков на дистантное воздействие неактивированной (А, В) и активированной (Б, Г) воды. Д – эти же эксперименты в масштабе 1:4

Воздействие на детекторы производилось двумя способами:

1) пустой сосуд устанавливался на заданном расстоянии $S = 5-75$ см от детекторов, где он оставался на протяжении всего эксперимента. После окончания регистрации реакции на воздействие пустого сосуда в него заливалось 300 мл одного из экспериментальных образцов – неактивированной или активированной воды. Заполнение сосуда следующим образом производилось сразу вслед за удалением первого образца или спустя некоторое время;

2) после окончания регистрации реакции на воздействие пустого сосуда, он удалялся на расстояние 5-7 м, и в него заливался образец неактивированной или активированной воды в количестве 300 мл, после чего сосуд с водой устанавливался на расстоянии от 5 до 75 см от детекторов. После окончания воздействия сосуд с водой снова удалялся, вода из него сливалась, подвергалась информационному воздействию и снова заливалась в сосуд, который сразу же, или спустя некоторое время, устанавливался на прежнее место перед детекторами.

В опытах использовалась отстоявшаяся (не менее суток) вода из городского водопровода. Температура воды совпадала с температурой детекторов.

В качестве источника неэлектромагнитного компонента излучения использовался импульсный светодиодный излучатель желтого света, содержащий 100 параллельно включенных светодиодов типа КИПД40ж20-ж пб ($\lambda = 590$ нм, световое пятно 100x100 мм). Частота повторения импульсов – 3,2 кГц; длительность импульса возбуждения – 150 нс. Продолжительность воздействия – 90 с.

Регистрирующая аппаратура располагалась в смежном экспериментальном помещении (ЭП) на расстоянии 4 м от детекторов, находившихся за кирпичной стеной.

1.2 Результаты экспериментов. На рис. 1-3 приведены примеры реакции детекторов («датчиков»), возникшей в ответ на воздействие пустого стеклянного сосуда и этого же сосуда, заполненного активированной водой. Расстояние между исследуемым образцом и датчиками – 5 см. На рис. 3 и далее нижняя прямая – одномоментные метки времени. Стрелками, обращенными к кривым, обозначено начало воздействия; от кривых – окончание.

Как видно на рис.1, реакция Токовых датчиков на воздействие сосудом, содержащим воду, заметно отличается от реакции на воздействие пустым сосудом. Так, у датчика №2 (рис. 1) наблюдается

более чем двукратное превышение величины реакции на воздействие сосуда, содержащего воду, относительно реакции на воздействие пустым сосудом.

В эксперименте (рис. 2) показана реакция датчиков на перемещение на 70 см пустого сосуда, находившегося ранее на расстоянии 5 см от датчиков. Через 10 минут после перемещения в сосуд была залита активированная вода (позиция 2); еще через 14 минут вода была слита (позиция 3). Восстановление величины потенциала на выходе датчика №2 до исходного значения длилось около 70 минут.

На рис. 3 приведены материалы, иллюстрирующие повторяемость результатов экспериментов: на датчики 1-3 дважды производились пятнадцатиминутные воздействия неактивированной (А и В) и активированной (Б и Г) воды. В обоих случаях реакция датчиков на воздействие активированной воды значительно превышала по величине реакцию на воздействие воды неактивированной. О повторяемости результатов в этом эксперименте можно дополнительно судить по результатам представленного на кривой «корр.» корреляционного анализа выходных потенциалов детекторов 1 и 2.

Из приведенных экспериментальных материалов следует: токовые детекторы на ДЭС отвечают реакцией на полевое воздействие пустого сосуда и сосуда, содержащего различные образцы воды. Реакция, возникающая при воздействиях различных объектов – пустого стеклянного сосуда, образцов активированной и неактивированной воды, различна. Реакция датчиков на воздействие активированной воды всегда превышает величину реакции на воздействие воды неактивированной. Об этом свидетельствуют также результаты компьютерной обработки первичной информации – кривые корреляционной зависимости выходных потенциалов датчиков (рис. 3). Различие ответов на воздействие образцов неактивированной и активированной воды – объектов с одинаковыми геометрическими, физическими и химическими параметрами можно объяснить только различием их информационного содержания (модальности), возникшим в результате информационного воздействия на неактивированную воду.

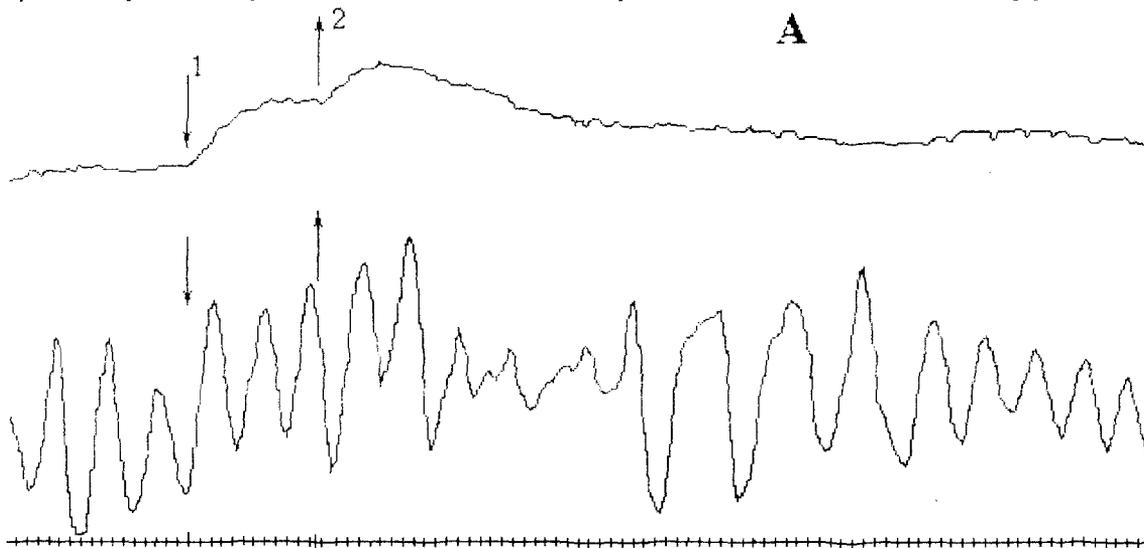
Из всего сказанного следует заключить: все объекты неживой природы обладают собственными полями с различным информационным насыщением, что подтверждает существующие представления о характеристических (собственных информационных) полях объектов неживой природы. Расстояние, на котором реализуется взаимодействие между этими полями, не менее 75 см.

2 Влияние характеристических полей на физические, физико-химические и биологические процессы

Отличительная особенность Токовой электродной системы, определяющая её ключевую роль в изучении информационных свойств характеристических полей, заключается в возможности возбуждения в ней автоколебательного (АК) процесса, чувствительного к воздействию информационных полей. Изменения параметров АК-процесса – амплитуды и частоты, являющиеся вторым – «частотным» компонентом реакции «Токового» детектора, обусловлены изменением физических и физико-химических процессов, проходящих в

электродной системе, возникающим в ответ на воздействие факторов внешней среды [6, 7]. Именно поэтому изменение амплитуды и (или) частоты АК-процесса, возникающее в ответ на дистантное воздействие неживых объектов, является непосредственным доказательством воздействия их характеристических полей на сложные процессы, проходящие в этих системах. Это доказательство распространяется и на процессы жизнедеятельности биологических объектов, поскольку система приэлектродных ДЭС Токовой электродной системы являет собой модель системы примембранных ДЭС, участвующих в механизме неспецифической реакции биообъектов на воздействие внешних факторов*.

*Реакция примембранных ДЭС – изменение их потенциалов, возникающее в ответ на воздействие факторов внешней среды, определяет градиенты электрических потенциалов мембранного комплекса, образуемого плазматической мембранной клетки совместно с примембранными ДЭС, и тем самым влияет на процессы трансмембранного переноса веществ и в целом – на процессы клеточного метаболизма [7].



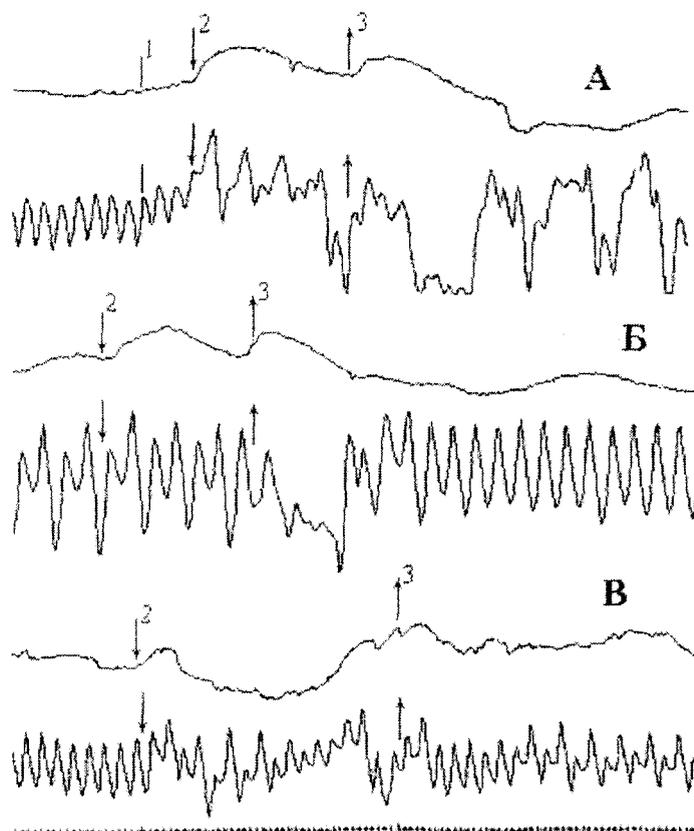
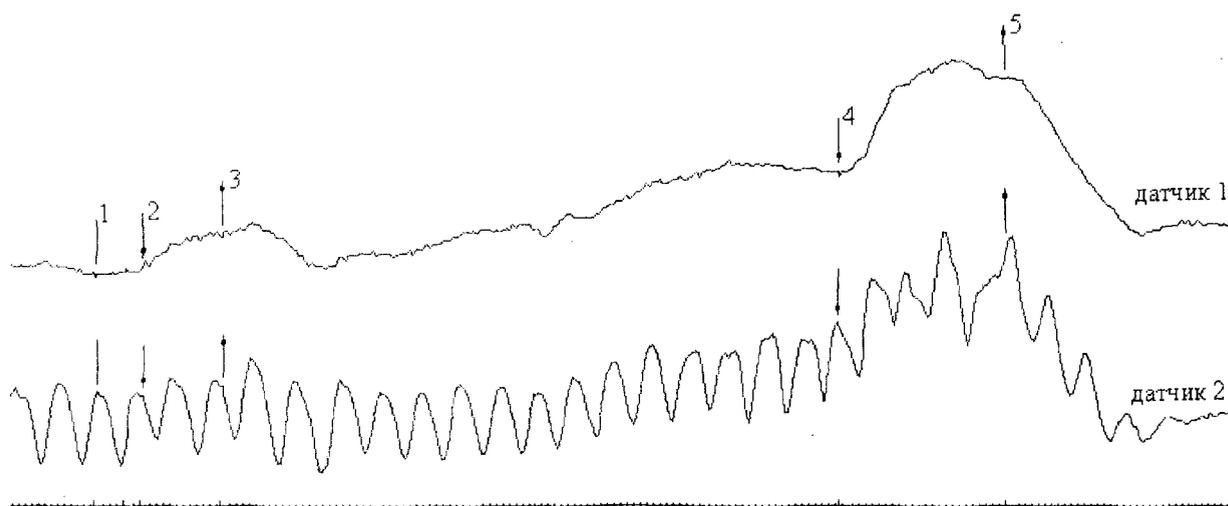


Рис. 4. Синхронная реакция двух токовых датчиков на воздействие характеристического поля неактивированной и активированной воды. А: 1 – приход экспериментатора в ЭИ; 2 – активированная вода залита в сосуд; 3 – вода из сосуда удалена. Б, В: 2 – неактивированная вода залита в сосуд; 3 – вода удалена

На рис. 4-6 приведены результаты экспериментов, в которых один из двух Токовых детекторов работает в режиме автоколебаний.

В опыте (рис. 4) воздействию с расстояния 5 см производились сначала образцом активированной воды с экспозицией 30 минут (рис. 4, А), а затем образцами неактивированной воды с экспозицией 30 и 45 мин. (рис. 4, Б и 4, В, соответственно). Как видно на рис. 4, реакция обоих токовых датчиков на воздействие активированной воды по величине значительно превысила реакцию, вызванную воздействием неактивированной воды.

Наглядное различие реакций проявилось в изменении параметров АК-процесса. воздействие активированной воды вызвало глубокое и длительное изменение амплитуды и периода автоколебаний сразу после его начала. Реакции на воздействия неактивированной воды были значительно слабее. Так, в результате воздействия неактивированной воды кратковременная (не более 30 минут) реакция на рис. 4, Б возникла только после его прекращения. Как на рис. 4, Б, так и на рис. 4В автоколебания, спустя примерно 30 минут после окончания воздействия, перешли в состояние стационарного процесса.



1 – приход оператора в экспериментальное помещение; 2 – заливка в сосуд неактивированной воды; 3 – слив из сосуда неактивированной воды; 4 – заливка в сосуд активированной воды; 5 – слив воды из сосуда

Рис. 5. Синхронная реакция двух токовых датчиков на воздействие собственного характеристического поля неактивированной и активированной воды

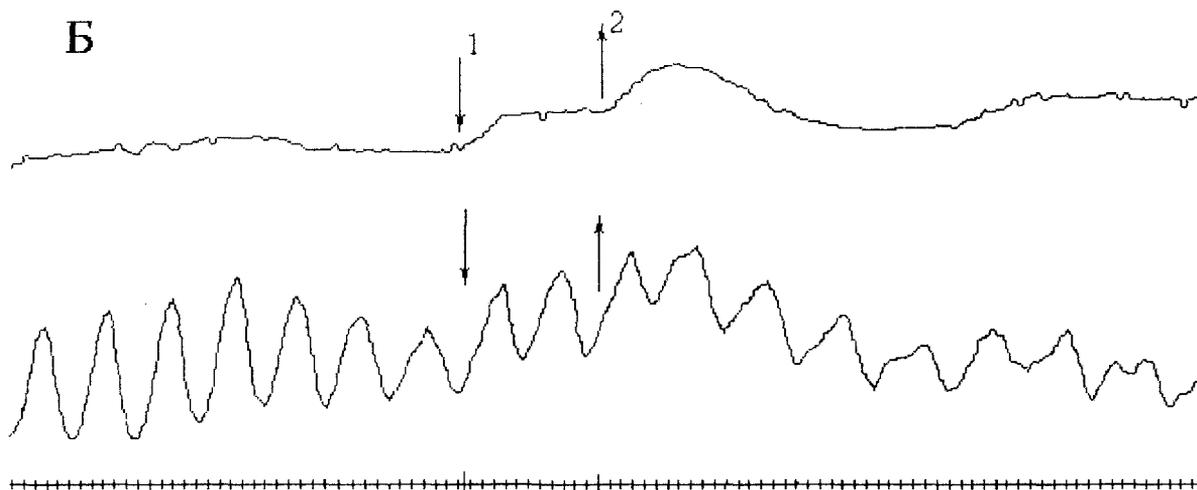


Рис. 6. Синхронная реакция двух токовых датчиков на воздействие характеристического поля сосуда с активированной и неактивированной водой. А: 1 – активированная вода залита в сосуд; 2 – вода из сосуда удалена. Б: 1 – неактивированная вода залита в сосуд; 2 – вода удалена

В эксперименте (рис. 5) в воздействие на датчики с расстояния 5 см производилось в обратном порядке: сначала образцом неактивированной воды, а затем образцом активированной воды.

Слабое 11-и минутное воздействие характеристического поля сосуда с неактивированной водой привело к изменению средней величины межэлектродного тока в датчике 1. В датчике 2 частота АК-процесса практически не изменилась, наблюдалось лишь незначительное снижения амплитуды колебаний в первые 3-4 минуты после начала воздействия, сменявшееся затем таким же ее кратковременным возрастанием после его прекращения.

Воздействие с применением активированной воды (рис. 6), как и в предыдущем примере, привело к значительному изменению среднего значения межэлектродного тока в датчике 1, что более чем в два раза превысило величину реакции на воздействие сосуда с неактивированной водой. В датчике 2 также произошло заметное изменение среднего значения межэлектродного тока и значительно изменились параметры АК процесса, что, в конечном счете, привело к срыву автоколебаний. Как и в предыдущих двух примерах, изменения параметров АК-процесса, возникшие в ответ на воздействие сосуда с активированной водой, расположенного на расстоянии 60 см от датчиков, значительно превысили реакцию на воздействие сосуда с неактивированной водой (рис. 6).

Из изложенных экспериментальных данных следует: механизм воздействия неактивированной и

активированной воды на физические и физико-химические процессы, проходящие в Токовой электродной системе, основан на полевом взаимодействии характеристического поля воды с характеристическим полем электродной системы. Результат такого взаимодействия определяется только информационным наполнением (модальностью) активированной воды.

Собственные (характеристические) спиновые поля материальных объектов являются торсионными полями на уровне физического вакуума. В общем случае в качестве воздействующего фактора на характеристические поля материальных объектов могут выступать торсионные (информационные) поля индуцируемые генераторами ТП. Во всех случаях результат такого воздействия, обусловленный информационным наполнением (модальностью) воздействующего фактора, приводит к изменению информационного содержания - (модальности) характеристического поля вещества, или, что то же самое, к изменению структуры его спиновой системы. В свою очередь, изменение модальности характеристического поля вещества влечет за собой изменение физических характеристик и свойств вещества (в нашем случае – вещества жидкой и твердой фазы токовой электродной системы) и, как следствие, изменение свойств и характера физических, физико-химических и биологических процессов на уровне объекта, в котором это вещество участвует (в нашем случае – автоколебательного процесса, происходящего в Токовом детекторе).

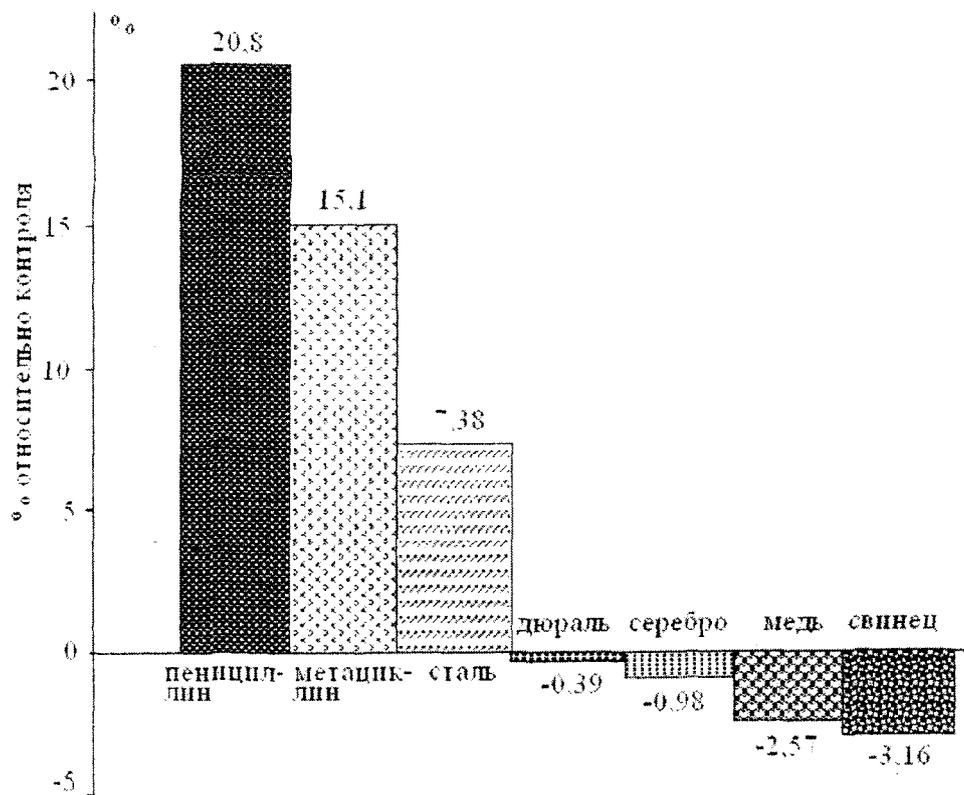


Рис. 7. Зависимость биологической активности воды от вещества информационной матрицы, использованной при ее активации

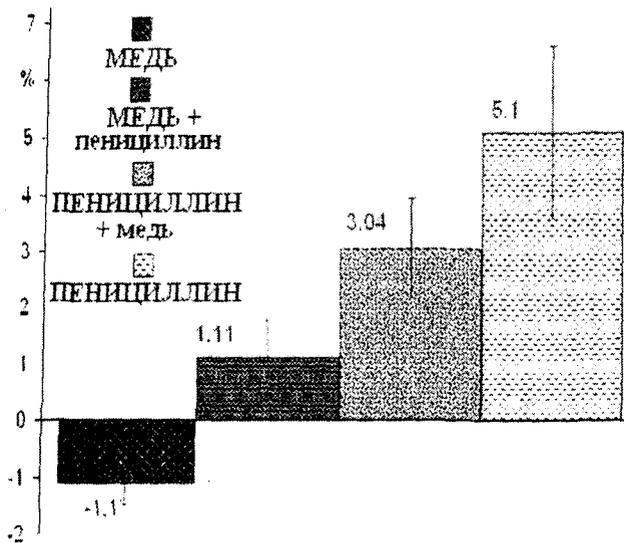


Рис. 8. Зависимость эффективности информационного воздействия от порядка сочетания информационных матриц меди и пенициллина

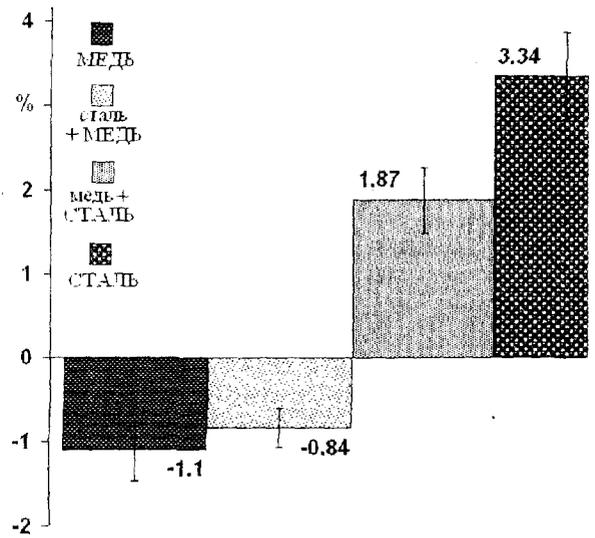


Рис. 9 Зависимость эффективности информационного воздействия от порядка чередования информационных матриц стали и меди

3 Информационные свойства характеристических полей

Собственные поля различных веществ характеризуются присущим им информационным наполнением (модальностью). При прохождении через вещество (информационную матрицу) торсионного излучения, индуцированного квантовым генератором, оно приобретает специфическую модальность, присущую этой матрице. Вода, подвергнутая информационному воздействию («активации») с применением информационных матриц различной природы, оказывает различное влияние на жизнедеятельность биологических объектов. На рис. 7 показана зависимость эффективности информационного воздействия активированной водой на сухие дрожжи от вещества информационной матрицы, полученная по результатам 7 серий от 10 до 20 экспериментов в каждой. Выборки в каждой серии экспериментов содержали от 80 до 160 чисел. Как видно на рис. 7, активация воды при участии пенициллина, метациклина и стали стимулирует жизнедеятельность микроорганизмов; применение матриц из дуралюмина, серебра, меди и свинца ее ингибирует.

В четырех сериях по 10 экспериментов изучалась зависимость эффективности прямого информационного воздействия на микроорганизмы от порядка сочетания двух информационных матриц. В каждом эксперименте участвовало 2 группы по 8 популяций. В «экспериментальной» группе дрожжи подвергались информационному воздействию; в контрольной – воздействие на дрожжи не производилось. Выборки в каждой серии экспериментов содержали 80 чисел. Результаты четырех серий экспериментов с использованием в качестве информационных матриц пенициллина и меди показаны на рис. 8.

Информационное воздействие с применением матрицы-пенициллина привело к повышению жизнедеятельности дрожжевых клеток на 5,1% относительно контроля. Воздействие с применением матрицы-меди снизило жизнедеятельность дрожжевых клеток относительно контроля на 1,1%.

Воздействие на дрожжевые клетки излучением, пропущенным сначала через матрицу-пенициллин, а затем через матрицу-медь, привело к повышению жизнедеятельности относительно контроля на 1,1%. При обратном порядке расположения информационных матриц показатель жизнедеятельности в группе экспериментальных популяций составил 3%.

На рис. 9 представлены результаты еще четырех серий экспериментов с участием стальной и медной матриц. Информационное воздействие с применением матрицы-сталь привело к повышению жизнедеятельности дрожжевых клеток на 3,34% относительно контроля. Воздействие с применением матрицы-меди снизило показатель жизнедеятельности на 1,1%. Применение двух матриц привело к промежуточным значениям эффективности информационного воздействия. Таким образом, при пропускании излучения через две матрицы результат воздействия зависит от порядка их сочетания. Биологическая активность воздействующего фактора, обусловленная его информационным насыщением (модальностью), определяется, в основном, информационными свойствами вещества «выходной» матрицы, расположенной непосредственно перед объектом воздействия. Обнаруженная закономерность повторяется при сочетании иных веществ в качестве информационных матриц. Эта закономерность обусловлена процессом последовательного спин-спинового взаимодействия торсионного излучения при его

прохождении через вещества двух информационных матриц. Результат такого взаимодействия имеет неаддитивный характер, поскольку зависит от порядка сочетания веществ.

Заключение

Экспериментально показано: все материальные объекты обладают собственными характеристическими полями, несущими информацию о структуре спиновой системы вещества этих объектов. Характеристические поля объектов являются информационными полями физического вакуума. Взаимодействие характеристических полей двух материальных объектов приводит к изменению их спиновой структуры, обуславливая изменение физических характеристик вещества этих объектов, что влечет за собой изменение протекающих в них процессов.

При прохождении через вещество информационной матрицы неэлектромагнитного компонента излучения, индуцируемого квантовым генератором, оно приобретает информацию о структуре спиновой системы матрицы.

Литература:

1 Акимов А.Е. *О физике и психофизике* / А.Е. Акимов, В.Н. Бинги; под ред. А.Е. Акимова // *Сознание и физический мир*. – М.: «Яхтсмен», 1995. – Вып. 1 – С. 104-125.

2 Бобров А.В. *Торсионный компонент электромагнитного излучения. Информационные торсионные поля в медицине и растениеводстве*. ВИНТИ, деп. №635-В98, М.:1998.

3 Думбадзе С.И. *Явление сдвига электрического потенциала на поверхности коры при расположении над ней твердого тела* / С.И. Думбадзе, А.В. Бобров // *Сообщения АН Грузинской ССР*, 104, №3. – 1981. – С. 721-724.

4 Бобров А.В. *Электрическая реакция объектов живой и неживой природы, возникающая в ответ на дистантное воздействие человека* / А.В. Бобров, Т.В. Колесникова, Ф.О. Шрайбман // *Матер. Всесоюз. сем. «Информационные взаимодействия в биологии»*, Кара-Даг, 1986 г. – Тбилиси: Изд. ТГУ, 1987. – С. 31-44.

5 Бобров А.В. *Рецепторная функция двойных электрических слоев / «Регуляция тканевого гомеостаза. Нетоксическая профилактика и терапия хронических патологий»*. Вып. ГЖНТ Гр. ССР, Тбилиси, 1989.

6 Бобров А.В. *Модельное исследование механизма неспецифической рецепции* // *Коллективная монография «Современные проблемы изучения и сохранения биосферы»*, Т. 2. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992.

7 Бобров А.В. *Модельное исследование механизма неспецифической рецепции*. ВИНТИ. Деп. № 2223 – В2001, М.: 2001.

ТРИБОЛОГИЯ И ТРИБОМОНИТОРИНГ

ТРИБОЛОГИЯ И ТРИБОМОНИТОРИНГ

УДК 620.179.1.082.7:658.58

Канд. техн. наук Марков В.В.
 (Орловский государственный технический университет)
 Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УЧЁТА ЭФФЕКТА ПРИРАБОТКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

In this article are show the actual of creation the mathematical model of electrical resistance the bearing of rolling. The possible ways of modernization this mathematical model are adduced. Are makes the survey of law the distribution of probabilities of summit the micro-unequal the working surfaces the elements of machines. The distribution of methodic of calculation the effect of "supplement" the working surfaces the bearings of rolling by the mathematical description his electrical resistance.

Постановка задачи исследования

Подшипники качения (ПК) являются широко распространёнными трибологическими системами механизмов машин. Они входят в состав большинства машин, являются их наиболее нагруженными элементами, что обуславливает повышенные требования к их надёжности и, в частности, к долговечности. ПК состоят из деталей, работающих при высоких скоростях вращения, в условиях непрерывного и случайного изменения внутренних и внешних факторов. Поэтому точный расчёт долговечности ПК сопровождается значительными затруднениями и их долговечность определяется приближённо. При плановом ремонте машин по окончании назначенного ресурса ПК, независимо от их фактического состояния, демонтируются и заменяются новыми. Поскольку ресурс ПК был назначен ориентировочно, возможно возникновение двух крайних случаев:

1) заменяемый подшипник сохраняет работоспособное состояние;

2) подшипник отказывает задолго до выработки назначенного ресурса.

Первый случай возможен при благоприятных условиях работы ПК, и замена его нецелесообразна. Второй случай может возникнуть при нарушении условий эксплуатации ПК, и способен привести к возникновению аварийной ситуации. Оба случая приводят к неоправданному возрастанию эксплуатационных затрат машины, и не должны допускаться.

Таким образом, при эксплуатации машин и механизмов существует задача оценки фактической долговечности ПК, которая может быть решена его диагностированием. От точности диагностирования ПК в изделии зависит достоверность оценки его технического состояния и правильность решения о продолжении или прекращении эксплуатации ПК.

Не умаляя достоинств известных методов неразрушающего контроля и диагностирования ПК в изделиях, отметим, что электропараметрические методы диагностирования обладают преимуществами, в частности, возможностью их

одновременной реализации с методами диагностирования другой природы (например, тепловыми или виброакустическими).

Среди электропараметрических методов диагностирования ПК широкую и многолетнюю известность имеет электрорезистивный метод, универсальность которого позволяет использовать его при различных смазках – от граничной до жидкостной.

Точность диагностирования ПК электрорезистивным методом определяется полнотой математического описания зависимости диагностических параметров от факторов, характеризующих техническое состояние деталей подшипника. Таким математическим описанием является математическая модель электрического сопротивления ПК, раскрывающая взаимосвязь электрического сопротивления ПК, геометрических параметров рабочих поверхностей его деталей, состояние смазочного материала между рабочими поверхностями, режимов эксплуатации ПК и внешних условий его работы.

Поскольку факторов, влияющих на электрическое сопротивление ПК, много, и их проявление разнообразно, при совершенствовании математической модели может следовать в двух направлениях:

- 1) учёт как можно большего числа факторов;
- 2) учёт небольшого числа важнейших факторов.

Первое направление может привести к созданию бесконечно сложной математической модели, учитывающей множество факторов, но совершенно непригодной для практического применения даже в условиях использования мощных вычислительных средств или современных высокопроизводительных микропроцессорных средств диагностирования ПК.

Второй путь позволяет составить достаточно простую математическую модель сопротивления ПК, но для его реализации необходимо выявить как можно большее число факторов, влияющих на сопротивление ПК вообще, затем проанализировать весомость каждого фактора и оставить только самые

существенные. Образно выражаясь, сначала надо работать в первом направлении, а затем – во втором.

Обоснованию возможности такого подхода к математическому моделированию электрического сопротивления ПК посвящаются результаты теоретических исследований, изложенные в этой работе.

Актуальность проблемы и цель работы

Одним из важнейших внутренних параметров ПК, определяющих всю структуру математической модели его электрического сопротивления, является высота микронеровностей рабочих поверхностей деталей подшипника [1]. Известно также, что вследствие эффекта приработки рабочих поверхностей, их микрорельеф может значительно измениться, поэтому математические модели высоты микронеровностей новой и приработанной поверхностей могут существенно отличаться. Если высота микронеровностей задана функцией распределения вероятностей, то для новой и приработанной поверхностей даже виды законов распределения могут быть различными. В конечном счёте, это приведёт к различию законов распределения электрического сопротивления нового и приработанного подшипников.

Эффект приработки постоянно учитывается при экспериментальных исследованиях функции электрического сопротивления подшипника (перед экспериментом ПК обычно прирабатывают). При теоретических исследованиях этот эффект, как правило, не учитывается. В лучшем случае, в математической модели электрического сопротивления ПК могут задаваться пользователем параметры шероховатости новых или приработанных поверхностей.

Указанное расхождение методик экспериментальных исследований и формул математической модели может быть одной из причин низкой точности математического моделирования электрического сопротивления ПК. Для обоснованного назначения точности расчётов и (или) упрощения математической модели необходимо выполнить действия:

1) проанализировать законы распределения вероятностей, применяемые для математического описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей деталей машин, с точки зрения возможности учёта эффекта приработки поверхностей;

2) найти закон распределения вероятностей, позволяющий учитывать эффект приработки, и вычислить параметры шероховатости (например, параметр R_a) новой и приработанной поверхностей;

3) сравнить параметры шероховатости новой и приработанной поверхностей и оценить погрешность моделирования сопротивления подшипника из-за отсутствия учёта эффекта приработки.

Если эта погрешность будет много меньше заданной погрешности диагностирования (около 10%), можно утверждать, что эффект приработки в математической модели можно не учитывать. В противном случае приработкой пренебрегать нельзя. Определение этого и является целью данной работы.

Анализ законов распределения

Среди законов распределения вероятностей, пригодных для описания высоты микронеровностей поверхностей деталей машин, достаточно широкое распространение получили:

- 1) нормальное распределение [2, 3];
- 2) бета-распределение [4, 5];
- 3) распределение Найака [6].

Рассмотрим их на предмет возможности учёта эффекта приработки поверхностей ПК.

Нормальный закон распределения вероятностей позволяет составить математическое описание шероховатости шлифованных деталей. Он очень удобен в использовании, т.к. математически устойчив и снабжён обширной справочной информацией [2].

Дифференциальная функция нормального распределения высоты микронеровностей h рабочих поверхностей для отдельного фрикционного контакта в ПК может быть выражена формулой:

$$f(h) = \frac{1}{R_q \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{h^2}{2 \cdot R_q^2}\right), \quad (1)$$

где R_q - полное среднеквадратическое отклонение профиля: $R_q = R_a \cdot \sqrt{\pi/2}$;

R_a - среднее арифметическое отклонение профиля;
 h - высота микронеровностей профиля.

В реальном ПК рабочие поверхности тел и дорожек качения являются шероховатыми. Для учёта микрогеометрии обеих контактирующих поверхностей в выражении (1) используются приведенные параметры шероховатости [4]:

$$R_q = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}. \quad (2)$$

Индексами 1 и 2 отмечены параметры шероховатости соответствующих поверхностей.

В данном случае, в качестве математической модели высоты микронеровностей предложена теоретическая дифференциальная функция нормального закона распределения вероятностей, записанная в виде выражения (1). В действительности, закон распределения высоты микронеровностей реальных поверхностей отличается от теоретического нормального распределения [7]. Ветви теоретической кривой нормального закона распределения вероятности уходят в бесконечность, что допускает возможность появления на рабочих поверхностях деталей подшипника бесконечно больших микронеровностей. Высота микронеровностей реальных поверхностей ограничена максимальным значением – параметром R_{max} шероховатости [4, 7, 2].

Для оценки погрешности от несоответствия закона распределения высоты микронеровностей нормальному закону распределения вероятностей воспользуемся унифицированным математическим аппаратом теории статистического контроля качества [8]. Тогда рассматриваемая составляющая

δ_p , погрешности диагностирования может быть найдена из выражения [8]:

$$\delta_D = k_C \cdot \left(\frac{\Phi_0(\infty) - \Phi_0(y)}{\Phi_0(\infty)} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где k_3 – коэффициент запаса, учитывающий количество рабочих поверхностей (для отдельного фрикционного контакта $k_3 = 3$);

$\Phi_0(\infty)$, $\Phi_0(y)$ – соответственно, нормированные функции Лапласа бесконечного аргумента и параметра y .

Параметр закона распределения y может быть найден из следующего выражения [8]:

$$y = \frac{R_{\max}}{R_a} \approx 5. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в выражение (3), пользуясь таблицами значений функции $\Phi_0(y)$, получаем погрешность от несоответствия закона распределения высоты микронеровностей нормальному распределению $\delta_p \approx 0,002\%$.

Поскольку составляющая погрешности диагностирования, обусловленная несоответствием закона распределения высоты микронеровностей нормальному закону распределения вероятностей δ_p значительно меньше возможной погрешности диагностирования ПК (на менее 1%), можно, в качестве допущения, принять выражение (1) в качестве математической модели высоты микронеровностей рабочих поверхностей фрикционного контакта.

Нормальный закон распределения вероятностей пригоден для описания высоты микронеровностей поверхностей, у которых большая часть выступов имеет примерно одинаковую высоту, а большая часть впадин – примерно одинаковую глубину. Это наблюдается у шлифованных поверхностей, которые после изготовления прошли этап приработки (технологической обкатки), сопровождающийся смятием чрезмерно высоких выступов и заполнением глубоких впадин продуктами износа. Поэтому составить точное математическое описание высоты микронеровностей *новых поверхностей*, к тому же не подвергаемых шлифованию, с помощью нормального закона распределения вероятностей едва ли представляется возможным. Учёт изменения высоты микронеровностей во времени с помощью нормального закона будет достаточно сложной задачей, поскольку переменные, входящие в формулу (1), явно не связаны с временем. Только одна из известных числовых характеристик нормального закона распределения вероятностей – асимметрия – может в некоторой степени учитывать эффект приработки рабочих поверхностей ПК.

Применение бета-распределения для описания высоты микронеровностей поверхностей деталей машин стало возможным, благодаря использованию результатов статистических исследований профилеграмм поверхностей реальных изделий [4]. Несомненным достоинством математического описания высоты

микронеровностей с помощью бета-распределения является наличие большого объема справочных данных по значениям статистических коэффициентов этого распределения, учитывающих особенности механической обработки поверхностей деталей и точность обработки [5]. Областью применения данного распределения является математическое описание высоты микронеровностей рабочих поверхностей скользящих электрических контактов, на которых велика вероятность наличия выступов большой высоты (это характерно для новых поверхностей, не прошедших приработку).

Функция бета-распределения $\eta(h)$ высоты микронеровностей h рабочих поверхностей для отдельного фрикционного контакта в ПК может быть выражена формулой [4]:

$$\eta(h) = A_p / A_c = t_m \cdot h^\nu, \quad (5)$$

где t_m , ν – параметры функции распределения материала по высоте шероховатого слоя, определяемые путём обработки профилеграмм реальных поверхностей [4, 5];

A_p – суммарная площадь сечений выступов (микронеровностей) на высоте h ;

A_c – контурная площадь контакта рабочих поверхностей деталей подшипника (отдельного фрикционного контакта в нём).

Параметр ν выражается в виде [4]:

$$\nu = 2 \cdot t_m \cdot (R_p / R_a) - 1, \quad (6)$$

где R_p , R_a – значения приведённых параметров шероховатости (R_p – высота сглаживания, R_a – среднее арифметическое отклонение профиля).

Функция $\eta(h)$ характеризует вероятность того, что высота микронеровностей рабочих поверхностей не превышает значения h . При этом рассматривается контакт шероховатой поверхности с гладкой. Для учёта шероховатости обеих поверхностей фрикционного контакта в выражении (6) вводится понятие «приведённый параметр шероховатости» – параметр, образуемый сочетанием одноимённых параметров шероховатости двух поверхностей.

Переход от приведённых параметров шероховатости к параметрам шероховатости реальных поверхностей осуществляется по формулам [4]:

$$R_p = \sqrt{R_{p1}^2 + R_{p2}^2}; \quad R_a = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}. \quad (7)$$

Индексами 1 и 2 отмечены параметры шероховатости соответствующих поверхностей.

Есть мнение, что в случае математического описания высоты микронеровностей поверхностей деталей машин бета-распределение используется не как закон распределения вероятностей, а как некоторая функциональная зависимость, в структуру которой внедрены коэффициенты (t_m и ν), полученные при использовании методов математической статистики. Кроме того, справочные данные по коэффициентам данного распределения не содержат информации о характере изменения их значений во времени при

работе детали в изделии, что не позволяет аналитически учитывать приработку.

В основе распределения Найака лежит теория случайного поля, впервые предложенная для этой цели Линником и Хусу [6, 9]. Распределение Найака позволяет учесть эффект приработки поверхностей деталей путём представления коэффициента формы закона распределения в виде функции времени. В предельных случаях распределения Найака вырождается в распределение Рэлея (при наличии на поверхностях отдельных пиков большой высоты) и в нормальное

$$f(h_1) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & h_1 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot (2 \cdot \alpha - 3)}{\alpha^2}} \cdot \exp(-C_1 \cdot h_1^2) + \frac{3 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}{2 \cdot \alpha} \cdot (h_1^2 - 1) \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{3}{2 \cdot (2 \cdot \alpha - 3)}} \right) \right] \cdot \exp \left(-\frac{h_1^2}{2} \right) + \\ & + \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha}{3 \cdot (\alpha - 1)}} \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{2 \cdot (\alpha - 1) \cdot (2\alpha - 3)}} \right) \right] \cdot \exp \left(-\frac{\alpha \cdot h_1^2}{2 \cdot (\alpha - 1)} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$h_1 = \frac{h}{\sqrt{m_0}}; \quad \alpha = \frac{m_0 \cdot m_4}{m_2^2}, \quad \tilde{N}_1 = \frac{\alpha}{2 \cdot \alpha - 3}, \quad (9)$$

$$f_R(h_1) = \begin{cases} 0, & \text{при } h_1 < 0, \\ \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot [h_1^2 - 1 + \exp(-h_1^2)] \cdot \exp(-h_1^2), & \text{при } h_1 > 0; \end{cases} \quad f_G(h_1) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \cdot h_1^2 \right), \quad (10)$$

где h_1 – безразмерная высота микронеровностей;

α – параметр широкополосности профиля поверхности;

C_1 – коэффициент пропорциональности;

m_0, m_2, m_4 – моменты спектральной плотности высоты микронеровностей профиля поверхности.

Первый предельный случай: $\alpha = 1,5$. Это значение параметра широкополосности имеет место, если все волны поверхности имеют примерно одинаковую длину. Тогда вероятность существования на поверхности отдельных микронеровностей (пиков) большой высоты возрастает [6]. Известно, что такое состояние поверхностей характерно для новых, не приработанных деталей с большой площадью контакта (например, для рабочих поверхностей скользящих электрических контактов). В этом случае распределение Найака вырождается в распределение Рэлея $f_R(h_1)$, математическое описание которого составлено в виде выражения (10).

Второй предельный случай: $\alpha = \infty$. Это значение параметра α имеет место, если длина волны на поверхности может быть любой, что характерно для приработанных поверхностей деталей с малой площадью контакта (например, фрикционный контакт в шариковом подшипнике качения). Тогда распределение Найака вырождается в нормированное нормальное распределение $f_G(h_1)$, математическое описание которого составлено в виде выражения (10).

Таким образом, можно утверждать, что в процессе приработки параметр широкополосности α изменяется в пределах от 1,5 до ∞ . Тогда его можно представить в виде функции времени:

$$\alpha = 1,5 + k \cdot t, \quad (11)$$

где k – коэффициент пропорциональности;

распределение (при наличии пиков примерно одной высоты) [6].

Дифференциальная функция распределения высоты микронеровностей рабочих поверхностей для отдельного фрикционного контакта в ПК при использовании распределения Найака может быть выражена формулами (8) – (10) [6].

Параметр широкополосности профиля поверхностей α определяет вид дифференциальной функции распределения высоты микронеровностей рабочих поверхностей фрикционного контакта. Он изменяется в пределах от $\alpha = 1,5$ до $\alpha = \infty$. Рассмотрим оба предельных случая.

t – время эксплуатации поверхности (детали).

Задавая в выражении (8) параметр α в соответствии с выражением (11), можно получить функцию распределения $f(h)$ высоты микронеровностей рабочих поверхностей фрикционного контакта, вид которой изменяется во времени, соответствуя в начальный момент времени новым деталям, а в впоследствии – приработанным или изношенным.

Обобщая результаты анализа законов распределения вероятностей, пригодных для математического описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей деталей подшипника качения, отметим, что наибольшую точность математического моделирования этого фактора можно получить при использовании распределения Найака. Однако, это распределение представлено очень сложной функцией, работа с которой, очевидно, будет сопряжена с большими затратами времени и вычислительных ресурсов. Поэтому применение распределения Найака для математического описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей деталей ПК должно быть теоретически обосновано.

Методика выбора закона распределения

Для теоретического обоснования необходимости применения распределения Найака для описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей деталей ПК предложена методика выбора закона распределения (ЗР) высоты микронеровностей. Она позволяет провести анализ

точности математического описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей деталей ПК на определённой стадии их приработки при использовании нормального распределения и распределения Найака.

Методика выбора ЗР включает в себя *этапы*:

1) построение математической модели среднего сопротивления ПК как совокупности средних сопротивлений отдельных фрикционных контактов;

2) построение математической модели среднего электрического сопротивления отдельного фрикционного контакта в подшипнике с параметром средней высоты микронеровностей;

3) математическое моделирование средней высоты микронеровностей с помощью нормального распределения и распределения Найака;

4) расчёт среднего сопротивления отдельных фрикционных контактов и подшипника в целом для нормального распределения высоты микронеровностей и для распределения Найака;

5) оценка относительной погрешности математического моделирования среднего сопротивления ПК при описании высоты микронеровностей нормальным ЗР. При этом среднее сопротивление ПК, полученное при использовании распределения Найака, следует принять за действительное значение среднего сопротивления;

6) сопоставление относительной погрешности математического моделирования среднего сопротивления подшипника по данному фактору с заданной погрешностью диагностирования.

Если первая меньше последней в 3...5 и большее число раз, то можно утверждать, что эффект приработки в математической модели можно не учитывать, и для описания высоты микронеровностей пригоден нормальный ЗР вероятностей. В противном случае приработкой пренебрегать нельзя, а для описания высоты микронеровностей следует использовать распределение Найака с учётом выражения (7).

Выводы

Предложенная методика выбора ЗР высоты микронеровностей рабочих поверхностей деталей ПК позволяет обоснованно задать точность и сложность математической модели электрического сопротивления подшипника. При необходимости, эта методика позволяет учесть эффект приработки рабочих поверхностей ПК при математическом описании его электрического сопротивления.

Литература:

1 Подмастерьев К.В. Электрофлуктуационные методы комплексного диагностирования опор качения. – М.: Машиностроение-1, 2001. – С. 243.

2 Дунин-Барковский И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

3 Подмастерьев К.В. Исследование влияния макроотклонений дорожек качения колец на состояние смазки в подшипнике электрорезистивным методом / К.В. Подмастерьев, В.В. Мишин, В.В. Марков // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – № 5. – С. 546-553.

4 Демкин Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.

5 Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966. – 194 с.

6 Мышкин Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.

7 Кривошеин Ю.А. Определение информативных параметров контактирования трибосопряжений / Ю.А. Кривошеин, М.В. Виноградов // Управляющие и вычислительные комплексы в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. Саратов. гос. ун-та. – Саратов: Изд-во СГТУ. – 1999. – С. 47-49.

8 Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

9 Линник Ю.В. Математико-статистическое описание неровности профиля поверхности при шлифовании / Ю.В. Линник, А.П. Хусу. // Инж. сб. АН СССР. – №20. – 1954.

УДК 620.179.1.082.7:658.58

*Канд. техн. наук, доц. Мишин В.В., студ. Семёнов В.В.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НОВЫХ ПОДШИПНИКОВ ПОСЛЕ ПРИРАБОТКИ

Experimental research, which main aim is to find out defects in the structure of the bearings rolling, is show. Second aim is to find out differentias before and after extra earning of the bearings.

Новые подшипники, соответствующие всем требованиям входного контроля, устанавливаются в изделие, но подшипник, как объект диагностирования, является достаточно сложной многокомпонентной системой, содержащей большое количество деталей, совершающих сложные относительные перемещения при взаимодействии друг с другом. При этом характер взаимодействия отдельных деталей подшипника, определяющий его эксплуатационные характеристики, зависит от комплекса одновременно действующих факторов.

Факторы, характеризующие качество изготовления подшипника. При изготовлении деталей подшипника каждый размер выполняется по определенному полю допуска. Здесь так же нужно учитывать отклонения от правильной геометрической формы, расположения рабочих поверхностей, их микрогеометрии и свойствах материалов. Таким образом подшипник имеет индивидуальное сочетание действительных значений размеров и параметров, микрогеометрии рабочих поверхностей, свойств материалов, которые существенно влияют на свойства подшипника и определяют фактические значения их эксплуатационных показателей.

Факторы, характеризующие качество изготовления подшипникового узла. Во время установки подшипника в узел происходит изменение его геометрических параметров в местах посадки, что в свою очередь приводит к изменению условий его работы по сравнению с условиями сложившимися после сборки самого подшипника и может привести к выходу из строя не только самого подшипника, но и всего узла.

Факторы, характеризующие эффективность работы системы смазывания. Состояние подшипника при высоких скоростях и высокой нагрузке во многом зависит от свойств смазочного материала. Химический состав, его количество, наличие примесей и присадок, метод смазывания — перечисленные факторы оказывают непосредственное действие на эксплуатационные свойства подшипника и узла в целом.

Факторы, характеризующие режимы и условия работы подшипника. Сюда относят нагрузку, воспринимаемую подшипником, частоты вращения

колец и параметры окружающей среды, которые характеризуют условия эксплуатации.

Важен тот факт, что состояние подшипника не определяется каждой группой факторов в отдельности, а лишь комбинацией их действительных значений всех этих факторов. Предсказать эту комбинацию достоверно не представляется возможным, а значит наиболее действенным методом по борьбе с нежелательными эффектами является экспериментальное исследование и статистическая обработка информации, дающая достоверные сведения реального состояния подшипника.

После установки подшипника в узел изделие проходит технологическую обкатку, в процессе которой подшипники прирабатываются. Только после завершения приработки изделие вводится в эксплуатацию.

Для изучения изменения свойств подшипника и изучения свойств процесса приработки используется многофункциональная установка, обеспечивающая возможность моделирования макроотклонений дорожек качения колец подшипника, имитации конструктивных параметров и технологических погрешностей изготовления и сборки двухопорных подшипниковых узлов. Характеристики установки:

- диапазон моделирования отклонения от круглости дорожек качения колец – до 200 мкм;
- диапазон моделирования отклонения от соосности – до 300 мкм;
- диапазон моделирования натяга в сопряжении – до 100 мкм;
- основная погрешность задания деформации и смещения кольца подшипника – не более 2 мкм;
- диапазон регулирования радиальной нагрузки – 0...250 Н;
- погрешность задания нагрузки – не более 2%;
- диапазон регулирования частоты вращения вала – 0... 100 Гц.

Установка (рис. 1) представляет собой двухопорный узел с подшипниками. Одна опора неподвижно зафиксирована на основании, другая подвижна в плоскости, перпендикулярной оси вращения вала. Исследуемый подшипник служит одной из опор узла.

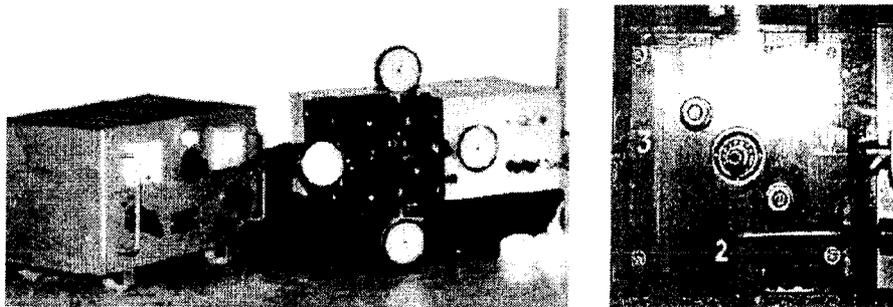


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

Для обеспечения оценки состояния подшипника электрическими методами установка снабжена токосъемным устройством, имеется устройство измерения и стабилизации частоты вращения вала.

В качестве измерительного оборудования при проведении экспериментальных исследований использовались универсальные серийно выпускаемые приборы и оригинальное диагностическое оборудование. Для адаптации к задачам проводимых экспериментальных исследований оно было снабжено каналом ввода данных с измерительного устройства в ЭВМ с целью последующей обработки измерительной информации в соответствии с требованиями алгоритмов диагностирования.

Методика проведения эксперимента.

- 1 Установить исследуемый подшипник в установку.
- 2 Нагрузить исследуемый подшипник (50 Н).
- 3 Изменением напряжения выбрать требуемую условиями эксплуатации частоту вращения.
- 4 Подключить систему сбора данных, фиксирующую значения параметра НИВ раз в секунду.

5 Прекратить приработку при установлении параметра НИВ = 0. Приработка должна вестись не менее 30 мин, даже при соблюдении первого условия.

В результате измерений параметра НИВ в процессе приработки подшипников качения получены диаграммы, показанные на рис. 2 – 6.

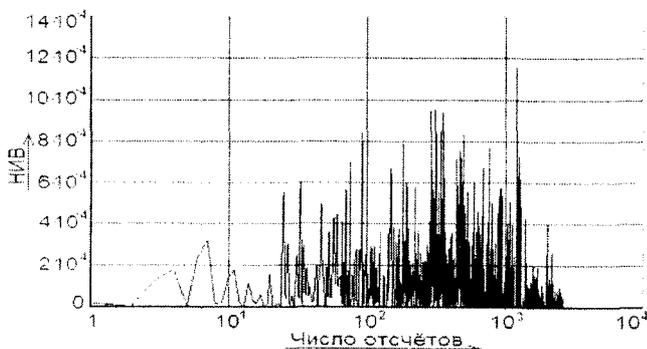


Рис. 2. Диаграмма приработки подшипника 1

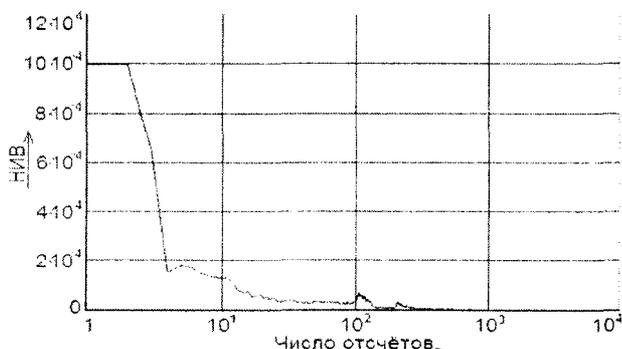


Рис. 3. Диаграмма приработки подшипника 2 (НИВ усреднён за 1 секунду)

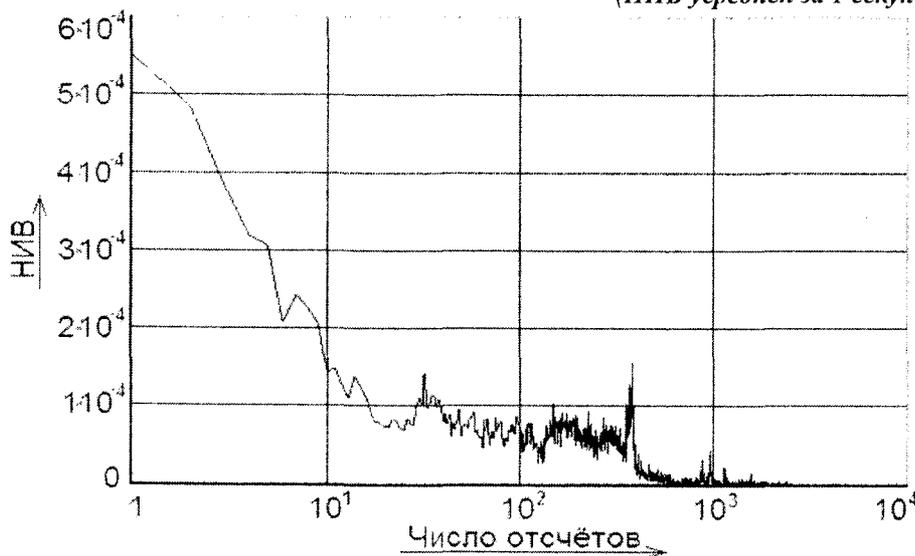


Рис. 4. Диаграмма приработки подшипника 3

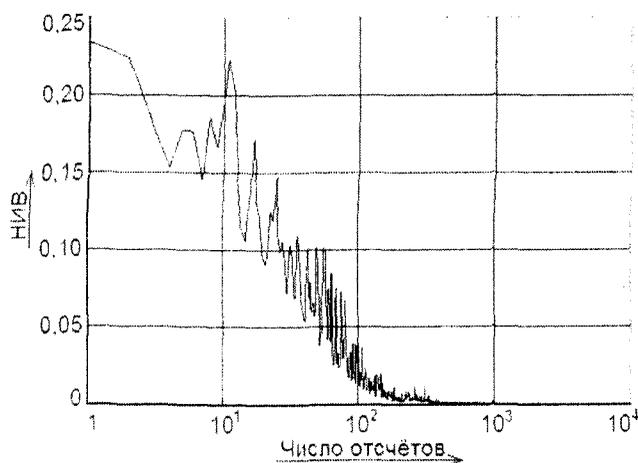


Рис. 5. Диаграмма приработки подшипника 4

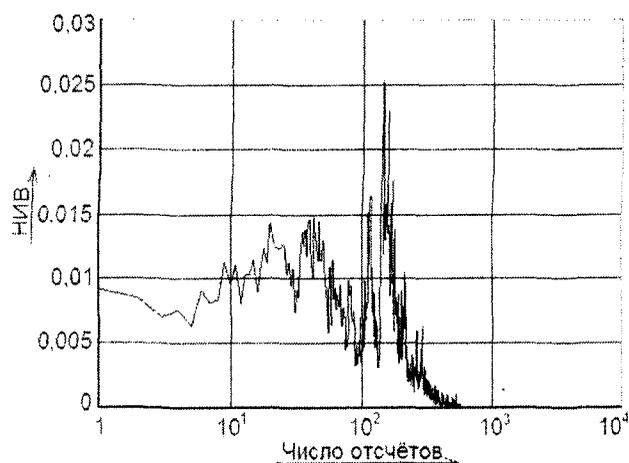


Рис. 6. Диаграмма приработки подшипника 5

При проведении экспериментов данная методика была успешно реализована. Экспериментально определено время, необходимое для приработки подшипников типа 6900 при нагрузке 50 Н – 40 мин.

На полученных в результате экспериментов диаграммах прирабатываемых подшипников явно выделяется участок, на котором проявляются микродефекты дорожек внутреннего и наружного колец. В начале экспериментов эти микродефекты сильно влияют на работу подшипника, а значит и на работу всего устройства, в котором будет установлен подшипник. В процессе приработки микродефекты дорожек качения постепенно устраняются, и их влияние уменьшается на несколько порядков, а в конце приработки стремится к нулю. Итогом приработки является значительное улучшение эксплуатационных работ подшипников. В результате приработки качество дорожек качения подшипника повышается и можно с уверенностью монтировать подшипники в узел механизма или машины, не опасаясь их преждевременного отказа.

Литература:

1 ГОСТ 18855-94. Подшипники качения. Динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс (долговечность). – Минск: – Изд-во стандартов, 1996. – 28 с.

2 Подмастерьев К.В. Диагностирование подшипников и подшипниковых узлов электрофлюктуационными методами // Элементы и приборы систем измерения и управления автоматизированных производств: Межвуз. сб. на-учн. тр. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1995. – Вып. 2.

3 Подмастерьев К.В. Выбор критерия комплексной оценки качества опор качения // Новое в теории точности и качества машин и приборов. – Вып. 6 / Институт проблем машиноведения РАН. – Препринт 132. – СПб, 1996.

4 Захаров М.Г. Метод и средство комплексного диагностирования опор качения // Инженерно – физические проблемы авиационной и космической техники / М.Г.Захаров, К.В. Подмастерьев. – Тез. докл. междунар. научн. техн. конф. – Егорьевск, 1995.

5 Подмастерьев К.В. Установка моделирования дефектов посадочных мест подшипников качения / К.В. Подмастерьев, В.В. Мишин // Сборник научных трудов. Том 5. – Орёл: ОрёлГТУ, 1995. – С. 86-92.

6 Патент 2110055 РФ, МПК⁷ G01 M1 3/04. Установка для исследования подшипников качения / К.В. Подмастерьев, В.В. Мишин. – Опубл. 27.04.98. Бюл. № 12.

Асп. Кузнецова Е.В.

(Орловский государственный технический университет)

Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ МНОЖЕСТВА ИСТОЧНИКОВ ТЕРМОЭДС НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ

In article is considered method of the natural thermocouple features at its use for instant temperatures in friction zone measuring. Research of influence simultaneous inclusion of set thermo-electromotive force many sources on measurement results of the maximal temperature in a friction zone.

В настоящее время единственным методом, позволяющим измерять максимальную температуру непосредственно в зоне трения реальных трибосопряжений, является метод естественной термопары. При использовании этого метода электродами естественной термопары являются сами элементы трибосопряжения, и температуру в зоне трения определяют по значению термоэлектродвижущей силы, генерируемой парой трения:

$$E = S_{12} \cdot (\Theta_2 - \Theta_1) = (S_1 - S_2) \cdot (\Theta_2 - \Theta_1), \quad (1)$$

где Θ_2 – температура в области контакта;

Θ_1 – температура тех точек элементов пары трения, в которых к ним присоединена внешняя цепь;

S_{12} – термоэлектрическая чувствительность (ТЭЧ) естественной термопары;

S_1 и S_2 – термоэлектрические способности работающих участков поверхности материалов трибосопряжения.

Термоэлектрическая способность (ТЭС) материала соответствует чувствительности термопары, составленной из этого материала и сверхпроводника.

Указанные выражения справедливы при однородности электродов термопары. Если электроды неоднородны, то в каждом из них возникает объёмная термоЭДС, определяемая выражением:

$$E = \int_0^l S_{(l)} \frac{d\Theta}{dl} dl, \quad (2)$$

где $S_{(l)}$ – текущее значение ТЭС материала электрода в рассматриваемой точке.

При этом уравнение (1) принимает вид:

$$E = S_{120}\Theta_2 - S_{12k}\Theta_1 + \int_0^{l_k} S_{1(l)} \frac{d\Theta}{dl} dl + \int_0^{l_k} S_{2(l)} \frac{d\Theta}{dl} dl,$$

где S_{120} и S_{12k} – разности ТЭС материала электродов в начальной ($l = 0$) и в конечной ($l = l_k$) точках;

$S_{1(l)}$ и $S_{2(l)}$ – текущее значение ТЭС материала электродов 1 и 2 в рассматриваемой точке.

Это выражение может быть преобразовано к виду (1), при выполнении условия, что переменные S_1 и S_2 – некоторые усреднённые значения ТЭС материалов электродов.

И хотя измерение температуры с помощью естественных термоэлектрических термометров стало широко распространённым, привычным и простым способом, эта простота является кажущейся и обеспечивается только при выполнении целого ряда различных условий. К источникам погрешности определения температур указанным методом можно отнести следующие: неоднородность термоэлектрических свойств термоэлектродов естественной термопары, неустойчивость и неодинаковость температур свободных концов термопары, кратковременность импульсов термоЭДС, а также многоточечность контакта трущихся тел. Нижеприведённый анализ посвящён исследованию влияния одновременного включения множества источников термоЭДС на результаты измерения максимальной температуры в зоне трения.

Контактирование трущихся поверхностей идёт одновременно в нескольких точках, образуя многоточечный контакт. В результате превращения механической энергии в тепловую, каждый из единичных микроконтактов нагревается. Тепловые потоки от нагретых микровыступов распространяются вглубь материалов и в области поверхностей, расположенными между контактирующими вершинами. По мере распространения потоков вглубь материала тепловое поле становится более равномерным. Градиент температуры вблизи вершин контактирующих микронеровностей достигает максимальных значений, а по мере углубления в материал уменьшается. Каждый единичный микроконтакт можно рассматривать как отдельный источник термоЭДС, имеющий внутреннее сопротивление. Поэтому эквивалентную схему включения источников термоЭДС в многоточечном контакте можно представить схемой, приведённой на рис. 1.

В соответствии с рисунком $E_{11}, E_{12} \dots E_{1n}$ и $E_{21}, E_{22} \dots E_{2n}$ представляют собой термоЭДС, генерируемые в цепях микровыступов соответственно

первой и второй контактирующих поверхностей пары грения:

$$E_{1i} = \int_0^h S_{1i} \frac{\partial \Theta}{\partial h} dh, \quad (3)$$

$$E_{2i} = \int_0^h S_{2i} \frac{\partial \Theta}{\partial h} dh, \quad (4)$$

где h – высота микровыступа.

E_1 и E_2 – термоЭДС, генерируемые за счет градиентов температурного поля в основной массе этих материалов, S_{1i} и S_{2i} – термоэлектрические способности материалов микровыступов. $R_{11}, R_{12} \dots R_{1n}$ и $R_{21}, R_{22} \dots R_{2n}$ – внутренние сопротивления отдельных источников термоЭДС. В подповерхностном слое за счет явления растекания тока и малого сопротивления материала в нем происходит выравнивание потенциала, и поэтому ниже расположенные слои на электрической схеме можно отобразить цепью, состоящей из одного генератора E_1 и E_2 и сопротивления R_1 и R_2 , соответствующие каждому материалу. $\Theta_1, \Theta_2 \dots \Theta_n$ – температуры единичных контактов, Θ_{10} и Θ_{20} – температуры на границе поверхностного слоя и основного материала каждого контртела, Θ_{oc} – температура окружающей среды.

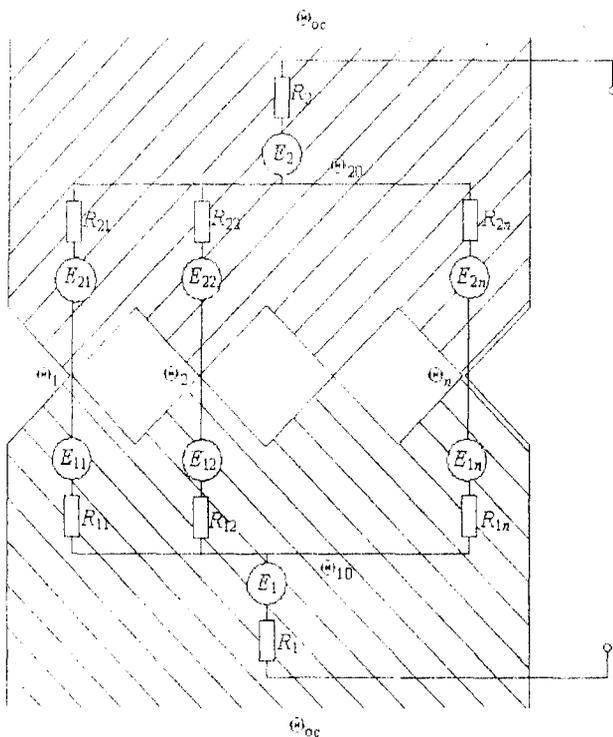


Рис. 1. Схема многоточечного контакта

Вследствие структурной, механической и физико-химической неоднородности поверхностных слоев материалов значения термоэлектрических способностей материалов каждой из контактирующих микронеровностей S_{1i} и S_{2i} отличается от аналогичных значений других пар контактирующих микронеровностей. Сопротивления электрической цепи каждого единичного микроконтакта R_{ki} равно: $R_{ki} = R_{1i} + R_{2i} + R_{ni}$, где R_{ni} – переходное сопротивление микроконтакта. Значения этих сопротивлений также отличаются друг от друга. Электрические цепи, образуемые парами контактирующих микронеровностей на рассматриваемом участке, соединены параллельно, поэтому общее напряжение, создаваемое всеми термоЭДС единичных контактов при разомкнутой внешней цепи составит:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{1i} - E_{2i}) R_{ki}}{\sum_{i=1}^n R_{ki}} \quad (5)$$

Полагая, что в пределах одной микронеровности ТЭС материала постоянно получаем:

$$E_{1i} = S_{1i}(\Theta_i - \Theta_{10}), \quad (6)$$

$$E_{2i} = S_{2i}(\Theta_i - \Theta_{20}). \quad (7)$$

Все входящие в выражения 5 – 7 величины являются случайными, значения которых расположены вблизи их средних значений:

$$S_{1i} = S_{1cp} + \Delta S_{1i} = S_{1cp}(1 + \delta_{S_{1i}});$$

$$S_{2i} = S_{2cp} + \Delta S_{2i} = S_{2cp}(1 + \delta_{S_{2i}});$$

$$\Theta_i = \Theta_{cp} + \Delta \Theta_i = \Theta_{cp}(1 + \delta_{\Theta_i});$$

$$R_{ki} = R_{kcp} + \Delta R_{ki} = R_{kcp}(1 + \delta_{R_{ki}});$$

Значения $\delta_{S_{1i}}, \delta_{S_{2i}}, \delta_{\Theta_i}, \delta_{R_{ki}}$ являются случайными центрированными величинами, малыми по сравнению с единицей.

С учетом написанных выражений:

$$U = \left[\sum_{i=1}^n \frac{S_{1cp}(1 + \delta_{S_{1i}})(\Theta_{cp}(1 + \delta_{\Theta_i}) - \Theta_{10}) - S_{2cp}(1 + \delta_{S_{2i}})(\Theta_{cp}(1 + \delta_{\Theta_i}) - \Theta_{20})}{R_{cp}(1 + \delta_{R_{ki}})} \right] / \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{cp}(1 + \delta_{R_{ki}})} \right] \quad (8)$$

Вынося постоянные множители $S_{1cp}, \Theta_{cp}, S_{2cp}, \Theta_{10}, \Theta_{20}$ и R_{cp} за знак суммы, раскладывая выражение $(1 + \delta_{R_{ki}})^{-1}$ в ряд и, пренебрегая в нем членами второго порядка и выше, получаем:

$$U = \frac{\left[S_{1cp} \Theta_{cp} \sum_{i=1}^n (1 + \delta_{S_{1i}} - \delta_R - \delta_{S_{1i}} \delta_R + \delta_{\Theta_i} + \delta_{S_{1i}} \delta_{\Theta_i} - \delta_R \delta_{\Theta_i} - \delta_{S_{1i}} \delta_R \delta_{\Theta_i}) - S_{1cp} \Theta_{10} \sum_{i=1}^n (1 + \delta_{S_{1i}} - \delta_R - \delta_{S_{1i}} \delta_R) - \right. \\ \left. - S_{2cp} \Theta_{cp} \sum_{i=1}^n (1 + \delta_{S_{2i}} - \delta_R - \delta_{S_{2i}} \delta_R + \delta_{\Theta_i} + \delta_{S_{2i}} \delta_{\Theta_i} - \delta_R \delta_{\Theta_i} - \delta_{S_{2i}} \delta_R \delta_{\Theta_i}) + S_{2cp} \Theta_{20} \sum_{i=1}^n (1 + \delta_{S_{2i}} - \delta_R - \delta_{S_{2i}} \delta_R) \right]}{\sum_{i=1}^n (1 - \delta_R)} \quad (9)$$

В знаменателе формулы $\sum_{i=1}^n \delta_R = 0$, как сумма разностей между рядом значений и их средним значением.

После перемножения скобок в числителе точно также $\sum_{i=1}^n \delta_{\Theta_i} = 0$, $\sum_{i=1}^n \delta_{S_{1i}} = 0$ и $\sum_{i=1}^n \delta_{S_{2i}} = 0$ и, пренебрегая малыми значениями сумм после перемножения $\delta_{S_{1i}} \delta_R \delta_{\Theta_i}$ и $\delta_{S_{2i}} \delta_R \delta_{\Theta_i}$, в результате получаем:

$$U = \frac{1}{n} \cdot (S_{1cp} \Theta_{cp} \sum_{i=1}^n (1 - \delta_{S_{1i}} \delta_R + \delta_{S_{1i}} \delta_{\Theta_i} - \delta_R \delta_{\Theta_i}) - S_{1cp} \Theta_{10} \sum_{i=1}^n (1 - \delta_{S_{1i}} \delta_R) - \\ - S_{2cp} \Theta_{cp} \sum_{i=1}^n (1 - \delta_{S_{2i}} \delta_R + \delta_{S_{2i}} \delta_{\Theta_i} - \delta_R \delta_{\Theta_i}) + S_{2cp} \Theta_{20} \sum_{i=1}^n (1 - \delta_{S_{2i}} \delta_R)) \quad (10)$$

В соответствии со справочными данными, приведенными в работе [1] для стали 45 ГОСТ 1050-90 можно утверждать, что между отклонениями температуры δ_{Θ} и отклонениями сопротивления δ_R существует функциональная зависимость, позволяющая говорить о том, что изменение отклонений сопротивления δ_R также изменяет термоЭДС, как $2,3 \delta_{\Theta}$. Аналогично можно говорить о том, что изменение отклонений ТЭС $\delta_{S_{1i}}$ и $\delta_{S_{2i}}$ также изменяет термоЭДС, как $1,4 \delta_{\Theta}$. Тогда выражение (10) принимает вид:

$$\delta U = \frac{\delta_{\Theta}^2}{n} \frac{[0,48 \Theta_{cp} (S_{1cp} - S_{2cp}) + 3,2 (S_{1cp} \Theta_{10} - S_{2cp} \Theta_{20})]}{\Theta_{cp} (S_{1cp} - S_{2cp}) - (S_{1cp} \Theta_{10} - S_{2cp} \Theta_{20})} \quad (13)$$

Рассмотрим случай, когда $\Theta_{10} = \Theta_{20}$, тогда

$$U_{cp} = (S_{1cp} - S_{2cp}) (\Theta_{cp} - \Theta_{10}),$$

$$\delta U = \frac{(S_{1cp} - S_{2cp}) (0,48 \Theta_{cp} + 3,2 \Theta_{10}) \delta_{\Theta}^2}{n (S_{1cp} - S_{2cp}) (\Theta_{cp} - \Theta_{10})} \quad (14)$$

При любых значениях величин, входящих в выражение (14), оно будет отрицательным. При невыполнении условия $\Theta_{10} = \Theta_{20}$ анализировать выражение (14) становится сложно. Но при трении тел, имеющих достаточно близкие по значению теплофизические характеристики можно говорить о том, что условие $\Theta_{10} = \Theta_{20}$ выполняется в некотором приближении.

Таким образом, можно предположить, что явление взаимного шунтирования электрических цепей, созданных парами контактирующих микронеровностей, несколько уменьшает измеряемое напряжение по сравнению с напряжением U_{cp} и таким образом уменьшает получаемое мгновенное значение температуры по сравнению с Θ_{cp} .

При подключении измерительного прибора к естественной термопаре возникает дополнительная термоЭДС, обусловленная градиентом температур в трущихся телах за счет разности температур Θ_{10} и Θ_{oc} , а также Θ_{20} и Θ_{oc} . За счет того, что указанные температуры не равны, а также того, что термоэлектрические свойства в объеме материала отличаются от них же в поверхностном слое возникает дополнительная термоЭДС:

$$U = \frac{1}{n} \cdot \left[(S_{1cp} \Theta_{cp} - S_{2cp} \Theta_{cp}) \sum_{i=1}^n (1 - 0,48 \delta_{\Theta_i}^2) - \right. \\ \left. - (S_{1cp} \Theta_{10} - S_{2cp} \Theta_{20}) \sum_{i=1}^n (1 + 3,22 \delta_{\Theta_i}^2) \right] \quad (11)$$

После преобразования выражение (11) принимает вид:

$$U = (S_{1cp} \Theta_{cp} - S_{2cp} \Theta_{cp}) - (S_{1cp} \Theta_{10} - S_{2cp} \Theta_{20}) - \frac{\delta_{\Theta}^2}{n} \times \\ \times [0,48 (S_{1cp} \Theta_{cp} - S_{2cp} \Theta_{cp}) + 3,2 (S_{1cp} \Theta_{10} - S_{2cp} \Theta_{20})] \quad (12)$$

В этом выражении:

$$U_{cp} = (S_{1cp} \Theta_{cp} - S_{2cp} \Theta_{cp}) - (S_{1cp} \Theta_{10} - S_{2cp} \Theta_{20}),$$

$$\delta U = \frac{[0,48 (S_{1cp} \Theta_{cp} - S_{2cp} \Theta_{cp}) + 3,2 (S_{1cp} \Theta_{10} - S_{2cp} \Theta_{20})] \delta_{\Theta}^2}{n}$$

Тогда относительная погрешность измерения мгновенных значений термоЭДС:

$$U = S_{10}(\Theta_{10} - \Theta_{oc}) \cdot S_{20}(\Theta_{20} - \Theta_{oc}),$$

где S_{10} и S_{20} – ТЭС материалов трибосопряжения в его объеме.

При принятом условии $\Theta_{10} = \Theta_{20}$ значение этой термоЭДС будет обусловлено только разностью ТЭС материалов трибосопряжения в его объеме.

УДК 53.082.62:536.5:621.891

*Канд. техн. наук, доц. Пахолкин Е.В., асп. Сидоров А.М.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru*

РАЗРАБОТКА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ТРИБОМОНИТОРИНГА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ С РЕСУРСНЫМ РЕЖИМОМ СМАЗКИ

The approach at the elaboration the diagnostically ensuring the bearing with the resources regime of wearing is offer. In the base of offered approach is being found the use of electrical methods of tribomonitoring. The initial theses for the elaboration the mathematical model are described.

Актуальность работы. Среди всей совокупности различных трибосопряжений можно выделить класс изделий, которые смазываются один раз перед началом эксплуатации. Для таких целей даже разработаны специальные типы смазочных материалов (СМ) [1], предназначенные именно для одноразовой закладки. Специфика их использования определила исходное требование к СМ: значительный ресурс.

Наиболее типовой пример рассматриваемых трибосопряжений – подшипники качения с ресурсным режимом смазывания и подшипники с закрытым сепаратором. Надежность таких подшипников и узлов в целом определяется правильностью выбора смазочного материала и его количеством для конкретных условий эксплуатации. Именно эти факторы определяют впоследствии режим смазки подшипника и его долговечность. Сказанное подтверждается данными, опубликованными на сайте фирмы SKF: неудовлетворительная смазка является причиной более 70 % отказов, а из потенциально предотвратимых видов отказов около 36 % происходят именно из-за смазки (это и неправильное смазывание, и неправильный выбор СМ).

Областями использования узлов трения с ресурсным режимом смазывания часто являются изделия с низкой ремонтпригодностью, изделия, диагностирование которых в процессе эксплуатации затруднено или нецелесообразно (например, узлы космической техники, где на первый план выходят показатели безотказности, а не ремонтпригодности). В таких условиях многие современные методы и

Эта дополнительная термоЭДС может, как повышать, так и уменьшать значение расчётной температуры.

Литература:

1. *Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – Москва: Атомиздат, 1976. – 1005 с.*

технические средства трибодиагностики становятся непригодными для создания диагностического обеспечения рассматриваемых объектов. Единственным способом обеспечения требуемого ресурса для узла трения и изделия в целом становится входной контроль узла трения или, что проще в реализации, устанавливаемого в узел подшипника. При этом мониторинг состояния подшипника с использованием физических методов трибодиагностики на этапе технологического прогона (обкатки) должен обеспечить получение информации, на основании которой принимается решение о целесообразности монтажа конкретного подшипника.

Сложность решения задачи в такой постановке заключается в том, что новый подшипник при отсутствии дефектов в большинстве случаев удовлетворяет критериям, существующим в рамках различных методов контроля: диагностические параметры и признаки находятся в установленных пределах. Таким образом, основу диагностического обеспечения могут составлять методы и средства, обеспечивающие необходимую чувствительность к физическим процессам, протекающим в смазанном фрикционном контакте, и дающие достоверную информацию о состоянии смазки.

Причины отказа СМ. Долговечность подшипников с ресурсным режимом смазывания определяется в большей степени не процессами изнашивания рабочих поверхностей его деталей, а скоростью протекания в зонах трения трибохимических реакций. Следствием трибопревращений СМ является его деструкция (старение), которая, в свою очередь, запускает разнообразные типы изнашивания или просто

приводит к заклиниванию. В конечном итоге происходит отказ подшипника, узла и изделия в целом.

Не смотря на то, что с каждым годом появляются все более и более совершенные СМ, обеспечить требуемый ресурс подшипника при одноразовой закладке СМ часто не удастся. Ресурс собственно подшипника качения при удовлетворительных условиях смазки должен достигать 10000 ... 80000 ч. [1], но при невозможности обновления СМ реальное значение ресурса существенно ниже указанного.

Процессам, приводящим к отказу СМ, посвящено много исследований [2 – 4]. При этом в работах описываются различные механизмы изменения эксплуатационных свойств СМ. В источнике [3] отмечаются следующие факторы, приводящие к ухудшению смазки: испарение, выдавливание смазки из зоны трения в зону резерва и дальнейший ее выброс за счет центробежных сил, растекание масла, окисление, термический распад (термодеструкция), трибохимические превращения. В работе [2] основное внимание уделяется «трибодиспергированию», которое сопровождается образованием твердых частиц. Физико-химические процессы, приводящие к такому явлению, рассматриваются более подробно, например, в работе [4]. В отдельных работах сделана попытка разделить (классифицировать) процессы деструкции СМ в зависимости от доминирующей причины или условий. Можно проследить появление терминов «Термодеструкция», «Механодеструкция», «Грибораспад», «Смолообразование», «Коксообразование» и др.

Не останавливаясь подробно на специфике каждого процесса, можно отметить основные условия старения СМ. С повышением температуры, давления в контакте трущихся тел, скорости вращения деталей трибосопряжения наблюдается пропорциональное увеличение скорости деструкции. При этом существуют дополнительные факторы, выступающие катализаторами процессов старения СМ. Например, переход к граничному трению деталей трибосопряжения, связанный с кратковременными микроконтактированиями локальных участков микрогеометрии, приводит к формированию атомно-чистой (ювенильной) поверхности металлов. Наличие таких микроучастков рабочих поверхностей фрикционного контакта приводит к активации процессов окисления углеводородов, входящих в базовую основу СМ.

Таким образом, при анализе старения СМ следует рассматривать сложный комплекс взаимосвязанных физических и химических явлений. Рассматривая ухудшение смазывающих свойств пластичных материалов, основное внимание следует уделять именно химическим превращениям. Окисление, термодеструкция и трибохимические реакции в конечном итоге приводят к изменению консистенции СМ, ограничивая возможность его поступления в зону трения из зон резерва.

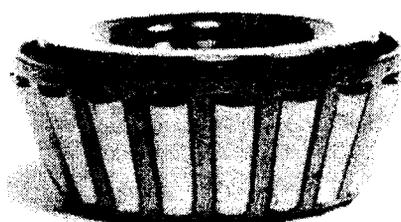
Рассмотренная схема деструкции СМ иллюстрируется рис. 1 [5]. Здесь показан подшипник, отказ которого произошел не по причине износа рабочих поверхностей деталей, а, по информации первоисточника, за счет ухудшения эксплуатационных свойств СМ (его «коксования»). Более того, промывка подшипника и обновление СМ обеспечивает его дальнейшую эксплуатацию.

Характер и скорость трибохимических реакций определяются большим числом факторов. Интенсивность процессов деструкции СМ зависит и от эксплуатационных свойств собственно СМ, и от материалов деталей трибосопряжения, и от качества рабочих поверхностей. Наконец, важнейшими взаимосвязанными факторами, определяющими долговечность СМ, являются режим смазки, контактные напряжения в зоне трения и относительная скорость движения сопрягаемых деталей. Данные факторы определяют объемную и, главным образом, поверхностную температуру в зоне трения. Известно [6], что время существования вспышки локальной температуры составляет $10^9 \dots 10^{13}$ с. При этом значение температуры может достигать 800...1000 °С [2]. Температурные условия, высокие локальные давления и вызванные ими сдвиговые деформации в совокупности влекут за собой разрыв химических связей, образование свободных радикалов и интенсивное протекание химических реакций.

Одним из условий для начала процессов деструкции СМ, таким образом, является формирование на трущейся поверхности источников тепла, количество и интенсивность которых определяется режимом смазки и скоростью контактных взаимодействий участков микрогеометрии шероховатых поверхностей.



а)



б)

Рис. 1. Отказ СМ: а) подшипник с продуктами деструкции СМ; б) тот же подшипник после промывки

Анализ способов решения проблемы.
Эксплуатация узлов трения с ресурсным режимом

смазывания, в основном, базируется на существующих рекомендациях по выбору типа и

необходимого количества СМ, причем последний фактор существенно влияет на режим трения: как недостаток, так и избыток СМ приводит к ухудшению режима смазки. В соответствии с данным подходом, например, в источнике [1] приведены справочные данные по характеристикам пластичных СМ и масел, описаны области их применения, температурные режимы эксплуатации. Также приводятся методики расчета количества СМ, закладываемого в подшипник, которое определяется относительной скоростью движения рабочих поверхностей, их площадью.

Анализ такого подхода позволяет сделать следующие *выводы*.

Во-первых, выбор количества СМ основан на критерии минимизации момента трения, который является не самым чувствительным диагностическим параметром. *Во-вторых*, рекомендуемые количества СМ явно являются лишь примерными, и, очевидно, не обеспечивают оптимальной смазки в каждом конкретном подшипнике и в индивидуальных режимах его эксплуатации. Последнее утверждение иллюстрируется рис. 2.

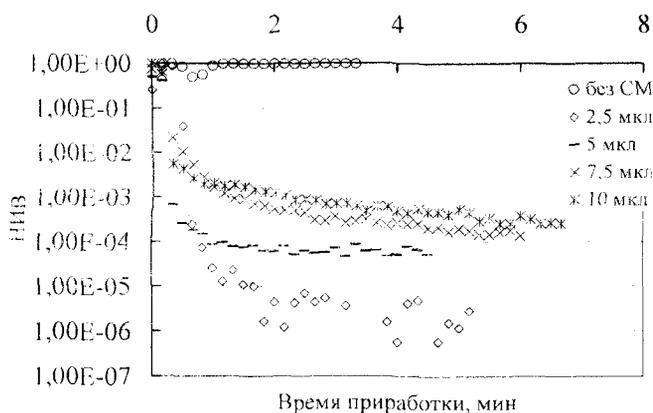


Рис. 2. Изменение диагностического параметра НИВ в процессе приработки подшипника типа 1000900 при различном объеме СМ

Таким образом, выбор СМ и его количества для подшипника, устанавливаемого в ответственное изделие, целесообразно осуществлять на основе предварительных экспериментальных исследований (мониторинга), а описанный формальный подход может не обеспечить оптимального режима смазки в подшипнике, что в итоге приведет к сокращению ресурса. Следует уточнить, что ресурсные испытания подшипников конкретного типа, например, с целью оптимизации количества и вида СМ не являются решением проблемы. В работе [8] отмечается, что такой подход является типовым: ресурс работы пластичной смазки в узлах трения (особенно в подшипниках качения) определяется экспериментально. В подшипник закладывается определенный объем СМ и проводятся испытания до наступления его отказа, что оценивается по таким признакам, как повышение коэффициента трения и интенсификация процесса изнашивания.

На рис. 2 показаны графики изменения диагностического параметра нормированное интегральное время (НИВ), который, являясь оценкой вероятности микроконтактирования в подшипнике [7], функционально определяется λ -параметром (соотношением толщины смазочного слоя в зоне трения и шероховатости рабочих поверхностей деталей трибосопряжения). Измерение параметра НИВ выполнялось в процессе приработки подшипника, каждый раз в одних и тех же режимах (частота вращения, температура окружающей среды, радиальная нагрузка). В качестве СМ использовалось моторное масло.

Наилучшие условия смазки были получены при объеме СМ 2,5 мкл ($2,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$) (уровень НИВ, оценивающий вероятность разрушения смазочного слоя, в данном случае минимальный и соответствует тенденции к жидкостному трению). На основе полученных результатов можно сделать вывод, что оптимальное дозирование СМ для реального подшипника представляется «ювелирной работой»: превышение объема масла всего лишь на 5 мкл, а это менее капли, может приводить к формированию не жидкостной, а смешанной смазки в установившемся режиме работы (рис. 3).

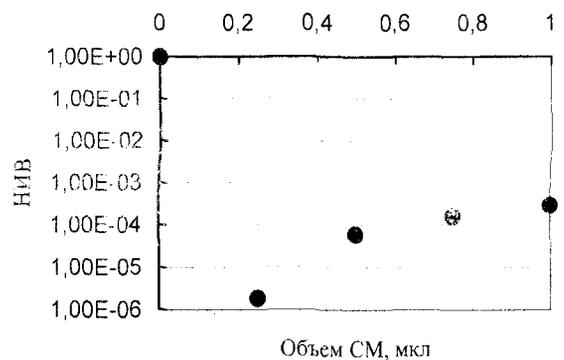


Рис. 3. Типовая зависимость параметра НИВ от объема СМ

Существенным недостатком такого подхода является обобщение единичных результатов испытаний на все подшипники данного типа. При этом известно, что при одинаковых условиях эксплуатации режимы смазки в подшипниках, взятых из одной партии, могут значительно отличаться [7].

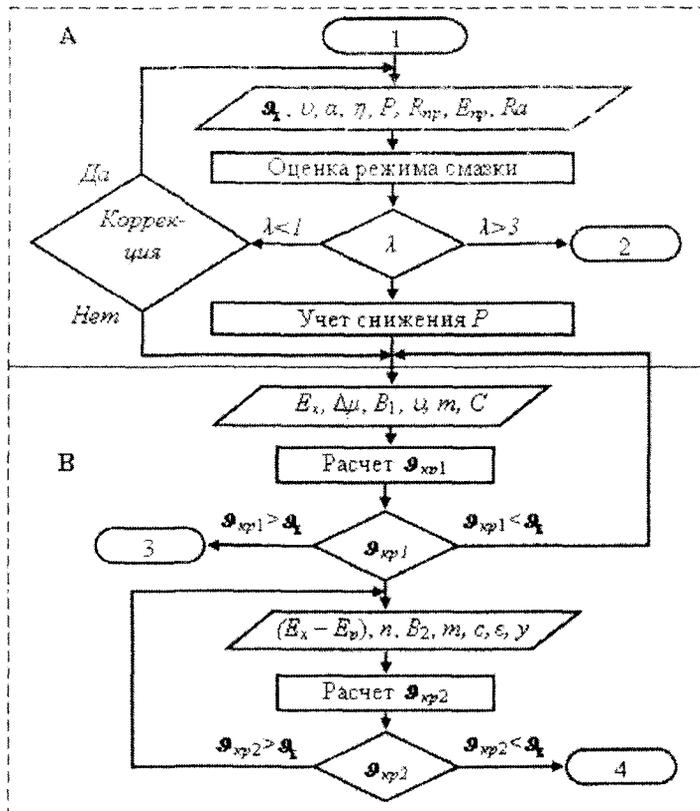
В источнике [8] также изложен более совершенный системный подход к проектированию узлов трения. Данный подход формализован алгоритмом, представленным на рис. 4, и оперирует следующими параметрами и характеристиками: ϑ_{Σ} – предельная эксплуатационная температура СМ; v – скорость относительного перемещения трущихся тел; α – пьезокоэффициент вязкости; η – вязкость СМ; $R_{кр}$ – приведенный радиус кривизны контактирующих тел; $E_{кр}$ – приведенный модуль упругости контактирующих тел; Ra – параметр

шероховатости контактирующих поверхностей; λ – относительная толщина смазочного слоя; P – полная нагрузка на номинальном контакте; E_x – энергия активации образования адгезионных связей; E_p – наблюдаемая энергия активации образования модифицированных слоев; n – наблюдаемый порядок процесса; $\Delta\mu$ – разность химических потенциалов ПАВ в граничном слое и в объеме смазочного материала; B_1, B_2, γ, m – эмпирические константы; C – концентрация активного компонента смазочного материала; $\mathcal{G}_{кр1}, \mathcal{G}_{кр2}$ – соответственно первая и вторая критические температуры СМ.

В соответствии с алгоритмом, в качестве начального критерия оценки работоспособности трибосопряжения является указанный выше λ -параметр, оцениваемый расчетным путем. На основании найденного значения λ определяется необходимость дальнейшей проверки по критерию температурной стойкости смазочного материала. В последнем случае используется блок математических моделей, позволяющий оценить повышение температуры в зоне трения в результате фрикционного взаимодействия деталей трибосопряжения.

Глубина научной проработки представленного алгоритма, обеспечивающего предотвращение ввода в эксплуатацию потенциально ненадежного

трибосопряжения, не вызывает сомнения. Однако, как и в предыдущем случае, данный подход представляется лишь оценочным и не учитывает целый комплекс факторов, которые не присутствуют в математических моделях, являющихся базой представленного алгоритма. Несоответствие реального режима смазки подшипника качения теоретическому прогнозу, выполненному в соответствии с рассматриваемой методикой, может возникать, например, при формировании макродефектов рабочих поверхностей, что является частым явлением при сборке узла. Смещение направления радиальной нагрузки на подшипник может привести к перекоосу колец и смещению дорожки качения. В подшипнике, не имеющем дефектов изготовления, они могут возникнуть в процессе транспортировки и хранения (например, фреттинг-коррозия или лунки ложного бринеллирования). Возникающие отклонения параметров и условий от идеальных, а также локальные и макродефекты не только не предусмотрены математическими моделями, но и трудно обнаружимы многими методами диагностирования. Наконец, математические модели, позволяющие рассчитать λ -параметр, не учитывают такой фактор, как количество СМ, который, как показано выше существенно влияет на формирование режима смазки.



А – оценка режима смазки; Б – проверка по температурному критерию; 1 – основные характеристики узла трения; 2 – обеспечение гидро- или эластогидродинамического режима смазки; 3 – обеспечение граничной смазки; 4 – обеспечение граничного режима смазки с образованием модифицированного слоя

Рис. 4. Алгоритм проверки качества смазки по предельной температуре работоспособности СМ

Предлагаемый подход. Принимая в качестве базового алгоритма диагностирования подшипника с ресурсным режимом смазки методику, показанную на рис. 4, предлагается ввести два основных изменения.

Во-первых, перейти к экспериментальной оценке режима смазки (оценке значения λ). Во-вторых, используя блок математических моделей, описывающих тепловыделение в зоне трения, ввести дополнительный блок, оценивающий скорость химических превращений в зависимости от интенсивности тепловыделений. Получая в результате теоретическую зависимость накопления продуктов деструкции СМ во времени, можно будет сделать вывод о целесообразности применения подшипника в ответственном узле трения. Таким образом, методика диагностирования должна базироваться на экспериментальном исследовании режима смазки и на теоретическом определении скорости старения СМ с использованием компиляционной модели, включающей следующие основные блоки: блок определения тепловыделений в зоне трения; блок, описывающий протекание химических реакций; блок, описывающий значение диагностического параметра.

Оценка тепловыделений может базироваться на существующих математических моделях, описывающих тепловые процессы в зонах трения. Например, в источнике [8] представлена такая модель, позволяющая оценивать температуру поверхности трения $\mathcal{G}_{\max cm}$ при стационарном (длительном) тепловом режиме для дискретного контактирования с использованием гипотезы суммирования температур:

$$\mathcal{G}_{\max cm} = \mathcal{G}_0 + \mathcal{G}_{cm}^* + \mathcal{G}_{\dot{cm}}, \quad (1)$$

где \mathcal{G}_0 – исходная температура элемента пары трения;

$\mathcal{G}_{\dot{cm}}^*$ – средняя температура номинальной (или контурной) поверхности трения;

$\mathcal{G}_{\dot{cm}}$ – температурная вспышка (скачок температуры при трении) на фактическом пятне контакта.

Основными уравнениями модели являются:

$$\mathcal{G}_{1,2}(\dot{z})_{\dot{m}} = \frac{f_0 P v_{\dot{m}}}{A_{m,2} (\lambda_1 m_1 + \lambda_2 m_2)} e^{z m_{1,2}} + \mathcal{G}_0; \quad (2)$$

$$\mathcal{G}_{1,2}^*(\dot{z})_{\dot{m}} = \frac{f_0 P v_{\dot{m}}}{A_{m,2} (\lambda_1 m_1 + \lambda_2 m_2)} + \mathcal{G}_0, \quad (3)$$

$$\mathcal{G}_{\dot{cm}} = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \frac{W_{\dot{m}} \tau_N d_r a_1^{0.5}}{A_r t_0 (4 \lambda_2 a_1^{0.5} + \lambda_1 (\pi d_r v_{\dot{m}})^{0.5})}, \quad (4)$$

В формулах (2-4) использованы условные обозначения: f_m – коэффициент трения между

элементами пары; P – полная нагрузка на номинальном контакте; $v_{ск}$ – скорость скольжения; $A_{a1,2}$ – номинальная площадь контакта соответственно элемента 1 или 2; λ_1, λ_2 – величина характеризующая отношение толщины смазочного слоя к характеристике высоты микронеровностей, соответственно, деталей 1 и 2 трибосопрежения; m_1, m_2 – коэффициенты характеризующие теплопроводность и теплопередачу в стационарном режиме; $W_{тр}$ – полная работа трения за время; τ_N – временной фактор мощности; d_r – среднестатистический размер пятна контакта; a_1 – теплопроводность материала; A_r – фактическая площадь контакта.

Таким образом, к параметрам рассмотренного блока математической модели относятся характеристики фрикционного контакта и режима смазки, которые, в свою очередь, также присутствуют в блоке модели, описывающем электрические диагностические параметры.

В качестве примера приведем модель НИВ для деталей подшипника [7]. Если режим смазки не является жидкостным, то в качестве диагностического параметра можно использовать параметр K (значение НИВ), описываемый выражениями:

$$K = 1 - \frac{1}{T} \int_0^T \prod_0^Z (1 - P_{ii}(t) P_{ai}(t) dt), \quad (5)$$

$$P_{i(a)i}(t) = 1 - (1 - P_{i(a)i})^{n_{i(a)i}}, \quad (6)$$

$$P_{i(a)i}(t) = 0,5 - \Phi \left(h_{0cp} / \sqrt{R_{qt}^2 + R_{qk}^2} \right) = 0,5 - \Phi(\lambda_i), \quad (7)$$

В формулах (5-7) использованы следующие условные обозначения: T – время измерения НИВ; Z – число тел качения в подшипнике; t – время; $P_{н(в)i}$ – вероятность контактирования наружного (внутреннего) кольца с i -м телом качения (одна из них – условная); $n_{н(в)i}$ – количество микронеровностей, по которым может произойти контактирование; $P_{н(в)i}$ – вероятность контактирования пары противоположащих микронеровностей, является функцией толщины смазочного слоя и качества поверхности; h_{0cp} – средняя толщина смазочного слоя в зоне трения; R_{qt}, R_{qk} – средние квадратические отклонения профилей поверхностей, соответственно, тела качения и кольца; $\Phi(\lambda_0)$ – интегральная функция нормированного нормального распределения.

Из приведенных выражений видно, что параметр НИВ полностью определяется параметром λ , который, в свою очередь, входит в выражения (5) – (7).

В работе [7] также описан подход к оценке режима смазки по электрическому сопротивлению смазочного слоя подшипника. При этом параметры, характеризующие фактическую площадь контакта, являются определяющими для сопротивления смазочного слоя.

Моделирование скорости химических реакций и временной зависимости накопления продуктов старения СМ представляется сложной задачей, очевидно, не решаемой в полной мере и не рассматриваемой в данной работе. Тем не менее, предпосылки для получения положительного результата по разработке требуемых математических моделей, пригодных для теоретической оценки скорости старения СМ, существуют. В этом плане можно сослаться на работы [9, 10, 11], в которых приводятся подходы к описанию основных физических и химических процессов старения, даются рекомендации по оценке скорости реакций. Известны также и методы экспериментальных исследований совокупности рассматриваемых процессов (методы оценки температуры в зоне трения, методы анализа изменения химического состава и эксплуатационных свойств СМ). Таким образом, вероятность положительного решения рассмотренной задачи следует рассматривать как высокую.

Разработка метода мониторинга узлов трения с ресурсным режимом смазывания открывает потенциально новые области применения электрорезистивных методов трибодиагностики: входной контроль новых подшипников с ресурсным режимом смазки до установки их в изделие; мониторинг прикатки подшипников; оптимизация количества СМ и условий работы подшипника; трибоиспытания пластичных СМ.

Литература:

1 Волков Л.К. Приборные шариковые подшипники: Справочник / Л.К. Волков, Г.А. Веркович, В.А. Голубков и др.; Под ред. К.Н. Явленского. – М.: Машиностроение, 1981. – 351 с.

2 Мельников В.Г. Работоспособность и кинетические закономерности трибохимических превращений пластичных смазок в зоне трения качения // Трение и износ, 2005. – Том 26, № 1. – С. 58-73.

3 Климов К.И. Антифрикционные пластичные смазки. – М.: Химия, 1988.

4 Маркова Л.В. Методы и средства диагностики рабочих свойств смазочного материала / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин и др. // Трение и износ, 2003. – Том 24, № 5. – С. 523-533.

5 WWW.bgprod.ru/posle/results/obsluzhivanie-transmissii [Электронный ресурс].

6 Мышкин Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.

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

8 Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

9 Венцель С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Химия, 1979. – 270 с.

10 Теоретические основы химмотологии / Под. ред. А.А. Браткова. – М.: Химия, 1985. – 320 с.

11 Сычев С.Н. Теоретическое обоснование контроля моторных масел электрическим методом (по значению диэлектрической проницаемости) / С.Н. Сычев, К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 12.

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

УДК 631.3-235-036

Канд. техн. наук, доц. *Молчанов В.И., канд. техн. наук, доц. **Афонин А.Н.

(Орловский государственный технический университет)

Россия, г. Орел, тел. *(4862)761754, **(4862)541503; E-mail: *Grafikal@orelsau.orel.ru, **af@au.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗГИБА КАПРОЛОНОВЫХ ЗУБЬЕВ ЧЕРВЯЧНЫХ КОЛЕС

Results of simulation of the intense-deformed condition gear worm sprockets from kaprolon are resulted at their interaction with a metal worm. The received performances with satisfactory exactitude coincide with experimental data at trials metal polymeric worm gears in laboratory and industrial conditions.

Применение зубчатых и червячных колес из полимерных материалов вместо металлических является одним из наиболее перспективных направлений совершенствования зубчатых и червячных передач. Однако, поскольку по прочностным свойствам полимеры уступают металлам, расширение области применения полимерных материалов требует усовершенствования известных методик прочностных расчётов.

воздействием окружающей среды, в частности к металлополимерным червячным передачам с колесами из капролона.

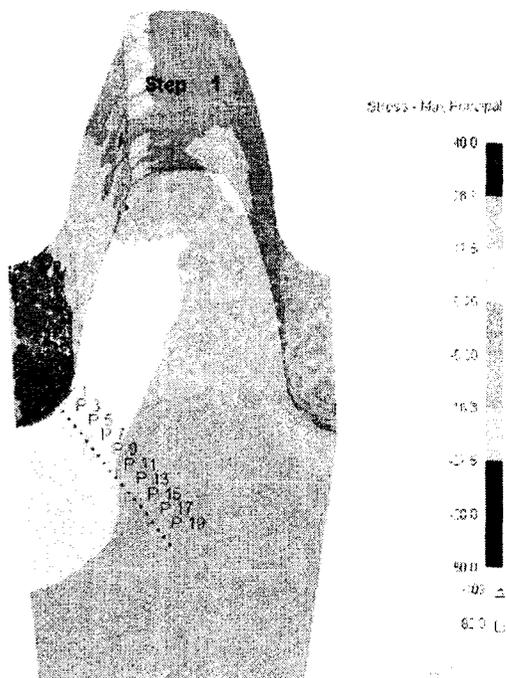
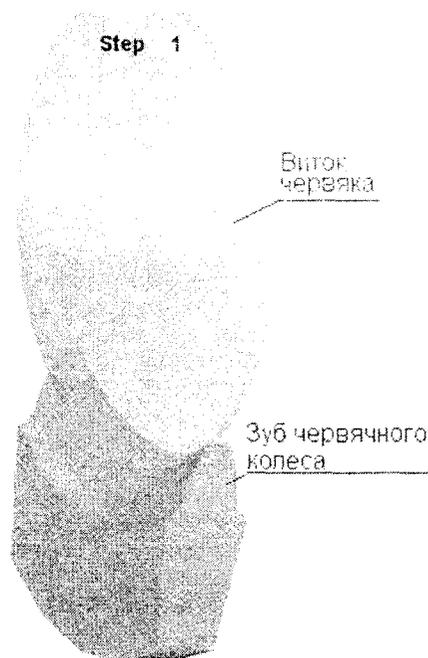


Рис. 1. 3D модель процесса зацепления витка червяка с зубом червячного колеса

В настоящее время не существует единой теории прочности полимеров, а количество достоверных методик расчета характеристик ограничено сравнительно небольшим числом испытанных реальных материалов. Указанное обстоятельство связано с обширной номенклатурой изделий из полимеров, спецификой их структуры, свойств и условий эксплуатации. Это относится в первую очередь к полимерам, работающим наряду с металлами в условиях циклических нагрузок и под

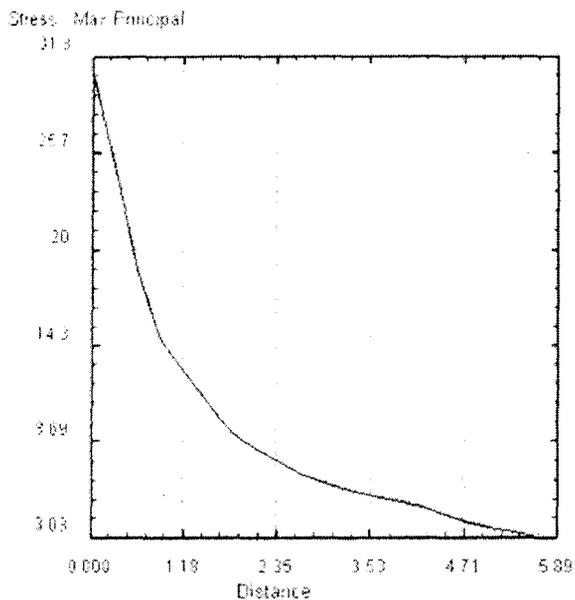
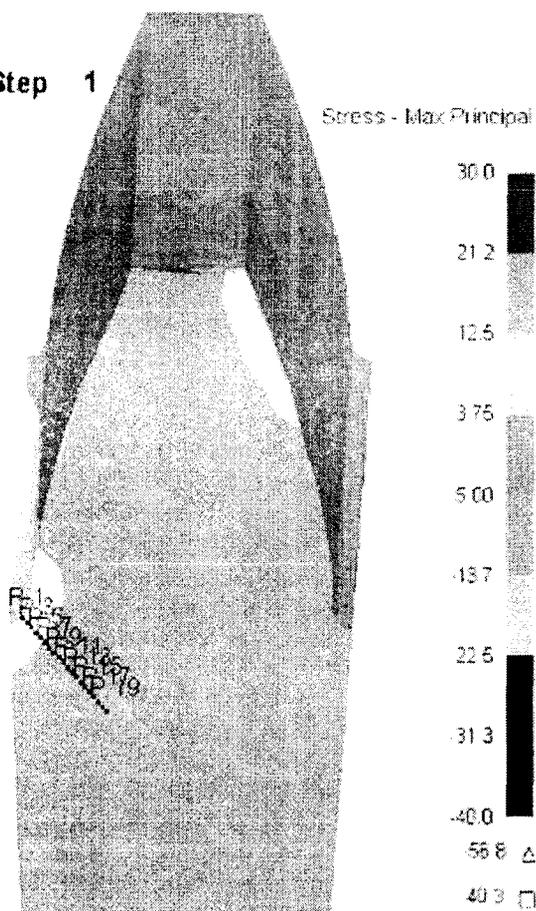
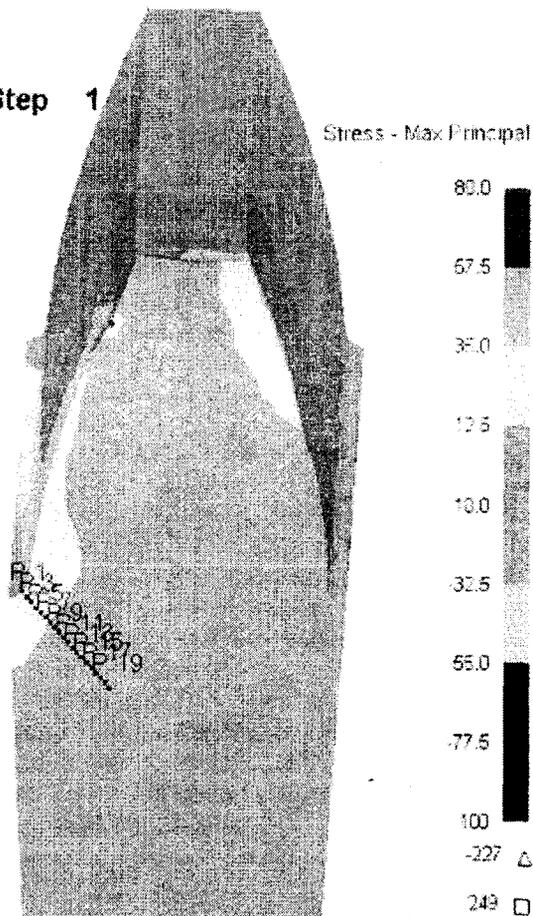


Рис. 2. Распределение напряжений изгиба по основанию капролового зуба червячного колеса с модулем $m=3,5$ мм при нагрузке $F=1290$ Н

Step 1



Step 1



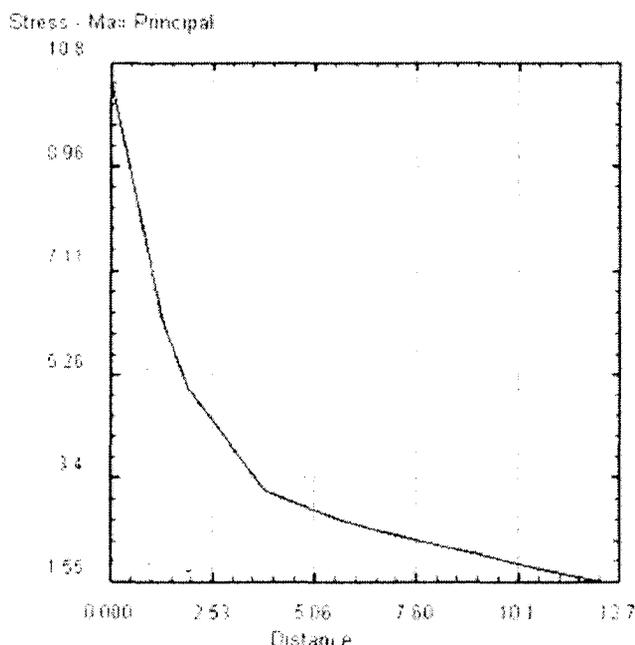


Рис. 3. Распределение напряжений изгиба по основанию капролонового зуба червячного колеса с модулем $m=14$ мм при нагрузке $F=2,5$ кН

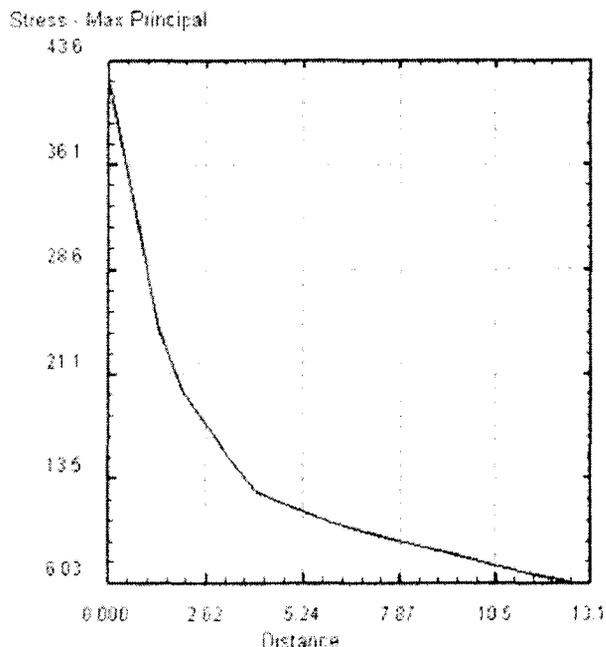


Рис. 4. Распределение напряжений изгиба по основанию капролонового зуба червячного колеса с модулем $m=14$ мм при нагрузке $F=10$ кН

В силу сложных геометрии и характера нагружения полимерных зубьев червячных колес, специфики материала, задача создания методик прочностного расчёта передач данного типа считается одной из самых сложных в механике деформируемого твердого тела. В частности, для определения напряжений изгиба зуб червячного колеса необходимо рассматривать как толстую плиту на упругом основании, подверженную действию консольной нагрузки. Эта задача на сегодняшний день не имеет точного аналитического решения.

В связи с этим представляется целесообразным использовать для исследования напряженно-деформированного состояния капролоновых зубьев червячных колес современные численные методы, а именно, получивший в последнее время широкое распространение, метод конечных элементов (МКЭ).

Авторами произведено моделирование с помощью МКЭ процесса взаимодействия стального витка червяка с зубом червячного колеса из капролона (рис. 1), аналогичного контакту витков в передаче винт-гайка, для различных типоразмеров червячных передач. Для моделирования использована САЕ система DEFORM 3D (США), временная лицензия на которую была предоставлена ОрёлГТУ российским распространителем данного программного продукта – ООО ТЕСИС (г. Москва). DEFORM 3D является одним из мировых лидеров в области моделирования значительных упругих и пластических деформаций с помощью МКЭ и позволяет смоделировать сложный трехмерный процесс зацепления при значительных упругих деформациях зуба капролонового колеса.

3D модели витка червяка и зуба червячного колеса создавались в лицензионной версии отечественной системы T-Flex CAD 3D версии 7.2 и экспортировались в DEFORM 3D через формат

файлов для стереолитографии (stl). Поскольку модуль упругости стали ($2 \cdot 10^5$ МПа) многократно превышает модуль упругости капролона, при моделировании виток червяка принимался абсолютно жестким телом. Капролоновый зуб червячного колеса принимался упругим телом с модулем упругости 2200 МПа и коэффициентом Пуассона 0,4. На месте отрезанных частей червячного колеса к модели зуба прикладывались компенсирующие их граничные условия – запрет на перемещение, перпендикулярные к плоскости разреза. Моделирование производилось для наиболее опасной ситуации, – когда виток червяка воздействует на вершину зуба колеса. Количество конечных элементов выбиралось исходя из того, чтобы максимальная длина стороны элемента не превышала 0,5 мм. В местах предполагаемой концентрации напряжений сетка сгущалась с использованием окон плотности.

Величина сил, действующих на зуб червячного колеса со стороны витка червяка, определялась исходя из условий работы реальных передач.

На рис. 2, 3 и 4 приведено распределение напряжений в основаниях зубьев со стороны растяжения, приводящих к распространению магистральных трещин и поломке зубьев, в нормальных к оси червячного колеса сечениях, расположенных по центру зуба.

Полученные поля напряжений хорошо совпадают с результатами экспериментальных исследований [1, 2]. Сравнение результатов расчета и эксперимента дает различие не более 7%. Следовательно, при проектных и проверочных расчетах червячных колес с капролоновыми зубьями целесообразно использовать современные САЕ системы, основанные на МКЭ, в частности систему DEFORM 3D. Высокая точность расчетов позволит определять рациональные размеры

червячных колес, обеспечивающие требуемую статическую и усталостную прочность передач.

Литература:

1 Молчанов В.И. Экспериментальное исследование напряжений изгиба зубьев пластмассовых червячных колес / В.И. Молчанов,

В.П. Нетребко, А.С. Яковлев // Детали машин: Сборник. – Киев: Техника, 1980. – Вып. 31. – С. 26-29.

2 Молчанов В.И. Проектирование червячных передач с колесами из неметаллических материалов: Учебное пособие / В.И. Молчанов. – Орел: ОрёлГАУ, 2006. – 38 с.

УДК 621.914.15

Асп. Сухарский И.Н., д-р. техн. наук, проф. Тарапанов А.С., канд. техн. наук Полохин О.В., канд. техн. наук Гордиенко А.П., асп. Алымов А.В. (Орловский государственный технический университет) Россия, г. Орел, тел. (4862)416733; E-mail: tmsi@ostu.ru

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЧЕРВЯЧНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

The system analysis of process of deriving of worm gear meshes. The peculiarity of system analysis is be logical grounded of approach for the researcher the problems and the use of methods their decision.

Целью применения системного анализа к процессу получения червячных зубчатых колес, является повышение степени обоснованности принимаемого решения, расширение множества вариантов, среди которых производится выбор, с одновременным указанием способов отбрасывания заведомо уступающих другим. Системный анализ характеризуется главным образом упорядоченным, логически обоснованным подходом к исследованию проблем и использованию обусловленных методов их решения.

Процесс получения червячных зубчатых колес включает:

1) проверку на технологичность конструкции червячного колеса;

2) составление технологии производства червячного колеса;

3) получение технологической документации;

4) оценку обрабатывающий колесо инструмент;

4.1) выбор стандартного инструмента;

4.2) конструирование инструмента, при необходимости;

4.3) проверка инструмента на соответствие параметрам конструкторского чертежа;

5) лезвийную обработку червячного колеса;

5.1) выбор приемлемых кинематических параметров изготовления червячного колеса;

5.2) выбор приемлемых сил резания;

5.3) выбор приемлемых параметров качества изготовления колеса.

Лезвийная обработка червячного колеса является самым трудоемким этапом, и поэтому одним из основных подходов, определяющих возможность дальнейшего повышения производительности при обработке червячных колес, является оптимизация схемы резания, а также разработка методики управлением процессом

резания червячных колес, позволяющей прогнозировать качество и точность червячных колес.

При определении зависимостей, отображающих процесс формообразования, было сделано следующее допущение: заготовка неподвижна, а начало координат расположено в её центре таким образом, чтобы ось ОУ совпала с осью симметрии одной из впадин зуба (рис. 1, а). При неподвижной заготовке все необходимые для формообразования впадины движения совершает инструмент. Обкат происходит по делительной окружности червячного колеса без скольжения.

В данных зависимостях были приняты следующие условные обозначения: ψ – угол между осью ОУ и линией, проходящей через середину зуба инструмента, обрабатывающего данную впадину колеса в любом его положении; ϕ – угол поворота фрезы в плоскости YZ; Δh – параметр режущей кромки.

В общем виде математическое отображение схемы резания можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}x &= f(\psi; \phi; \Delta h); \\y &= f(\psi; \phi; \Delta h); \\z &= f(\psi; \phi; \Delta h),\end{aligned}\tag{1}$$

где x, y, z – координаты точки режущего лезвия инструмента в процессе резания.

Для случая обработки червячного колеса червячной фрезой математическое отображение схемы резания имеет вид:

$$x = \frac{(r_1 \pm \Delta h + S_p) \sin(\psi) - \left((r_1 + S_p) \psi \pm \frac{\pi n}{4} \pm \Delta h \operatorname{tg}(\alpha_0) \right) \cos(\psi)}{\cos(\varphi)}$$

$$y = \frac{\left((r_1 \pm \Delta h + S_p) \cos(\psi) + \left((r_1 + S_p) \psi \pm \frac{\pi n}{4} \pm \Delta h \operatorname{tg}(\alpha_0) \right) \sin(\psi) \right)}{\cos(\varphi)}; \quad (2)$$

$$z = \left((a_0 - r_1 - S_p) \mp \Delta h \right) \sin(\varphi).$$

где α_0 – межосевое расстояние;
 ΔS_p – радиальная подача;
 r_1 – радиус делительной окружности.

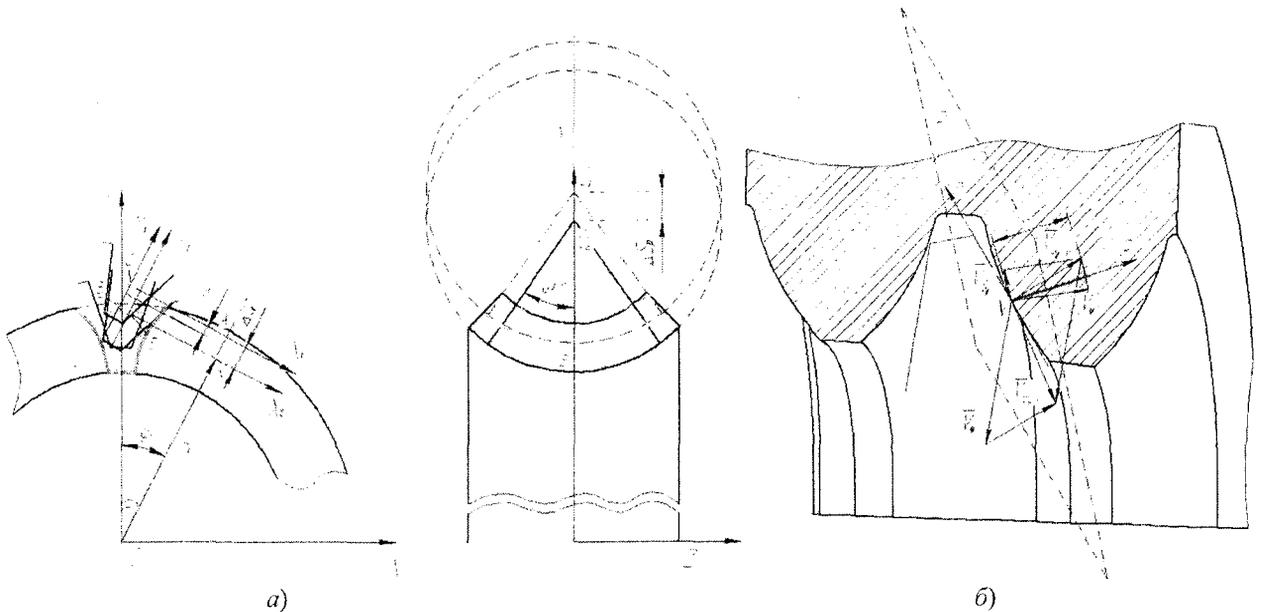


Рис. 1. Кинематические параметры процесса обработки червячных колес фрезой червячной: а) схема формообразования впадины зуба червячного колеса фрезой червячной; б) схема определения толщины слоя, срезаемого при обработке червячного колеса инструментом червячного типа

Предложенное математическое выражение (2) может включать профиль любого инструмента червячного типа и его движения в процессе формообразования, а также установить связь между параметрами скорости, подачи и параметром режущей кромки, произвести расчеты характеристик процесса резания на основе использования аппарата дифференциальной геометрии.

Для расчета кинематического изменения заднего угла, переднего угла и толщины срезаемого слоя определяются частные производные уравнения (2) по параметрам движения резания, движения подачи и параметру режущей кромки.

Кинематическое изменение заднего угла в направлении наибольшего перемещения по подаче можно определить по формуле:

$$\Delta \alpha = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\sqrt{X_{\psi}^2 + Y_{\psi}^2 + Z_{\psi}^2}}{\sqrt{X_{\varphi}^2 + Y_{\varphi}^2 + Z_{\varphi}^2}} \right\}. \quad (3)$$

Кинематическое изменение переднего угла γ определяется по формуле:

$$\Delta \gamma = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{a}{\sqrt{X_{\varphi}^2 + Y_{\varphi}^2 + Z_{\varphi}^2}} \right\}. \quad (4)$$

Вектор скорости (рис. 1, б) перемещения в направлении движения подачи и в направлении движения резания определяется в соответствии с [1].

$\left| \vec{V}_{S_p} \right|$ – вектор скорости перемещения в направлении движения радиальной подачи, определяемый из следующего выражения:

$$\vec{V}_{S_p} = \left(\frac{\partial x}{\partial S_p} \frac{\partial S_p}{\partial \tau} V_x; \frac{\partial y}{\partial S_p} \frac{\partial S_p}{\partial \tau} V_y; \frac{\partial z}{\partial S_p} \frac{\partial S_p}{\partial \tau} V_z \right), \quad (5)$$

где τ – время.

Для вычисления толщины срезаемого слоя необходимо получить уравнение плоскости p , касательной к поверхности резания в точке N . Эта плоскость определяется тремя векторами [1].

Вектор \vec{a} , в направлении которого измеряется толщина срезаемого слоя, должен быть перпендикулярен к плоскости p в точке N :

$$\vec{a} = (Y_{\text{сум}} Z_n - Z_{\text{сум}} Y_n) + (Z_{\text{сум}} X_n - X_{\text{сум}} Z_n) + (X_{\text{сум}} Y_n - Y_{\text{сум}} X_n). \quad (6)$$

Спроектировав на направление вектора \vec{a} вектор \vec{V}_{ψ} , получим толщину срезаемого слоя:

$$a = \frac{(Y_{\text{сум}} Z_{\text{п}} - Z_{\text{сум}} Y_{\text{п}}) \cdot X_{\psi} + (Z_{\text{сум}} X_{\text{п}} - X_{\text{сум}} Z_{\text{п}}) \cdot Y_{\psi} + (X_{\text{сум}} Y_{\text{п}} - Y_{\text{сум}} X_{\text{п}}) \cdot Z_{\psi}}{\sqrt{(Y_{\text{сум}} Z_{\text{п}} - Z_{\text{сум}} Y_{\text{п}})^2 + (Z_{\text{сум}} X_{\text{п}} - X_{\text{сум}} Z_{\text{п}})^2 + (X_{\text{сум}} Y_{\text{п}} - Y_{\text{сум}} X_{\text{п}})^2}} \quad (7)$$

Для универсального изучения сил, возникающих при нарезании червячных колес, будем использовать методику, представленную в работе [1].

Вначале производится расчет удельных сил.

В диапазоне толщин срезаемого слоя от 0,01 до 0,5 мм, передних углов – от -0,0175 рад до 0,0349 рад и задних углов – от $0,873 \cdot 10^{-2}$ рад до 0,0524 рад:

$$\Delta P_z = (1,7 \cdot 10^{-2} a^{0,9} + 4,3 - 9(\gamma + \Delta\gamma)) \cdot (\alpha - \Delta\alpha)^{-0,07} 9,8 K_{Pz};$$

$$\Delta P_y = (0,44 \cdot 10^{-2} a^{0,95} + 1,4 - 3,4(\gamma + \Delta\gamma)) \cdot (\alpha - \Delta\alpha)^{-0,2} 9,8 K_{Py},$$

где: a – толщина срезаемого слоя;

γ – передний угол инструмента;

$\Delta\gamma$ – кинематическое изменение переднего угла;

α – задний угол инструмента;

$\Delta\alpha$ – кинематическое изменение заднего угла;

K_{Pz} и K_{Py} – обобщенные поправочные коэффициенты (равны произведению коэффициентов K_M , $K_{\text{сож}}$, K_h и K_V , учитывающих влияние следующих факторов: K_M – материала; $K_{\text{сож}}$ – смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ); K_h – износа инструмента; K_V – скорости резания).

Суммируя произведения удельной силы, возникающей на элементарном участке режущего лезвия, получим:

$$P_z = \sum \Delta P_z \Delta l K_{\text{сл}} \quad (10)$$

Значения составляющих силы резания (рис. 4.) для боковых режущих лезвий:

$$P_y = \sum \Delta P_y \Delta l \sin(\alpha_0 \pm \psi) K_{\text{сл}}; \quad (11)$$

$$P_x = \sum \Delta P_y \Delta l \cos(\alpha_0 \pm \psi) K_{\text{сл}}, \quad (12)$$

и вершинного режущего лезвия:

$$P_y = \sum \Delta P_y \Delta l \cos(\psi) K_{\text{сл}}; \quad (13)$$

$$P_x = \sum \Delta P_y \Delta l \sin(\psi) K_{\text{сл}}, \quad (14)$$

где: α_0 – угол профиля инструмента;

ψ – угол между осью OY и линией, проходящей через середину зуба инструмента, обрабатывающего данную впадину колеса в любом его положении;

«+» – входная кромка,

«-» – выходная кромка.

Δl – элемент режущего лезвия (0,25 мм).

$K_{\text{сл}}$ – коэффициент, учитывающий сложность формирования стружки [2].

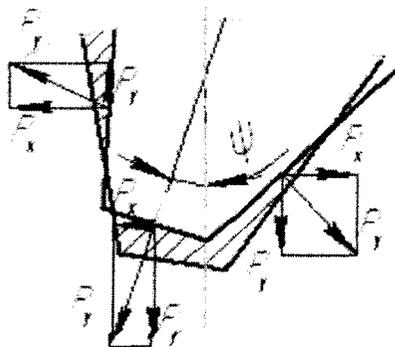


Рис. 4. Определение составляющих сил резания при обработке червячного колеса

Информация о величине кинематических углов режущего лезвия, толщине срезаемого слоя в каждом элементе фрактала позволяет перейти к детальному анализу процесса обработки резанием – определению сил резания, точности обрабатываемых деталей, оценить качество. Это, в свою очередь, дает возможность создать модель управления процессом резания множества методов их обработки для множества обрабатываемых материалов.

Разработанная модель – набор взаимосвязанных описаний, начиная с описания самого верхнего уровня системы и кончая подробным описанием деталей. Каждое из описаний называется диаграммой. Диаграммы объединяются в иерархические структуры.

В основе этой модели лежат понятия SADT (Structured Analysis and Design Technique) – методологии структурного анализа проектирования. Наибольшее распространение идеи SADT получили под названием IDEFO. Этот стандарт использовался для проектирования автоматизации производства, создания программного обеспечения командных и управляющих систем [3].

Диаграмма самого верхнего уровня A0 (рис. 5) нашей модели описывает, то как процесс получения червячного колеса взаимодействует с внешней к нему средой (что поступает на вход системы, что получаем на выходе, кто участвует и т.д.), а именно при взаимодействии технолога, технолога – конструктора, рабочего на чертеж для получения требуемого червячного колеса с целью получения технологической документации по изготовлению червячного колеса с учетом ограничений на возможность обработки.

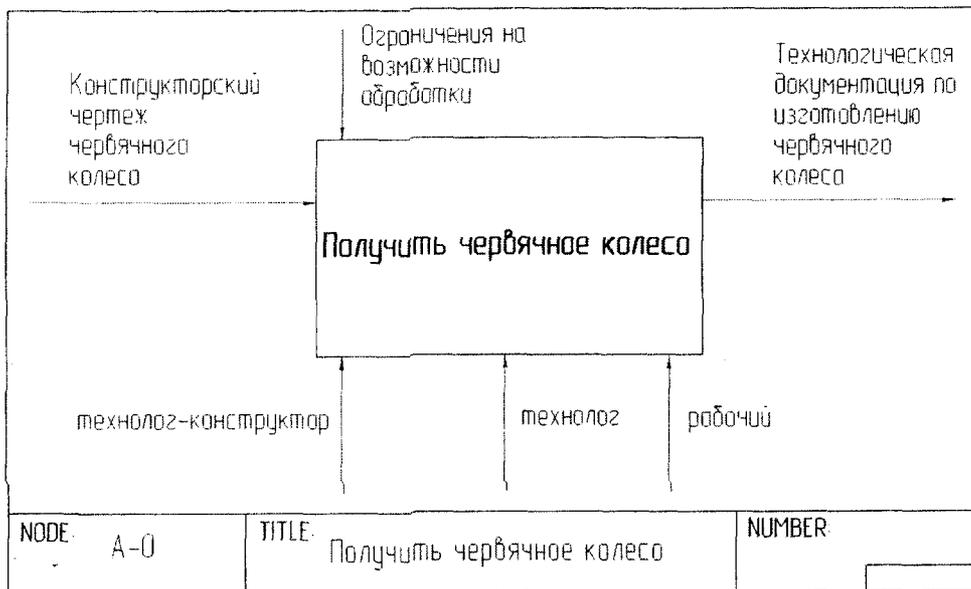


Рис. 5. Обобщённая схема процесса получения червячного колеса

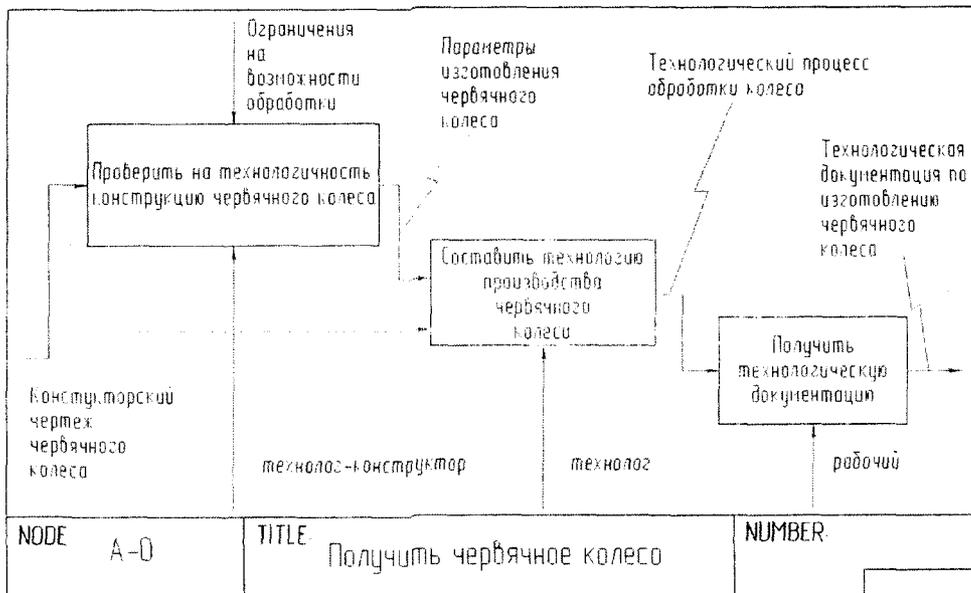


Рис. 6. Основные этапы получения червячного колеса

Затем следует описание главных этапов по получению зубчатых колес (рис. 6) любого производства для имеющегося чертежа детали. Следует проверить на технологичность конструкцию червячного колеса, а именно качество обрабатываемых поверхностей, стоимость изготовления, применив соответствующее оборудование, технологическую оснастку, средства механизации и автоматизации производства.

В результате имеющихся геометрических параметров, материала, тип производства червячного колеса (чертеж червячное колесо),

составляем технологию его производства (рис. 7) при взаимодействии технолога, и получение технологической документации непосредственно для производства детали на конкретном оборудовании с помощью конкретного инструмента, при этом технолог должен оценить обрабатывающий колесо инструмент, т.е. существует ли стандартный и при необходимости конструировать специальный (рис. 8), происходит проверка инструмента на соответствие параметрам конструкторского чертежа при этом вводятся ограничения на возможность обработки.

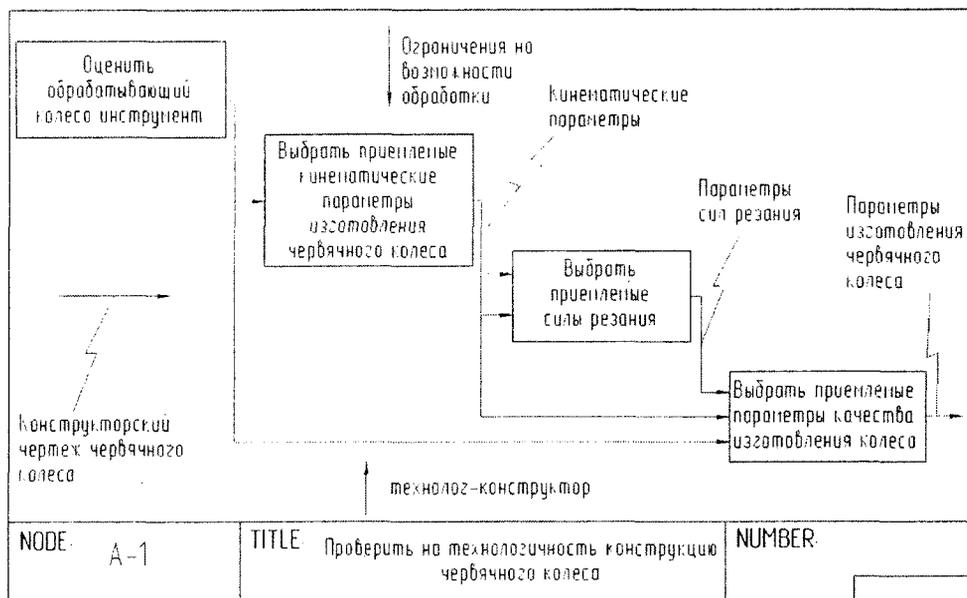


Рис. 7. Специфика проверки на технологичность червячных колёс

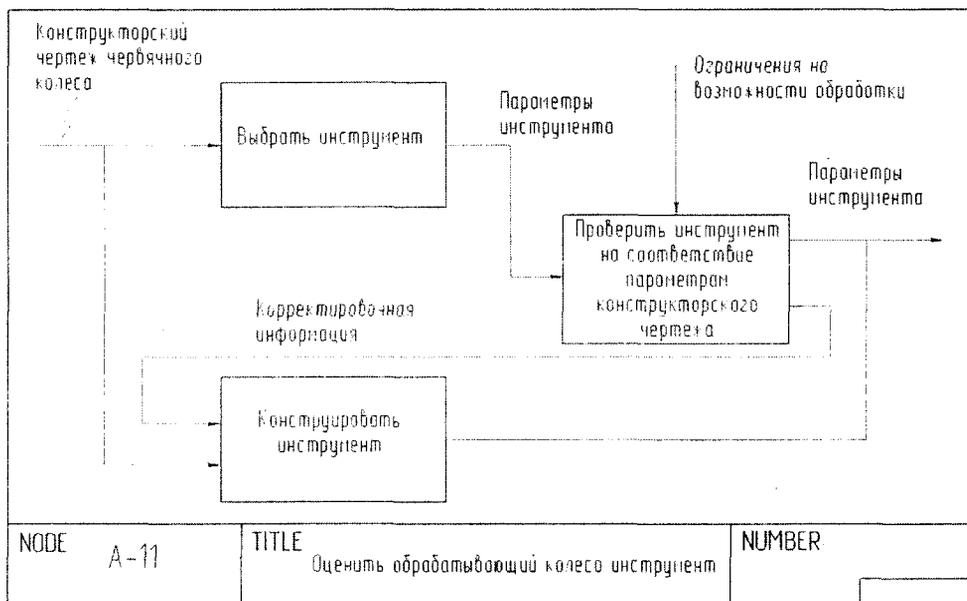


Рис. 8. Процесс оценки инструмента, обрабатывающего червячное колесо

Заключение

1 Установлено, что обработке червячных зубчатых колес присуще сложный процесс формообразования и по этому системный анализ, позволяет изучить в той или иной степени всю полноту процесса, что в конечной степени положительным образом отразится на процессе лезвийной обработки, которая является наиболее важной и дорогостоящей.

2 Разработано математическое описание процесса резания, с помощью которого делают прогноз результатов процесса обработки и выработку рекомендаций по возможным воздействиям на его ход.

3 Предложены зависимости, с помощью которых можно найти составляющие силы резания в любой момент работы зуба инструмента при обработке червячного колеса для любых начальных

параметров, углов, модуля, с любыми допустимыми параметрами процесса резания.

Литература:

1 Полохин О.В. Исследование и проектирование процессов зубонарезания инструментами червячного типа / О.В. Полохин, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение-1, 2006. 148с.

2 Мельков Ю.П. Профилирование дисковых огибающих зуборезных фрез. / Ю.П. Мельков, В.П. Сотников // Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием: Сб. науч. трудов. Тула: ТПИ. 1983. – С. 171-177.

3. Марка Д. Методология структурного анализа и проектирования ЗАОТ / Д.Марка, К. Мак-Гоулен. – М: Радио и связь, 1993. – 240 с.

УДК 621.787.6

Асп. Тарасов Д.Е.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)541503; E-mail: tde82@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛО НАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОСРЕДСТВОМ УЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Influence of technology factors static's - impulse processing on operational parameters of quality of a superficial layer of hard loaded details of machines is considered.

Детальная разработка технологических процессов в машиностроении на изготовление любой номенклатуры деталей является гарантом получения изделия с совокупностью качественных эксплуатационных свойств, заложенных на стадии производства.

Известно, что понятие технологический процесс многогранно и его структура состоит из ряда пунктов: анализа выпускаемой продукции (изучение чертежей); определение базисных поверхностей; выбор оборудования, на котором будет производиться обработка; подбор инструмента, позволяющего обеспечить предъявляемые требования к обрабатываемой поверхности; выбор и расчет технологических режимов обработки; контроль обработанных участков и т. д.

Технологические режимы обработки – объемный по содержанию пункт технологической операции. От того, насколько грамотно будет произведен их расчет, во многом зависит качество дальнейшей обработки. В особенности это важно при расчете технологических операций, стоящих на завершающих этапах производства.

Технологические операции, применяемые для окончательной обработки, позволяют получить необходимую форму деталей с заданной точностью. При этом, не всегда удается добиться оптимального качества поверхностного слоя. В связи с этим на производстве применяют методы повышения эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей машин. Это термическая и химико – термическая обработка, нанесение покрытий, поверхностное пластическое деформирование (ППД) и т. д.

При ППД (обработка дробью, выглаживание, накатывание) происходит тонкое пластическое деформирование поверхности, обеспечивающее глубину наклепанного слоя не более 1,5...2 мм [2, 3]. Как результат, получается слой с определенными значениями эксплуатационных параметров: твердостью; шероховатостью; глубиной упрочнения; наличием остаточных напряжений сжатия. Изменяются износостойкость, статическая прочность, усталостное изнашивание, контактная выносливость (прочность). Повышается стойкость к коррозии и т. д.

Все известные многочисленные способы обработки ППД подразделяются на статические и динамические [1]. Статические способы ППД (обкатывание, раскатывание, выглаживание и др.) предполагают воздействие на зону деформации неизменным во времени потоком энергии в условиях непрерывного контакта инструмента с деталью. Статические способы обработки ППД наиболее изучены. При реализации динамических способов ППД (центробежной, дробеструйной, гидродробеструйной обработки, чеканки, обработки микрошариками и вращающимися металлическими щетками - ВМЩ) осуществляется ударное деформационное воздействие на обрабатываемую поверхность рабочих тел или инструмента в условиях прерывистого контакта. Среди динамических способов ППД наиболее изучены и широко применяются методы дробеструйной обработки. Основными недостатками рассмотренных методов является то, что энергия удара расходуется на пластическую деформацию не рационально и спрогнозировать результаты упрочнения достаточно тяжело. А как результат имеем ограниченные возможности варьирования глубиной и степенью упрочнения поверхностного слоя. Более полное и широкое использование динамической энергии при упрочнении ППД сдерживается недооценкой и сложностью описания волновых процессов, происходящих при ударе.

Разрушение деталей, подвергающихся усталостным нагрузкам, начинается с трещины, зарождающейся в опасной точке, расположенной в поверхностном слое. Из практики известно, что глубина залегания данной точки составляет 3...5 мм и более. Поэтому, эффективность упрочнения ППД видится в создании глубоко наклепанного слоя. Достичь этого известными способами (статическими и динамическими) зачастую невозможно.

Новый способ обработки ППД – статико-импульсная обработка (СИО) – отличается более широкими возможностями варьирования глубиной и степенью упрочнения [1, 2]. При СИО основным деформирующим воздействием является динамическое (импульсное). Возможности технологических и конструктивно-технологических

параметров СИО таковы, что позволяют более эффективно и точно управлять энергией удара, за счет изменения формы ударных импульсов. В результате СИО нагружение упрочняемого материала происходит ударными импульсами с такой формой, при которой энергия, расходуемая на пластическую деформацию, будет максимальной. Появляется возможность создавать как низкое менее $3\sigma_T$ (где σ_T – предел текучести обрабатываемого металла), так и очень высокое давление в очаге деформации более $3\sigma_T$, а, следовательно, регулировать показатели качества поверхностного слоя в более широком диапазоне, чем у существующих способов ППД. Появляются возможности для регулирования равномерности упрочненной поверхности и создания поверхностного слоя с регулярно изменяющейся твердостью (пятнистой поверхностью) аналогичной по свойствам гетерогенному композиционному материалу с мягкой матрицей и твердыми включениями.

Тяжело нагруженные детали машин (направляющие станин, зубчатые колеса, подшипники качения, гильзы и т. д.) в процессе эксплуатации испытывают усталостные нагрузки, подвергаются воздействию различного рода изнашиваний. Важность разработки новых технологий по улучшению качества их поверхностных слоев невозможно переоценить. Применение СИО ППД, как метода улучшения эксплуатационных свойств поверхности деталей машин, при их производстве весьма актуально.

Качество поверхностного слоя можно оценить по следующим параметрам: микротвердости, технологическим остаточным напряжениям, глубине напряженного и упрочненного слоев, микрогеометрии обработанной поверхности [1].

В процессе СИО свойства поверхностного слоя формируются в результате пластической деформации металла под единичными отпечатками, полученными в основном под действием динамической составляющей силы деформирования. Помимо естественной зависимости от статической и динамической составляющей силы деформирования, а, следовательно, от энергии, амплитуды и длительности (формы) импульса параметры качества поверхностного слоя в немалой степени зависят от конфигурации и степени перекрытия единичных отпечатков. Отношение периода следования импульсов, т.е. частоты ударов к их длительности определяет значение скважности ударных импульсов.

Установлено, что форма ударных импульсов определяется геометрическими параметрами бойка и волновода, свойствами обрабатываемого материала, формой и размерами инструмента. Конфигурация отпечатков непосредственно связана с формой и размерами деформирующего инструмента. Размеры единичного отпечатка зависят от формы деформирующей поверхности инструмента, формы и энергии импульса. Степень

перекрытия определяется размерами единичных отпечатков, величиной относительной подачи инструмента и заготовки, частотой (скважностью) импульсов.

Следовательно, на состояние поверхностного слоя после СИО будут оказывать влияние следующие факторы: геометрические параметры бойка и волновода, величина предварительного статического поджатия инструмента к упрочненной поверхности, свойства обрабатываемого материала, форма и размеры инструмента, подача, частота импульсов. Для расширения полноты использования возможностей СИО необходимо выявить виды связей между технологическими факторами СИО и параметрами качества поверхностного слоя обработанной детали.

В связи со сложностью детального теоретического описания процесса СИО и невозможностью учета ряда факторов рационально опираться на экспериментальные данные. При разработке технологических рекомендаций целесообразно пользоваться математическими моделями, полученными в результате анализа экспериментальных данных.

Проводились исследования на экспериментальном измерительном стенде [1] с использованием ударной системы боек – волновод, с целью выявления связи между технологическими факторами СИО и размерами пластической вмятины при однократном вдавливании инструмента. Для экспериментальных исследований использовались плоские образцы из сталей ШХ15, 30ХГСА, 110Г13Л. В результате были получены математические модели для расчета диаметра отпечатка.

При проведении экспериментов в волноводе формировались единичные импульсы прямоугольной формы с постоянной амплитудой и длительностью. Исследования проводились при варьировании технологических факторов в следующем диапазоне: динамической составляющей силы деформирования $P_{и} = 19...43$ кН, статической составляющей силы деформирования $P_{ст} = 0...1,2$ кН, которая выбиралась из условия $P_{ст} \geq 0,01P_{и}$, энергии импульса $A = 2,4...12$ Дж. На торце волновода, обращенном к образцу, жестко монтировался шар диаметром 5...22 мм из стали ШХ15.

Используя данные модели, попытаемся построить предварительные зависимости (опережающие эксперимент) между технологическими факторами СИО ППД и размерами пластической вмятины для иных материалов. Сравнительные расчеты будем проводить для плоских образцов из сталей 20Х, 18ХГТ, 20Х2Н4А, часто использующихся для изготовления тяжело нагруженных деталей.

Из теории ППД известно, что размеры отпечатка зависят от силы деформирования ($P = P_{ст} + P_{и}$), приведенного радиуса кривизны взаимодействующих поверхностей $R_{пр}$ и свойств обрабатываемого материала [1]. В нашем случае удобно вместо параметра $P_{и}$ использовать энергию

удара A . Поскольку пластическая деформация металла при выбранных условиях СИО происходит под действием динамической составляющей нагрузки, в качестве характеристики обрабатываемого материала целесообразно использовать пластическую твердость НД.

Математическая модель для расчета диаметра отпечатка имеет вид:

$$d = 4,4453 + 0,309824 A - 0,011939 A^2 + 0,010428 AR_{np} + 0,486929 R_{np} - 0,029334 R_{np}^2 - 0,001421 НД \quad (1)$$

Радиус R_{np} рассчитывается по формулам:

$$R_{np} = \sqrt{\frac{R_{11}R_{12}R_{21}R_{22}}{(R_{11} \pm R_{12})(R_{21} \pm R_{22})}} \quad (2)$$

или
$$D_{np} = 2R_{np} = \sqrt{\frac{1}{AB}} = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{A}{B}} \quad (3)$$

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}} \pm \frac{1}{R_{12}} \right); \quad B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{21}} \pm \frac{1}{R_{22}} \right).$$

где: R_{ij} – главные радиусы кривизны поверхностей инструмента и упрочняемой поверхности (индексы j) в точке начального контакта; знак «плюс» и «минус» относятся соответственно к случаям контакта инструмента с упрочняемой поверхностью, сечение которого в данной плоскости кривизны (индексы i) ограничено выпуклым или вогнутым контурами.

Ясно (рис. 1), что главные радиусы кривизны поверхностей шара R_{11} и R_{21} имеют определенное значение, а главные радиусы кривизны для плоскости $R_{12} = R_{22} = \infty$.

Производя расчеты по формуле (3) можно убедиться, что величина R_{np} , при внедрении шара в плоскую поверхность, численно равна его радиусу. Соответственно, получаем следующий диапазон значений $R_{np} = 2,5 \dots 11$ мм.

Подставляя имеющиеся данные в формулу (1) для выбранных материалов, можно получить зависимости, представленные на рис. 2. По ним видно, что энергия импульса и радиус инструмента оказывают наиболее сложное влияние на размер отпечатка.

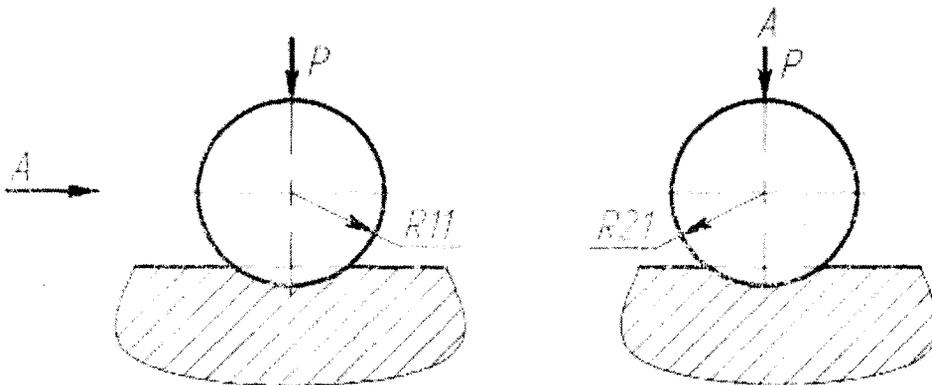


Рис. 1. Схема упругопластического контакта инструмента и упрочняемой плоской поверхности

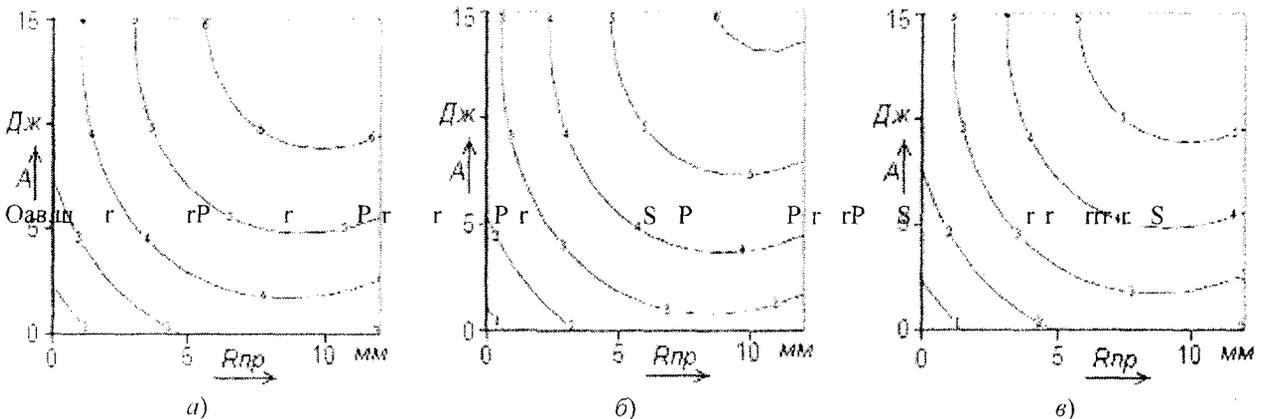


Рис. 2. Зависимость диаметра отпечатка (указана на кривых в мм) от приведенного радиуса R_{np} кривизны поверхностей инструмента и детали и энергии ударного импульса A (а – сталь 20Х, НД 2180 МПа; б – сталь 18ХГТ, НД 2652 МПа; в – сталь 20Х2Н4А, НД 2895 МПа)

Преобразуя (1) можно построить зависимость пластической твердости материала НД (указана на кривых) от приведенного радиуса R_{np} кривизны поверхности инструмента и детали и диаметра отпечатка d при изменяющейся в заданном диапазоне энергии ударного импульса A (рис. 3).

При упрочнении плоских поверхностей деталей наибольшую эффективность, в сравнении с шаром, имеют стержневые ролики. При СИО стержневым роликом формируются отпечатки длиной, равной ширине стержневого ролика, и характерным размером отпечатка δ в направлении подачи (рис. 4).

Основным параметром, характеризующим размеры отпечатка, является его размер в направлении подачи δ .

Проведенные эксперименты [1] для частных случаев энергии ударов $a = 10$ Дж/мм и диаметра ролика $D_p = 10$ мм дали математические модели, в результате анализа которых установлено, что с увеличением диаметра стержневого ролика в выбранном диапазоне размер отпечатка δ уменьшается (рис. 5, а). Увеличение удельной энергии ударов позволяет значительно увеличить размер отпечатка δ (рис. 5, б). Следовательно, чтобы

размер отпечатка увеличивался при увеличении диаметра ролика, необходимо повышать удельную энергию ударов.

Так как математические модели для обработки плоских поверхностей деталей машин стержневым роликом имеют частный характер, не имеется возможности вывода зависимостей для выбранных материалов даже на уровне гипотезы. Но рациональность практического использования предложенной статико-импульсной обработки очевидна.

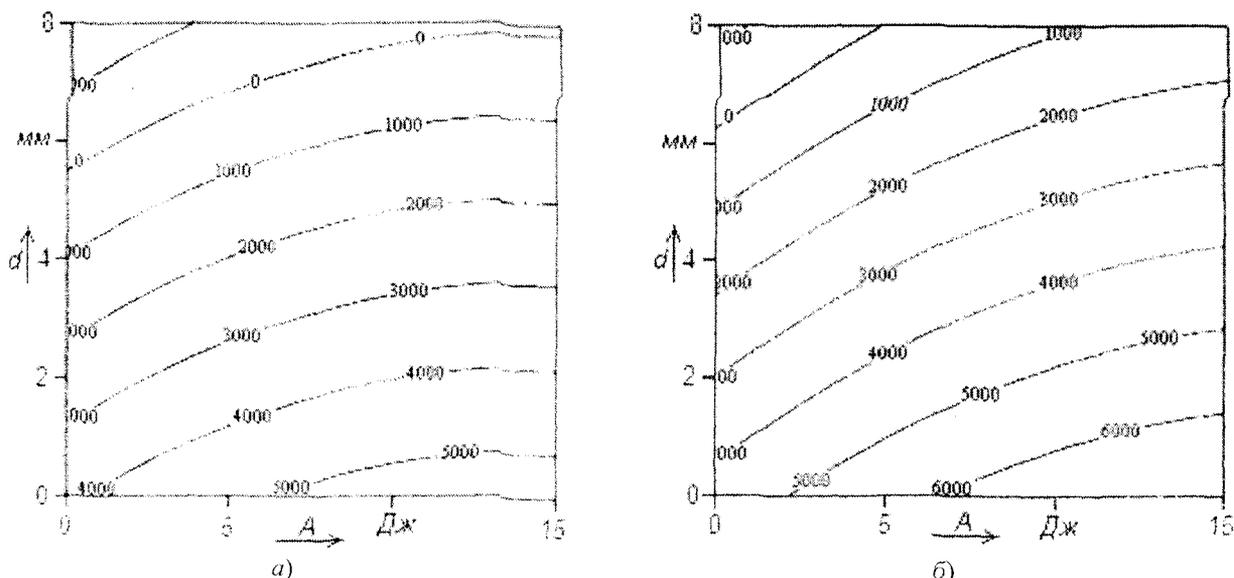


Рис. 3. Зависимость пластической твердости материала НД (указана на кривых) от приведенного радиуса R_{np} кривизны поверхности инструмента и детали и диаметра отпечатка d ($A = 2, 4, \dots, 12$ Дж); (а - $R_{np} = 2,5$ мм; б - $R_{np} = 11$ мм)

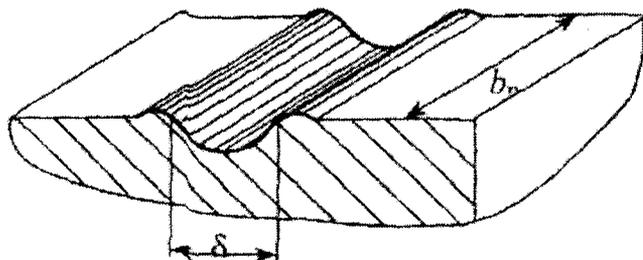


Рис. 4. Отпечаток под стержневым роликом

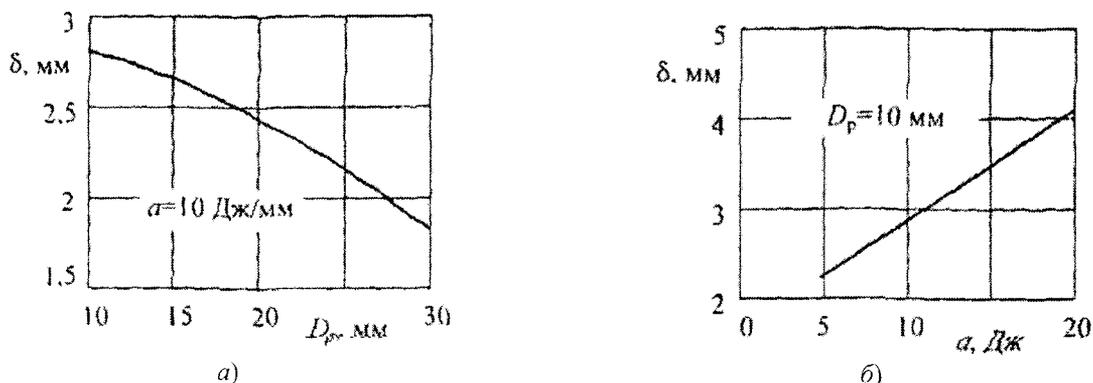


Рис. 5. Влияние размера отпечатка δ в направлении подачи при нагружении стержневым роликом от: а - диаметра стержневого ролика D_p ; б - удельной энергии ударов a

Несмотря на то, что построенные зависимости для сталей 20Х, 18ХГТ, 20Х2Н4А носят гипотетический характер, опираясь на экспериментальные данные и модели [1], правомерно сделать предположение о том, что технологические факторы СИО ППД оказывают существенное влияние на качество обрабатываемой поверхности (эксплуатационные показатели). А тот факт, что свойства поверхностного слоя формируются в результате пластической деформации металла под единичными отпечатками, только подтверждает предположение о свойствах статико-импульсной обработки деталей машин.

Литература:

- 1 Киричек А.В. *Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием* / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьёв, А.Г. Лазуткин // Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
- 2 Лазуткин А.Г. *Механика нагружения поверхности волной деформации* / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов, Д.Л. Соловьёв. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 149 с.
- 3 Одинцов Л.Г. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник*. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

ТЕХНОЛОГИИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

ТЕХНОЛОГИИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9

Д-р техн. наук, проф. *Степанов Ю.С., *д-р техн. наук* *Барсуков Г.В., *асп.* *Михеев А.В.,
Dr. **Ravipudi Venkata Rao, *prof.* **Nagarsheth H.J.
 (*Орловский государственный технический университет, ** S.V. National Institute of Technology)
 *Россия, г. Орёл, тел. (0862)419818; E-mail: upk@ostu.ru,
 ** India, s. Surat, E-mail: ravipudirao@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ХРУПКОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АБРАЗИВНОЙ ЧАСТИЦЕЙ

Authors of article receive the equations for definition of conditions origin of a crack in a fragile material at contact interaction with an abrasive particle flying with supersonic speed.

Хрупкие неметаллические материалы (стекло, кварц, керамика, ферриты, ситаллы и др.) в последнее время находят все более широкое применение в силу своих уникальных прочностных и эксплуатационных характеристик, среди которых следует отметить высокую твердость, высокую сопротивляемость сжатию при низкой удельной плотности, термостойкость, устойчивость к силовой напряженности и внешнему гидростатическому давлению.

В последние годы, наряду с развитием и расширением технологических возможностей традиционных способов резания хрупких неметаллических материалов, все большее внимание специалистов привлекает технология резания таких материалов гидроабразивной струей, позволяющей получать детали фигурных контуров с малой шириной и высокой производительностью реза [1]. Однако гидроабразивное резание хрупких неметаллических материалов имеет ряд технологических ограничений по применению, связанных с развитием радиальных трещин и разрушением заготовки, а также образованием на обработанной поверхности сколов и раковин, что заметно снижает качество получаемой детали.

Обеспечить эффективность гидроабразивного резания хрупких неметаллических материалов можно, если управлять процессом гидроабразивного резания исходя из условий трещинообразования в теле заготовки, которому предшествует напряженное состояние зоны резания, создаваемое движущимся со сверхзвуковой скоростью абразивными частицами.

Физическая основа процесса гидроабразивного резания состоит в следующем. В месте контактного взаимодействия напряжение в сечении заготовки становится больше критического, происходит хрупкое разрушение материала под действием упругой деформации, с образованием магистральной, опережающей трещины. В дальнейшем впереди магистральной трещины возникают и растут по разным направлениям и на разных близких уровнях вторичные трещины,

образуя при встрече фронтов с магистральной и другими вторичными трещинами линии «скола». Глубина распространения этих трещин будет зависеть от степени напряженного деформируемого состояния в обрабатываемом теле, определяемой энергетическими условиями процесса обработки.

Оценку возможности зарождения трещины, в каком либо направлении можно сделать на основе решения задачи линейной теории упругости и анализе напряженно деформированного состояния [2].

Рассмотрим задачу о плоской деформации в линейной классической теории упругости при условии гладкого контура. В этом случае компоненты тензора деформации записываются в линейном виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$ – компоненты вектора деформаций;

u, v – компоненты вектора перемещений

Предполагая, что объемные силы отсутствуют, дифференциальные уравнения равновесия запишем в следующем виде:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}$ – компоненты вектора напряжений.

Компоненты тензора напряжений и вектора перемещений связаны уравнениями закона Гука:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \sigma_{yy} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \sigma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right). \end{cases} \quad (3)$$

Если учесть, что:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости первого рода;
 ν – коэффициент Пуассона.

Тогда, компоненты тензора напряжений можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{E}{1+\nu} \left[\frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \varepsilon_{xx} \right], \\ \sigma_{yy} = \frac{E}{1+\nu} \left[\frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xx}) + \varepsilon_{yy} \right], \\ \sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{xy}. \end{cases} \quad (6)$$

Подставляя (3) в (2) получаем следующую систему уравнения в перемещениях:

$$\begin{cases} \mu \Delta u + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0, \\ \mu \Delta v + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, с граничными условиями:

$$u|_{\gamma} = u_0(s), \quad \sigma^{(n)}|_{\gamma} = \sigma_0^{(n)}(s). \quad (8)$$

К уравнениям (7) добавим условие совместности деформаций в линейаризованном виде:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}. \quad (9)$$

Кроме этого решение плоской задачи теории упругости можно получить с помощью введения в уравнения равновесия функции Эри:

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}, \quad \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_{xy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (7), а затем в (8), получим бигармоническое уравнение относительно функции Φ :

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi(x, y) = 0, \quad (11)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – гармонический оператор

Лапласа для случая плоской задачи теории упругости.

Выпишем граничные условия, которым должна удовлетворять функция Эри на контуре.

Введём следующие обозначения:

$$\Phi_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad \Phi_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad (x, y) \in S. \quad (12)$$

Тогда имеем:

$$\begin{aligned} \Phi_x(s) - \Phi_x(0) &= \int_0^s \frac{\partial \Phi_x}{\partial s} ds = \int_0^s \left(\Phi_{xx} \frac{\partial x}{\partial s} + \Phi_{xy} \frac{\partial y}{\partial s} \right) ds = \\ &= \int_0^s \left[-\sigma_{yy} \cos(\theta, y) - \sigma_{xy} \cos(\theta, x) \right] ds = \int_0^s \sigma_{ny} ds, \end{aligned} \quad (13)$$

аналогично получим:

$$\Phi_y(s) - \Phi_y(0) = \int_0^s \sigma_{nx} ds$$

Итак, заданием напряжений на границе контура определяются первые производные функции Эри:

$$\Phi_x(s) = - \int_0^s \sigma_{ny} ds + A = -f_1(s) + A, \quad (14)$$

$$\Phi_y(s) = - \int_0^s \sigma_{nx} ds + B = f_2(s) + B, \quad (15)$$

где s – длина контура, отсчитываемая от некоторой произвольной точки;

$f_1(s), f_2(s)$ – компоненты главного вектора сил, действующих на границе контура.

Таким образом, для односвязной области в случае задания напряжений на границе имеет место первая краевая задача. Используем данный способ для определения функции напряжений и соответственно напряженно деформированного состояния в случае полубесконечной пластины единичной толщины с угловым вырезом (рис. 1).

Пусть на грани выреза действует произвольная распределенная нагрузка материал пластины изотропный. Для упрощения решения переведем в полярную систему координат. Запишем граничные условия для граней выреза в виде:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta}|_{\theta=0} = -q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{\theta\theta}|_{\theta=\alpha} = q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{r\theta}|_{\theta=0} = \sigma_{r\theta}|_{\theta=\alpha} = q(r) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \end{cases} \quad (16)$$

Решение плоской задачи теории упругости может быть сведено к определению функции напряжений $\Phi(r, \theta)$ по значениям нагрузки на гранях выреза.

Так как функция Эри должна удовлетворять бигармоническому уравнению:

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi(r, \theta) = 0, \quad (17)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$ – гармонический оператор Лапласа в полярных координатах.

Для определения функции напряжений Φ можно применить метод разделения переменных. Тогда для функции напряжений запишем:

$$\Phi(r, \theta) = f(r) \varphi(\theta). \quad (18)$$

Напряжения в полярной системе координат определяются равенствами:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2}, \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (19)$$

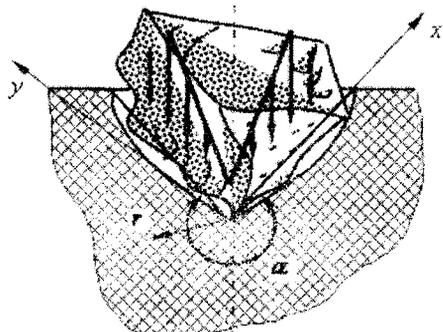


Рис. 1. К анализу напряжений на границе углового выреза под действием распределенной нагрузки

Учитывая (18), выражения для напряжений можно записать в виде:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{\varphi(\theta)}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} + \frac{f(r)}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi(\theta)}{\partial \theta^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} = \varphi(\theta) \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}, \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{f(r)}{r} \frac{\partial \varphi(\theta)}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta) = & A\theta + A_0 r^2 \ln r + B_0 r^2 + C_0 \ln r + D_0 r^2 \theta + (A_1 r^3 + B_1 r \ln r + C_1 r^{-1}) \cdot \cos \theta + B_0 r \theta \sin \theta + (A_1' r^3 + B_1' r \ln r + C_1' r^{-1}) \times \\ & \times \sin \theta + B_1' r \theta \cos \theta + \sum_{n=2}^{\infty} (C_{1n} r^n + C_{2n} r^{n+2} + C_{3n} r^{-n+2}) \cdot \cos n \theta + \sum_{n=2}^{\infty} (D_{1n} r^n + D_{2n} r^{n+2} + D_{3n} r^{-n+2}) \cdot \sin n \theta. \end{aligned} \quad (29)$$

Подставив граничные условия (16) в (20) и опуская знаки, получим:

$$\begin{cases} q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \varphi(\theta) \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}, \\ q(r) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{f(r)}{r} \frac{\partial \varphi(\theta)}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (21)$$

Так как на гранях выреза значения $\varphi(\theta)$ постоянны, то можно записать что:

$$q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1}{K} \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}. \quad (22)$$

Второе уравнение в системе (21) не определено, а первое, опуская $\sin(\alpha/2)$, можно переписать в виде:

$$q(r) = \frac{1}{K} \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}. \quad (23)$$

Представим нагрузку $q(r)$, действующую на грани выреза, в виде степенного ряда:

$$q(r) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n, \quad (24)$$

тогда:

$$f(r) = K \iint [q(r) dr] dr, \quad (25)$$

или

$$f(r) = K \iint \left[\sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n dr \right] dr. \quad (26)$$

Тогда с учетом (25), функция напряжений в общем виде принимает следующий вид:

$$\Phi(r, \theta) = \varphi(\theta) \iint [q(r) dr] dr, \quad (27)$$

$$\Phi(r, \theta) = \varphi(\theta) \iint \left[\sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n dr \right] dr. \quad (28)$$

Используя общее выражение функции Эри в полярной системе координат, запишем функцию напряжений:

Слагаемые, удовлетворяющие условию (28):

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta) = & B_0 r^2 + D_0 r^2 \theta + A_1 r^3 \cos(\theta) + A_1' r^3 \sin(\theta) + \\ & + \sum_2^{\infty} (D_{1n} r^n + D_{2n} r^{n+2}) \sin(n\theta) + \\ & + \sum_2^{\infty} (C_{1n} r^n + C_{2n} r^{n+2}) \cos(n\theta). \end{aligned} \quad (30)$$

Функция (29) удовлетворяет уравнению:

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi(r, \theta) = 0, \quad (31)$$

а также статическим уравнениям равновесия:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0, \end{cases} \quad (32)$$

и уравнению неразрывности:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) (\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) = 0 \quad (33)$$

С помощью $\Phi(r, \theta)$ можно определить деформации и перемещения. Уравнения закона Гука в ортогональных криволинейных координатах имеют такой же вид, что и в декартовых координатах. Поэтому в случае плоского напряженного состояния имеем:

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} (\sigma_{rr} - \nu \sigma_{\theta\theta}), \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} (\sigma_{\theta\theta} - \nu \sigma_{rr}), \\ \varepsilon_{r\theta} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{r\theta}. \end{cases} \quad (34)$$

Полученные зависимости между компонентами тензора деформации и компонентами вектора перемещения можно записать в полярных координатах:

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}, \\ \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right). \end{cases} \quad (35)$$

Применяя формулу (19), получим:

$$\begin{cases} \frac{1}{E} \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) - \nu \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \right] = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \\ \frac{1}{E} \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right] \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}, \\ \frac{1+\nu}{E} \left[-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right). \end{cases} \quad (36)$$

Выражение (36) позволяет определить перемещения, деформации и напряжения.

Рассмотрим пример. Пусть на полубесконечную пластину единичной толщины с угловым вырезом действует распределенная нагрузка:

$$q(r) = q_0 r. \quad (37)$$

Следуя алгоритму, запишем граничные условия:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta}|_{\theta=0} = -q_0 r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{\theta\theta}|_{\theta=\alpha} = q_0 r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{r\theta}|_{\theta=0} = \sigma_{r\theta}|_{\theta=\alpha} = q_0 r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \end{cases} \quad (38)$$

Так как $0 \leq r < \infty$, то, учитывая (18), (25), (22), (27) можно записать функцию напряжений в виде:

$$\Phi(r, \theta) = \varphi(\theta) \iint [q_0 r dr] dr. \quad (39)$$

Произведя интегрирование по r , получим:

$$\Phi(r, \theta) = [r^3 + Ar + B] q_0 \varphi(\theta). \quad (40)$$

Для односвязных областей в формуле (34) можно положить что A и B равны нулю. Тогда получим:

$$\Phi(r, \theta) = q_0 r^3 \varphi(\theta). \quad (41)$$

Из общего выражения для функции (29) выбираем слагаемые, удовлетворяющие условию (36):

$$\Phi(r, \theta) = A_1 r^3 \cos\theta + A_1' r^3 \sin\theta + C_1 r^3 \cos 3\theta + D_1 r^3 \sin 3\theta, \quad (42)$$

где A_1, A_1', C_1, D_1 – произвольные постоянные, определяемые из условия нагружения.

Используя (19) запишем формулы напряжений:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = 2A_1' r \sin\theta + 2A_1 r \cos\theta + 6C_1 r \sin 3\theta - 6D_1 r \cos 3\theta, \\ \sigma_{\theta\theta} = -2A_1' r \cos\theta + 2A_1 r \sin\theta - 6C_1 r \cos 3\theta + 6D_1 r \sin 3\theta, \\ \sigma_{r\theta} = -2A_1' r \cos\theta + 2A_1 r \sin\theta - 6C_1 r \cos 3\theta + 6D_1 r \sin 3\theta, \end{cases} \quad (43)$$

Полученное выражение удовлетворяют (11), (32), (33), и решение справедливо при условиях: $0 < \alpha < 2\pi$, $0 \leq r < \infty$.

Используя полученные уравнения (43) приведен расчет радиальных (рис. 2), тангенциальных (рис. 3) и касательных напряжений (рис. 4), а также радиальных, тангенциальных и касательных деформаций.

Полученные уравнения напряженно деформированного состояния позволяют сделать оценку зарождения трещины в хрупком неметаллическом материале при контактом взаимодействии с абразивной частицей, летящей со сверхзвуковой скоростью. Полученные данные об условиях трещинообразования позволяют связать технологические параметры гидроабразивного резания (давление истечения, зернистость абразива, подачу сопла) с процессом зарождения хрупких трещин и их развитием, что открывает возможность управлять процессом разрушения хрупких неметаллических материалов.

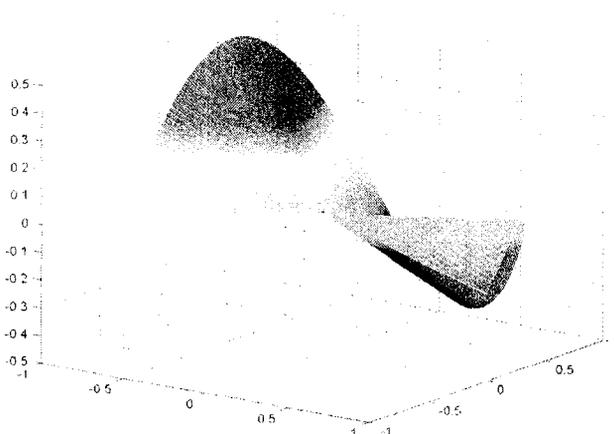


Рис. 2. Поверхность радиальных напряжений

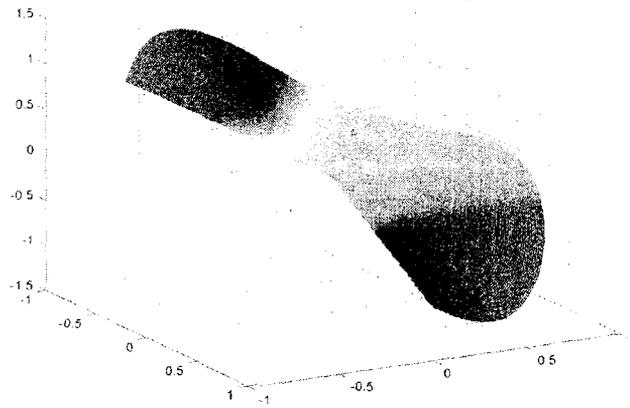


Рис. 3. Поверхность тангенциальных напряжений

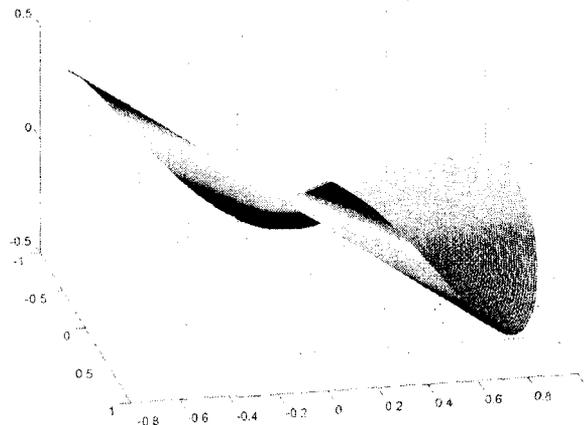


Рис. 4. Поверхность касательных напряжений

Литература:

1 Барсуков Г.В. Управление качеством и дискретное регулирование технологической системы гидрорезания // Справочник Инженерный журнал. – 2004. – № 7. – С. 53-57.

2 Подстригач Я.С. Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций / Я.С. Подстригач, В.А. Осадчук, А.М. Марголин – Киев: Наук. Думка, 1991. – С. 289 с.

ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ И ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ И ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.99

Д-р техн. наук, проф. Киричек А.В., канд. техн. наук, доц. Афонин Л.Н., доц. Афанасьев Б.И.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)541503; E-mail: af@au.ru

СПОСОБ НАКАТЫВАНИЯ НАРУЖНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ РЕЗЬБ

The new way thread rolling is described, allowing forming external rectangular and large trapezoidal thread, carried out by deformation of preparation between two die and to three thread rollers.

Известно, что резьбонакатывание является одним из наиболее перспективных способов резьбоформообразования, обеспечивающих высокое качество получаемых резьб при большой производительности обработки, но на сегодняшний день область его применения ограничена. В частности, практически невозможно накатывание традиционными способами упорных и прямоугольных резьб и трапецидальных резьб с углом профиля менее 10° в связи с затруднённым течением металла при внедрении витков инструмента в заготовку [5]. Однако такие резьбы часто применяются в ответственных узлах машин и механизмов в качестве ходовых или крепежных, и совершенствование технологии их изготовления имеет большое значение для современного машиностроения.

Для получения цилиндрических деталей, имеющих ступени различной формы, нашла применение валковая штамповка [1]. Формирование наружных цилиндрических поверхностей валковой штамповкой может производиться в роликовой матрице [1], содержащей заходный и калибрующий участки. Калибрующий участок выполнен в виде контактирующих с заготовкой роликов, насаженных на оси и закрепленных в корпусе параллельно оси заготовки с возможностью регулировочного радиального перемещения; ролики выполнены ступенчатыми, с количеством ступеней, равным ступеням получаемой детали. Заходный участок роликовой матрицы выполнен в виде цилиндрической втулки, установленной в корпусе на упорных подшипниках.

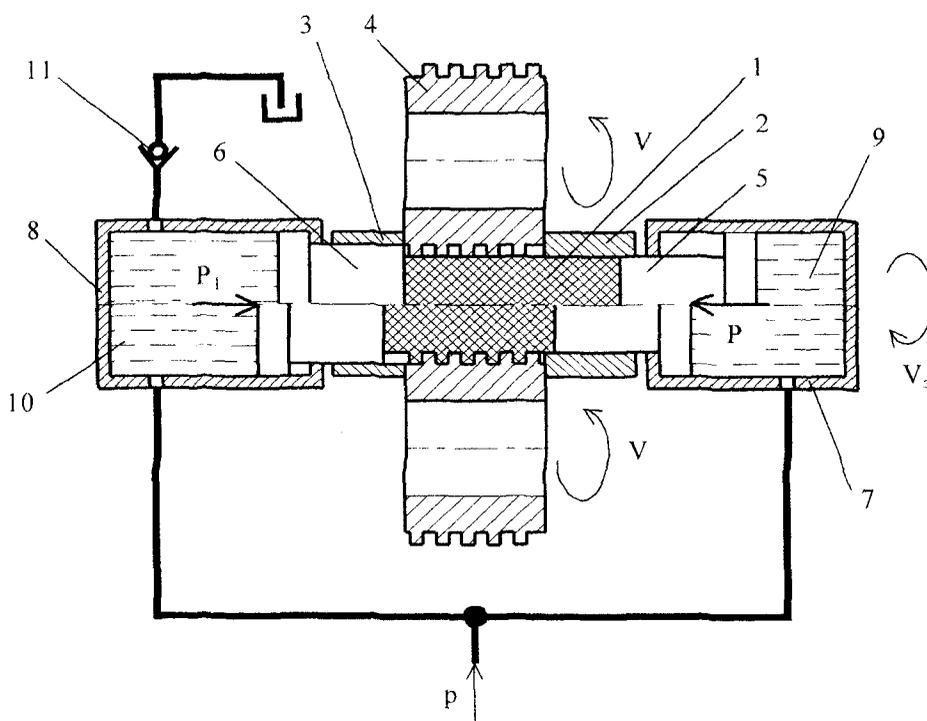


Рис. 1. Схема накатывания прямоугольной резьбы

Данное устройство позволяет получать ступенчатые тела вращения со значительной разницей между диаметрами ступеней. Однако оно не может быть использовано для обработки винтовых поверхностей, поскольку при накатывании резьбы из-за того, что угол подъема резьбы на заготовке при формировании профиля постоянно изменяется и не может соответствовать углу подъема резьбы на роликах, ролики сообщают заготовке некоторое осевое перемещение. Невозможность осевого перемещения заготовки приведет к поломке резьбы на роликах.

Для расширения области применения резьбонакатывания в ОрёлГТУ разработан новый способ накатывания наружных резьб с использованием оригинального устройства [3]. Схема реализации способа приведена на рис. 1. На верхней половине рис. 1 изображена заготовка до накатывания резьбы, а на нижней половине – после накатывания.

Предложенный способ накатывания наружных резьб осуществляется следующим образом:

Цилиндрическая заготовка 1, диаметр которой равен внутреннему диаметру накатываемой резьбы, устанавливается во втулках 2 и 3 между тремя или большим количеством роликов 4 одного диаметра, имеющих многозаходную резьбу с профилем, соответствующим профилю накатываемой резьбы и направлением, противоположным направлению накатываемой резьбы. Оси вращения роликов 4 и заготовки 1 параллельны. Между роликами имеется жесткая кинематическая связь, обеспечивающая равную угловую скорость вращения всех роликов. При этом угол поворота роликов 4 предварительно выставлен по шаблону, представляющему собой деталь с резьбой, соответствующей накатываемой резьбе, таким образом, чтобы выступы резьбы роликов попадали во впадины резьбы шаблона.

Скорость и направление перемещения заготовки при резьбонакатывании зависит от соотношения углов подъема резьбы на ролике и заготовке [4]. Угол подъема резьбы определяется по формуле:

$$\psi = \arctg\left(\frac{P}{\pi \cdot D_{\text{ср}}}\right), \quad (1)$$

где P – шаг резьбы, мм;

$D_{\text{ср}}$ – средний диаметр резьбы, мм.

При заданных геометрических параметрах накатываемой резьбы регулировать направление перемещения заготовки при накатывании можно, только изменяя диаметр резьбонакатных роликов. В связи с этим наружный диаметр роликов 4 подбирается таким образом, чтобы они сообщали заготовке осевое перемещение только в направлении плавающего упора 6, и рассчитывается по формуле:

$$D_{\text{нар}} = \frac{k_{\text{рол}}}{k_{\text{дет}}} \cdot d_{\text{заг}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{рол}}$ – количество заходов резьбы на ролике; определяется конструктивно, исходя из необходимой прочности роликов и параметров резьбонакатного оборудования; $k_{\text{дет}}$ – количество заходов резьбы на накатываемой детали; $d_{\text{заг}}$ – диаметр заготовки; равен внутреннему диаметру накатываемой резьбы, мм.

На правый торец заготовки 1 осуществляется воздействие пуансоном 5 с силой P . Для того, чтобы компенсировать осевую силу P , левый торец поджимается плавающим упором 6 с силой $P_1 = P$. Пуансон 5 и плавающий упор 6 являются поршнями гидроцилиндров 7 и 8 соответственно. При этом полости 9 и 10 данных гидроцилиндров подключены к гидросистеме параллельно, таким образом, чтобы давление жидкости в данных полостях было одинаковым. Внутренние диаметры гидроцилиндров 7 и 8 равны, что обеспечивает равенство сил P и P_1 . Полость 10 гидроцилиндра 8 имеет вывод на слив через клапан 11, срабатывающий, если давление в полости 10 превысит величину:

$$p = \frac{P_1}{F_1 \cdot \zeta}, \quad (3)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения отверстия гидроцилиндра 8.

ζ – КПД гидроцилиндра.

Заготовка 1 вместе с пуансоном 5 и плавающим упором 6 имеет возможность свободного вращения вокруг своей оси.

Накатывание резьбы предлагаемым способом происходит следующим образом. Роликам 4 сообщается вращательное движение V . Одновременно в полости 9 и 10 гидроцилиндров 7 и 8 подается жидкость под давлением p . Под действием сил P и P_1 заготовка 1 начинает деформироваться, увеличиваясь в диаметре. Выступы резьбы роликов 4 препятствуют течению металла заготовки 1 в радиальном направлении и формируют впадины резьбы на накатываемой заготовке. При этом за счет сил трения между заготовкой 1 и вращающимися роликами 4, ей также сообщается некоторое вращательное движение V_1 . Таким образом, на заготовке формируется винтовой профиль накатываемой резьбы.

Поскольку угол подъема резьбы на роликах 4 на всем протяжении формирования резьбы будет больше, чем на заготовке 1, заготовка будет вывинчиваться из роликов, т. е. получать осевое перемещение в направлении плавающего упора 6. Как только торец заготовки 1 начнет давить на плавающий упор 6, давление в полости 10 гидроцилиндра 8 превысит величину p , что

вызовет срабатывание клапана 11. Жидкость из полости 10 начнет уходить на слив и плавающий упор 6 начнет смещаться, компенсируя осевое перемещение заготовки 1.

Как только на заготовке будет сформирован полный профиль резьбы, жидкость из полостей 9 и 10 гидроцилиндров 7 и 8 отводится на слив, пуансон 5 и ролики 4 отводятся от заготовки 1, и она извлекается.

Уменьшение длины заготовки после накатывания прямоугольной резьбы можно определить по формуле:

$$\Delta l = \frac{(d^2 - d_1^2) \cdot l}{2 \cdot d_1^2}, \quad (4)$$

где d, d_1 – соответственно, наружный и внутренний диаметры накатываемой резьбы, мм;
 l – длина накатываемой резьбы, мм.

Предлагаемый способ позволяет накатывать относительно короткие наружные резьбы (с отношением длины к диаметру не более 5), которые сложно получить другими способами, например, прямоугольные, упорные и крупные трапецеидальные. Аналогичным образом могут быть накатаны и внутренние резьбы. В качестве оборудования для реализации предлагаемого способа могут использоваться гидравлические прессы, оснащенные специальными резьбонакатными приспособлениями, или

трехроликовые резьбонакатные полуавтоматы, оснащенные дополнительными гидроцилиндрами.

К недостаткам способа следует отнести сложность применяемого оборудования и относительно невысокую производительность обработки. В связи с этим самой предпочтительной областью применения этого способа является накатывание тяжело нагруженных резьб на ответственных деталях машин.

Исследования новых способов накатывания резьб проводятся при поддержке гранта Президента РФ МК-2575.2005.8

Литература:

- 1 Голенков В.А. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко. – М.: Машиностроение, 1997. – 226 с.
- 2 Патент РФ № 2253534(04) Способ накатывания наружных резьб // Степанов Ю.С., Киричек А.В., Афонин А.Н. [и др.]. – Оpubл. 10.06.05, Бюл. №16.
- 3 Патент РФ №2253535(04) Устройство для накатывания крупных наружных резьб // Степанов Ю.С., Киричек А.В., Афонин А.Н. [и др.]. – Оpubл. 10.06.05, Бюл. №16.
- 4 Писаревский М.И. Новый инструмент для накатывания резьб и шлицев. – Л.: Машиностроение, 1966. – 150 с.
- 5 Якухин В.Г. Изготовление резьб. Справочник / В.Г. Якухин, В.А. Ставров. – М.: Машиностроение, 1989. – 192 с.

УДК 621.914.7+621.992.5

Асп. Бородин М.В., канд. техн. наук Брусов С.И., д-р техн. наук, проф. Тарапанов А.С.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)541503; E-mail: tmsi@ostu.ru

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

In the issue the calculation method of the roughness of a helix surface with the round dissection is developed, during which analysis are determined of helicoids parameters and turning tool geometry on the basis mathematical display of the kinematical scheme of processing the helix surfaces.

Одним из наиболее важных внутренних параметров, влияющим на производительность, коэффициент полезного действия и ресурс работы винтовых насосов, является шероховатость рабочих поверхностей винтов, понижение которой приводит к увеличению КПД насоса [1, 2].

В связи с тем, что шероховатость рабочих поверхностей является одной из важнейших характеристик, определяющих работоспособность насоса, актуальным представляется прогнозирование шероховатости поверхности при различных методах обработки, что создает базу

для управления процессом механической обработки резанием.

Сформировавшееся в последние годы учение об инженерии поверхности позволяет аналитическим путем определить параметры шероховатости и связать их с параметрами режима резания и эксплуатационными характеристиками получаемой поверхности. Так как на формирование профиля шероховатости при всех методах оказывают влияние одни и те же факторы, в каждом конкретном случае различающиеся лишь интенсивностью воздействия, то данный подход

может быть применен для процессов лезвийной обработки со сложной кинематикой.

Общая формула средней высоты профиля шероховатости для всех методов механической обработки имеет следующий вид [3]:

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (1)$$

где h_1 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента;

h_2 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности;

h_3 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки;

h_4 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента.

Составляющая профиля шероховатости h_1 , обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, при лезвийной обработке определяется из следующих зависимостей:

$$1) \text{ при } \varphi < \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r} :$$

$$h_1 = r(1 - \cos \varphi_1) + \frac{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi_1 [s - r(\sin \varphi_1 + \sin \varphi)] - r \operatorname{tg}(\cos \varphi_1 + \cos \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}; \quad (2)$$

$$2) \text{ при } \varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r} :$$

$$h_1 = s^2/8r; \quad (3)$$

$$3) \text{ при } \varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r} :$$

$$h_1 = r(1 - \cos \varphi_1) + \sin \varphi_1 \times [s \cdot \cos \varphi - \sqrt{s \cdot \sin \varphi (2r - s \cdot \sin \varphi)}]; \quad (4)$$

$$4) \text{ при } \varphi < \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 > \arcsin \frac{s}{2r} :$$

$$h_1 = 2(1 - \cos \varphi) + \sin \varphi \times [s \cdot \cos \varphi - \sqrt{s \cdot \sin \varphi (2r - s \cdot \sin \varphi)}]; \quad (5)$$

где φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы режущего инструмента в плане;

r – радиус при вершине режущей части инструмента.

Составляющая профиля шероховатости h_2 , обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, не может быть постоянной в пределах угла контакта инструмента с заготовкой, поскольку в каждый

момент времени меняется толщина срезаемого слоя и рабочие углы на каждом участке зуба инструмента и, соответственно, составляющие силы резания.

$$h_2 = \frac{P_{изг}}{j}, \quad (6)$$

где $P_{изг}$ – изгибающая сила, действующая на заготовку со стороны инструмента;

j – жесткость технологической системы.

$$P_{изг} = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}, \quad (7)$$

где P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания [4].

Пластическое оттеснение обрабатываемого материала в зоне резания приводит к увеличению высоты образующей шероховатости на величину h_3 , которая рассчитывается по формуле:

$$1) \text{ при } \varphi < \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r} :$$

$$h_3 = \frac{b_{сдв}}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}}; \quad (8)$$

$$2) \text{ при } \varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r} :$$

$$h_3 = \frac{b_{сдв}(2s + b_{сдв})}{32r}; \quad (9)$$

$$3) \text{ при } \varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r} :$$

$$h_3 = \frac{b_{сдв}}{\frac{2r}{s} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}}; \quad (10)$$

$$4) \text{ при } \varphi < \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 > \arcsin \frac{s}{2r},$$

$$h_3 = \frac{b_{сдв}}{\frac{2r}{s} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi}}; \quad b_{сдв} = 0,5\rho \left(1 - \frac{\tau_{сдв}}{\sqrt{\tau_{сдв}^2 + \sigma_T^2}} \right), \quad (11)$$

где $b_{сдв}$ – величина пластического оттеснения;

$\tau_{сдв}$ – прочность обрабатываемого материала на сдвиг;

σ_T – предел текучести обрабатываемого материала;

ρ – радиус вспомогательной режущей кромки.

Составляющая профиля шероховатости h_4 , обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента, определяется средней высотой профиля шероховатости на вершине инструмента, т.е. $h_4 = R_{zв.р.}$ и зависит от технологии заточки и режимов резания.

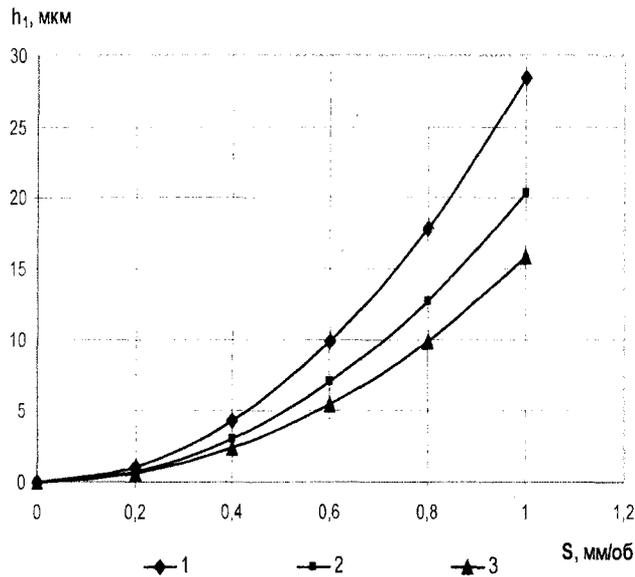


Рис. 1. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, от подачи на оборот при изменении радиуса резца с круглой многогранной пластиной: 1- $r = 5$ мм; 2- $r = 7$ мм; 3- $r = 9$ мм ($n_n = 200$ об/мин; $R_{заг} = 34$ мм; $P = 28$ мм; $r_n = 27$ мм)

С увеличением радиуса круглого резца уменьшается составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности (рис. 1). Это же наблюдается и при

увеличении радиуса при вершине резца и фрезы (рис. 2, рис. 3).

Средняя высота профиля шероховатости Rz , с увеличением радиуса круглого резца и радиуса при вершине уменьшается (рис. 4, рис. 5).

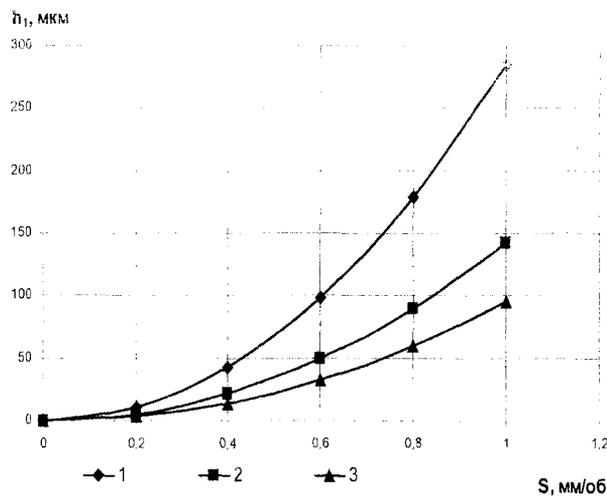


Рис. 2. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, от подачи на оборот при изменении радиуса при вершине резца 1- $r = 0,5$ мм; 2- $r = 1$ мм; 3- $r = 1,5$ мм ($n_n = 200$ об/мин; $\varphi_1 = 40^\circ$, $\varphi = 45^\circ$; $R_{заг} = 34$ мм; $P = 28$ мм; $r_n = 27$ мм)

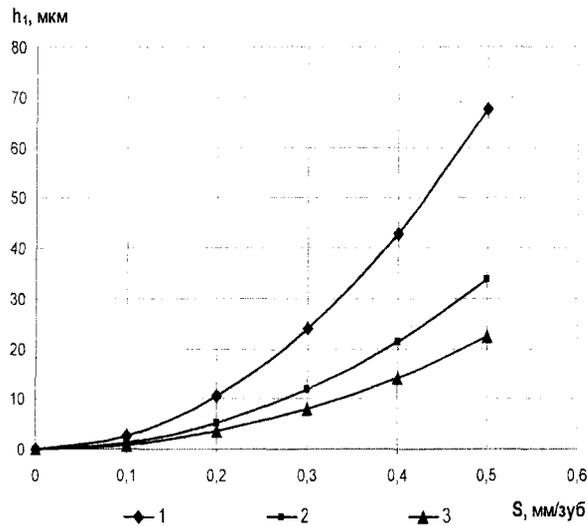


Рис. 3. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, от подачи на зуб при изменении радиуса при вершине дисковой фрезы $1-r = 0,5$ мм; $2-r = 1$ мм; $3-r = 1,5$ мм ($n = 200$ об/мин, $n_n = 10$ об/мин; $\varphi_1 = 30^\circ$, $\varphi = 45^\circ$; $R = 34$ мм; $R_\varphi = 180$ мм; $P = 28$ мм)

На рис. 6 представлена зависимость составляющей профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, при изменении мгновенного угла поворота фрезы, т. е. с увеличением подачи наблюдается увеличение составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

При изменении соотношения частоты вращения фрезы и винта составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности практически не изменяется.

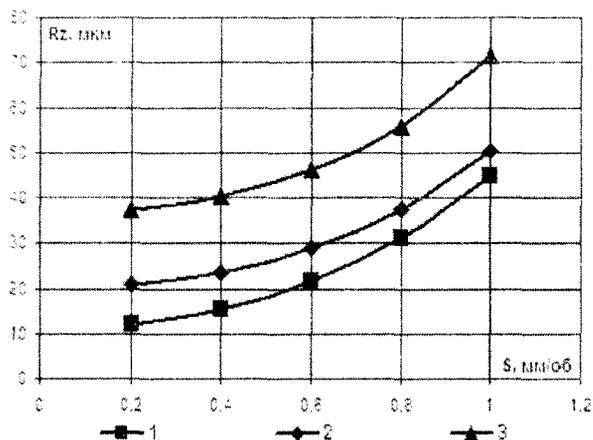


Рис. 4. График зависимости средней высоты профиля шероховатости Rz от подачи на оборот при изменении радиуса резца с круглой многогранной пластиной: $1-r = 9$ мм; $2-r = 7$ мм; $3-r = 5$ мм ($n_n = 200$ об/мин; $R_{из} = 34$ мм; $P = 28$ мм; $r_n = 27$ мм)

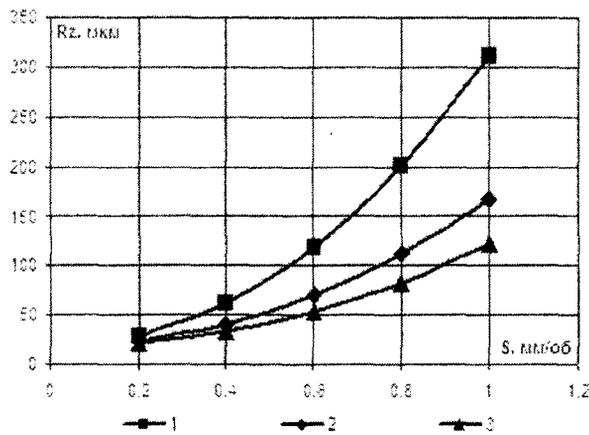


Рис. 5. График зависимости средней высоты профиля шероховатости Rz от подачи на оборот при изменении радиуса при вершине резца: 1- $r = 0,5$ мм; 2- $r = 1$ мм; 3- $r = 1,5$ мм ($n = 200$ об/мин; $\varphi_1 = 40^\circ$, $\varphi = 45^\circ$; $R_{изг.} = 34$ мм; $P = 28$ мм; $r_0 = 27$ мм)

С увеличением угла в плане составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности практически не изменяется, но при увеличении вспомогательного угла в плане h_2 уменьшается, вследствие снижения угла контакта заготовки и инструмента (рис. 6, рис.8).

С увеличением радиуса инструмента (рис. 6, рис. 7) составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности увеличивается незначительно.

Анализ полученных результатов показывает, что высотные параметры шероховатости деталей при лезвийной обработке зависят от режимов обработки, геометрии режущей части инструмента, его заточки определяющей шероховатость режущей кромки, жесткости технологической системы, физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Методика расчета параметров шероховатости поверхности на основе подходов инженерии обработанной поверхности, может использоваться и для кинематически сложных процессов механической обработки, в частности, для обработки винтовых поверхностей.

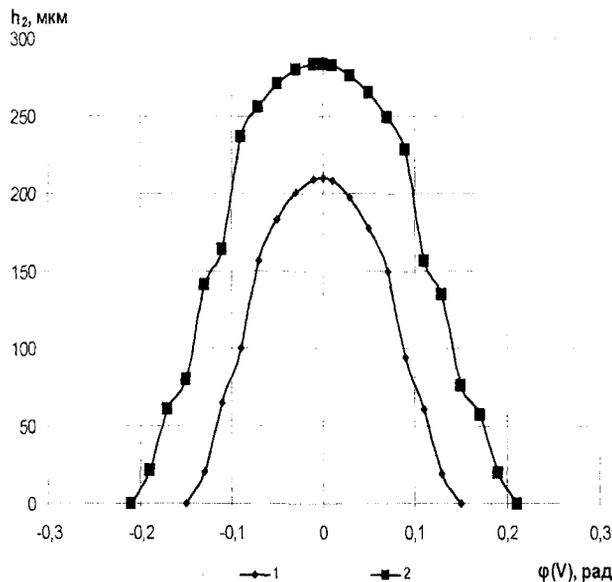


Рис. 6. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, при изменении мгновенного угла поворота фрезы: 1 - $\varphi(S) = 0,2$ рад, 2 - $\varphi(S) = 0,3$ рад ($n = 200$ об/мин, $n_s = 10$ об/мин; $\varphi_1 = 30^\circ$, $\varphi = 45^\circ$; $R = 34$ мм; $R_\phi = 180$ мм; $p = 4,5$ мм/рад)

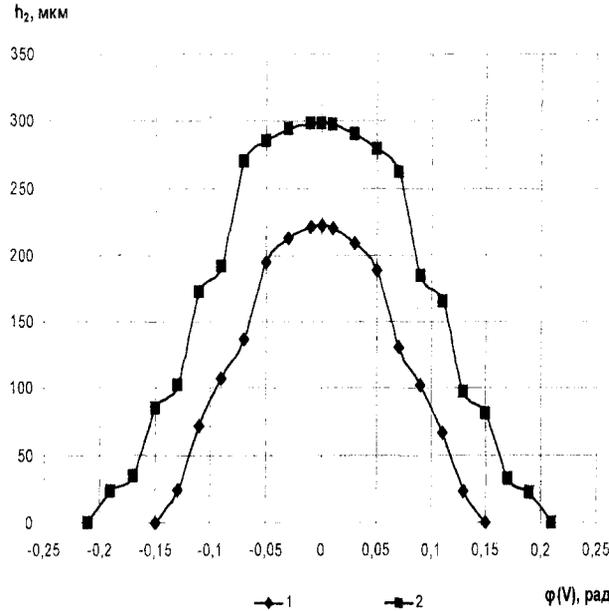


Рис. 7. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, при изменении мгновенного угла поворота фрезы: 1 - $\phi(S) = 0,2$ рад, 2 - $\phi(S) = 0,3$ рад ($n = 200$ об/мин, $n_s = 10$ об/мин; $\phi_1 = 30^\circ$, $\phi = 45^\circ$, $R = 34$ мм; $R_\phi = 185$ мм; $r = 4,5$ мм/рад)

В уравнение, определяющее шероховатость поверхности необходимо подставить составляющие профиля шероховатости, обусловленные геометрией рабочей части инструмента и кинематикой её относительного перемещения относительно детали и деформациями технологической системы «станок-приспособление-инструмент-деталь».

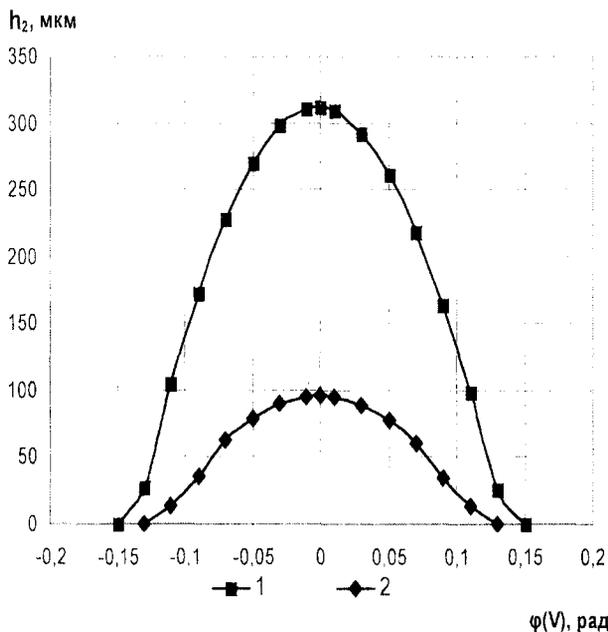


Рис. 8. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, при изменении мгновенного угла поворота фрезы: 1 - $\phi = 45^\circ$, $\phi_1 = 40^\circ$, 2 - $\phi = 55^\circ$, $\phi_1 = 30^\circ$ ($n = 200$ об/мин, $n_s = 10$ об/мин; $\phi(S) = 0,2$ рад, $R = 34$ мм; $R_\phi = 180$ мм; $r = 4,5$ мм/рад)

Проанализировав, полученные результаты на основе положений учения об инженерии обработанной поверхности зависимостей выяснилось, что на величину шероховатости обработанной винтовой поверхности основное влияние оказывают кинематические особенности процессов, геометрия инструмента и подача.

В зависимости от вида обработки степень влияния каждого из этих факторов на образование шероховатости будет различной.

Литература:

- 1 Балденко Д.Ф. Винтовые насосы / Д.Ф. Балденко, М.Г. Бидман, В.М. Калишевский и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
- 2 Жмудь А.Е. Винтовые насосы с циклоидальным зацеплением / А.Е. Жмудь. – М.: Машигиз, 1963. – 153 с.
- 3 Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
- 4 Бородин М.В. Определение силовых характеристик обработки винтовых поверхностей роторов героторных насосов / М.В. Бородин, С.И. Брусов, А.С.Тарапанов // Труды международного научного симпозиума «Гидродинамическая теория смазки – 120лет». Т.2. – Орел: ОрелГТУ, 2006. –С.257–265. УДК 621.787.6

Д-р техн. наук, проф. *Киричек А.В., д-р техн. наук **Соловьёв Д.Л.
(*Орловский государственный технический университет,
**Муромский институт Владимирского государственного университета)
Россия, г. *Орел, тел. (4862)555524; E-mail: avk@ostu.ru,
г. **Муром, тел. (49234)32022; E-mail: murstin@yandex.ru

ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЛОНГИРОВАННЫХ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

It is designed new type surface strain hardening hole operated shocking impulse, that allows to raise depth and degree hardening.

В настоящее время в машиностроении широкое применение находят детали типа гильз и втулок. Условия их эксплуатации часто требуют обеспечения низкой шероховатости, высокой твердости и большой глубины упрочненного поверхностного слоя внутренних цилиндрических поверхностей. В связи с этим в технологическом процессе изготовления таких деталей широко применяются различные способы упрочнения: термообработка (ТО), химико-термическая обработка (ХТО), поверхностное пластическое деформирование (ППД) и др.

Внедрение способов ППД исключает последующую механическую обработку, необходимую после ТО и ХТО, что снижает расход металла, уменьшает трудоемкость, снижает затраты по инструменту, электроэнергии, вспомогательным материалам, амортизационным отчислениям. После ППД в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, что наряду с повышением твердости и улучшением микрогеометрии поверхности упрочненной детали приводит к значительному повышению их долговечности в различных условиях эксплуатации [1, 2].

Обработка ППД охватывает практически весь используемый в промышленности диапазон размеров отверстий диаметром 2...500 мм и выше, длиной свыше 3...5 м (сквозных, глухих, ступенчатых). Для упрочнения ППД внутренних цилиндрических поверхностей большого диаметра (> 50 мм) используется раскатывание, выглаживание или центробежная обработка, для более мелких диаметров – дорнование. Недостатками этих способов является высокая энергоемкость и сложность используемого оборудования при получении большой глубины и степени упрочнения.

Анализ статических и динамических способов ППД показал, что динамическое воздействие на материал энергетически более выгодно, по сравнению со статическим. Однако одной из главных проблем успешного применения динамической нагрузки при ППД является низкая точность при регулировании показателей качества поверхностного слоя, т.к. при одинаковой кинетической энергии удара, энергия, расходуемая на пластическую деформацию, может быть разной. На практике традиционно используются импульсы с большой амплитудой и малой длительностью, генерируемые в примитивных ударных системах, что приводит к потерям энергии удара, расходуемой на пластическую деформацию. Исследованиями ударных процессов [2] установлено, что наибольшее количество энергии передается упрочняемому металлу ударными импульсами прямоугольной (трапецидальной) или близкой к ней пролонгированной формы. Для генерирования пролонгированных ударных импульсов необходимо в качестве рабочих элементов вместо шаров или роликов использовать бойки вытянутой цилиндрической формы, длина которых удовлетворяет условию $L_1 > 0,05...0,08$ м. Более рациональное использование энергии удара при упругопластической деформации позволяет создавать глубоко упрочненные поверхностные слои материала, расширяя возможности ППД.

В результате разработан ряд ранее не использовавшихся схем осуществляющих пролонгированное импульсное нагружение при обработке отверстий большого диаметра ППД. Схемы основываются на базе

известных способов обработки внутренних цилиндрических поверхностей, использующих для нагружения динамическую энергию.

При центробежной обработке бойковым инструментом (рис. 1) на упрочняемую поверхность наносят последовательные удары рабочими элементами – бойками, свободно сидящими в радиальных отверстиях вращающегося диска. Под действием центробежных сил рабочие элементы в радиальных отверстиях занимают крайнее положение, а при ударе об обрабатываемую поверхность опускаются на глубину, равную натягу, отдавая энергию, создаваемую центробежной силой.

При ударном раскатывании (рис. 2) рабочие элементы – бойки, установленные в сепараторе, вращаются между поверхностью обрабатываемого отверстия и поверхностью кулачковой оправки, совершая переносное или планетарное движение. Кулачковая оправка представляет собой цилиндр, на котором равномерно по окружности выполнено несколько равных площадок (лысок) или профильных канавок. Обкатывая выступающие участки кулачковой оправки, бойки совершают быстрые радиальные перемещения, ударяя с большой частотой по обрабатываемой поверхности в момент заклинивания, при этом натяг максимален. При перемещении бойка на цилиндрическом участке кулачковой оправки происходит обкатывание. При прохождении бойком лыски натяг минимален или равен нулю. Натяг изменяется от минимального до максимального в течение примерно $10^3 \dots 10^4$ с. Число таких импульсов за один оборот раскатника равно произведению числа лысок на число инструментов.

Реализовать пролонгированное ударное воздействие в очаге деформации за счет рекуперации отраженных волн деформации, формирующих хвостовую часть ударного импульса, позволяет ударная система боек-волновод [2]. Нагружение ударными импульсами должно происходить в условиях предварительного статического поджатия инструмента к очагу деформации, которое не позволяет прерывать его контакт после действия головной части импульса, давая возможность для повторного воздействия отраженных волн деформации после удара.

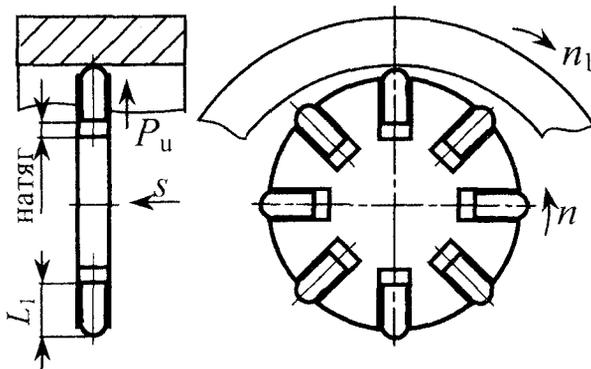


Рис. 1. Центробежная обработка бойковым инструментом

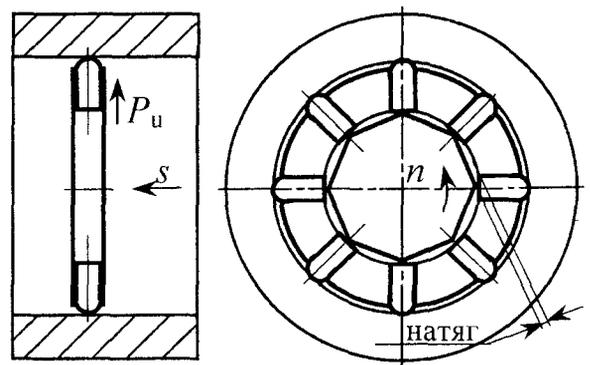


Рис. 2. Ударное раскатывание бойковым инструментом

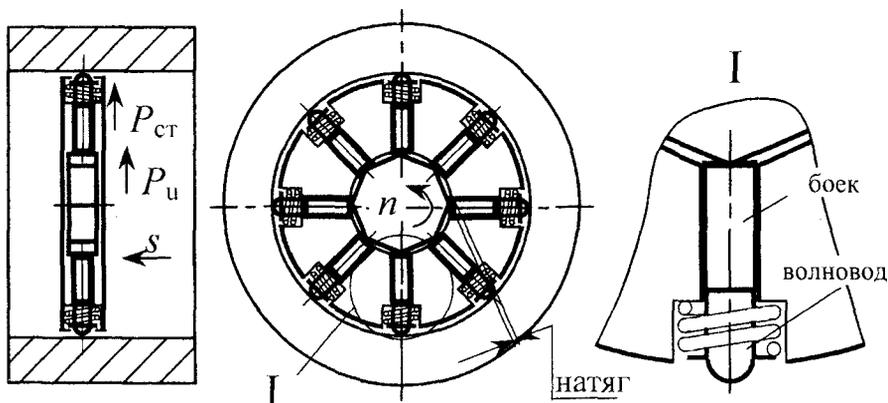


Рис. 3. Статико-импульсное раскатывание

В результате предложена схема статико-импульсной обработки (СИО) для ударного раскатывания (рис. 3). Устройство для нагружения содержит вращающийся диск с радиальными отверстиями, в которых размещается ударная система боек-волновод. Отверстия имеют две ступени. В первой (меньшего диаметра) свободно размещается боек и частично волновод, а во второй (большого диаметра) оставшаяся часть волновода и пружина, расположенная между пояском волновода и торцевой частью второй ступени отверстия.

При размещении устройства внутри обрабатываемого отверстия волновод упирается в нагружаемую поверхность, сжимая пружину. В результате волновод воздействует на очаг деформации под действием

силы упругости сжатой пружины. Обкатывая, выступающие участки кулачковой оправки совершают быстрые радиальные перемещения, ударяя с большой частотой по статически поджатому волноводу в момент заклинивания.

Достоинством такой схемы является увеличение энергии удара, генерируемой бойком, за счет увеличения массы рабочих элементов и увеличение количества энергии удара расходуемой на пластическую деформацию за счет увеличения длительности ударных импульсов. Коэффициент передачи энергии удара упрочняемому материалу может достигать до 86 %.

В результате применения предлагаемых схем может быть получена высокая степень упрочнения до 60...100 % и повышена глубина упрочнения в 1,5...2 раза, достигая 3 мм и более.

Исследования выполнены при поддержке гранта МД-2698.2007.8.

Литература:

1 Монченко В.П. Деформирующая обработка отверстий втулок и гильз гидроневмоцилиндров / В.П. Монченко, В.В. Белотелов. – М.: НИИМАШ, 1976. – 91 с.

2 Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьёв, А.Г. Лазуткин // Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
УДК 621.914.7+621.992.5

Асп. Бородин М.В., канд. техн. наук Брусов С.И., д-р техн. наук, проф. Тарапанов А.С.

(Орловский государственный технический университет)

Россия, Орел, тел. (4862)541503; E-mail: tmsi@ostu.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ РОТОРА ГЕРОТОРНОГО ОДНОВИНТОВОГО НАСОСА

In clause the way of increase of efficiency of screw surface processing of the gerotor pump is offered.

Механическая обработка роторов героторных одновинтовых насосов представляет большую проблему для производства. Это связано с жесткостью заготовки и постоянным изменением толщины срезаемого слоя. А также с винтовой поверхностью ротора, представляющей собой в сечении окружность (образующую), с направляющей синусоидой. Наиболее распространенными способами получения подобных деталей является их лезвийная обработка дисковой фрезой или обработка точением [1].

Недостатками этих способов являются низкая производительность при изготовлении длинных винтов и неудовлетворительная точность, из-за одностороннего действия сил резания и большого прогиба жестких длинных винтов.

Для устранения этих недостатков в Орловском государственном техническом университете предложено обрабатывать ротор комплектом инструментов, состоящим из трех фрез. На рис. 1 представлена схема обработки ротора героторного одновинтового насоса комплектом инструментов состоящим из трех фрез; на рис. 2 – схема взаимного расположения фрез и обрабатываемой заготовки ротора, поперечный разрез А – А на рис.

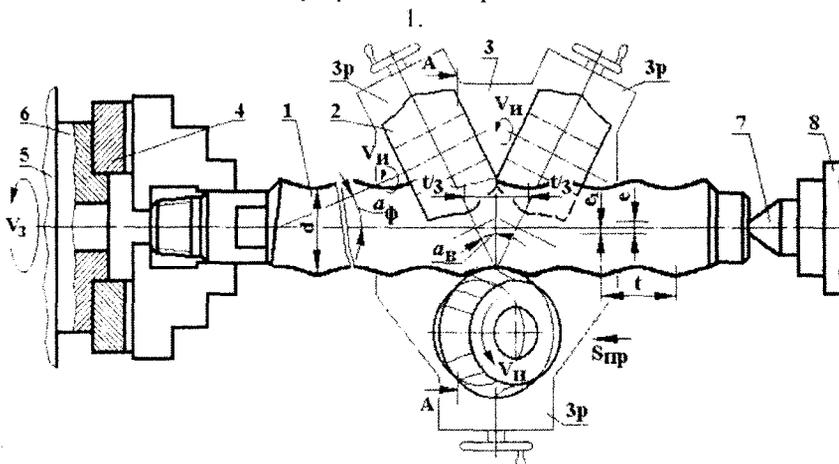


Рис. 1. Схема обработки ротора героторного одновинтового насоса

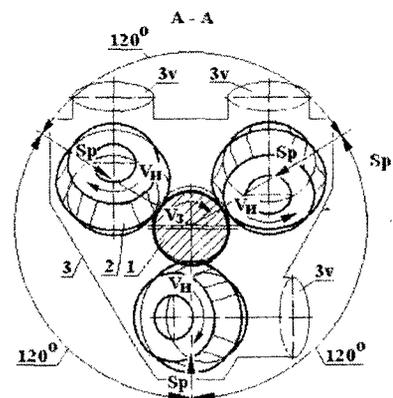


Рис. 2. Схема взаимного расположения фрез и обрабатываемой заготовки ротора

комплектom инструментов, состоящим из трех фрез

Схема обработки следующая. Фрезе сообщают независимое вращение относительно собственной оси, а заготовке – вращательное движение, согласованное с продольной подачей инструмента, равной шагу обрабатываемого винта. Обработку проводят одновременно комплектом инструментов, состоящим из трех равно расположенных друг от друга в поперечной плоскости фасонных фрез и удаленных друг от друга в осевом направлении на расстоянии одной трети шага. Оси вращения фрез расположены под углом к оси заготовки, равным углу подъема витков винтовой поверхности, а сами фрезы имеют независимый индивидуальный или общий привод.

Инструменту – дисковой фасонной фрезе 2, высотой не менее шага обрабатываемого винта 1, сообщают независимое вращение с частотой V_n относительно собственной оси, а заготовке – вращательное движение с частотой V_z , согласованное с продольной подачей S_{np} инструмента, равной шагу t винта 1.

Обработку ведут одновременно комплектом инструментов, состоящим из трех равно расположенных друг от друга в поперечной плоскости фасонных фрез 2, и удаленных друг от друга в осевом направлении на расстоянии $t/3$ – одной трети шага, где t – шаг обрабатываемого винта 1, мм.

Оси вращения фрез 2 расположены под углом α_ϕ к оси заготовки 1, равным углу α_b подъема витков винтовой поверхности, т. е. $\alpha_\phi = \alpha_b$. Фрезы имеют независимый индивидуальный привод радиальной подачи Z_p , индивидуальный привод вращательного движения Z_v и смонтированы в специальной головке 3. Обработка предложенным устройством осуществляется на токарном станке, на котором оно устанавливается вместо резцедержателя на поперечный суппорт, следующим образом. Заготовка винта с предварительно обработанными базовыми поверхностями устанавливается в трехкулачковом самоцентрирующем патроне 4 в шпинделе 5 передней бабки 6 станка. Свободным торцом заготовка вводится в центральное отверстие головки и поджимается центром 7 задней бабки 8, при этом фрезы в головке радиально разведены. Включается вращательное движение шпинделя с частотой V_z , вращательное движение фрез с частотой V_n и дается радиальная подача S_p путём вращения маховичка индивидуального привода радиальной подачи Z_p . Каждая фреза устанавливается на глубину резания, равную $h/3$, где h – общий припуск, оставленный на фрезерование с учетом расстояния между вершиной и впадиной винтовой поверхности. Деление припуска h на три инструмента позволяет равномерно загрузить каждый инструмент и оказывать равные усилия воздействия фрез на нежесткую заготовку. После выставления каждой фрезы на свою глубину включается продольная подача S_{np} суппорта, равная:

$$S_{np} = t \text{ мм/об}, \quad (1)$$

где t – шаг обрабатываемого винта, мм.

С целью подтверждения эффективности предложенного способа обрабатывался ротор героторного одновинтового насоса с размерами: общая длина – 1282 мм, длина винтовой части 1208 мм, диаметр винта $d = \varnothing 27^{+0,05}$ мм, шаг $t = 28^{+0,01}$ мм, эксцентриситет $e_1 = 1,65$ мм, $e = 3,3$ мм, параметр шероховатости $R_a = 3,2$ мкм; винтовая поверхность однозаходная, левого направления; материал – сталь 18ХГТ ГОСТ 4543-74, твердость НВ 207-228, масса – 5,8 кг. Припуск на сторону под шлифование 0,25 мм. Заготовка – сталь горячекатаная круглая (ГОСТ 2590-71) диаметром 34 мм. Обработка проводилась на модернизированном токарно-винторезном станке модели 16К20, с инструментальной фрезерной головкой, установленной на суппорте, с тремя дисковыми фасонными фрезами из материала Р6М5, шириной $B_{\phi} = 32$ мм, диаметром 50 мм. Частота вращения каждой из трёх фрез $V_n = 31,42$ м/мин, $n_n = 200$ об/мин, окружная скорость заготовки $V_z = 320$ мм/мин, $n_z = 3,8$ об/мин, продольная подача $S_{np} = 28$ мм/об, угол наклона витка винтовой поверхности $\alpha_b = 24^\circ 48'$. Требуемая точность винтовой поверхности достигнута через $T_m = 12,2$ мин (против $T_m^{баз} = 36,5$ мин при традиционном точении резцом на модернизированном токарном станке 1К62). Контроль проведён скобой индикаторной с индикатором ИЧ 10 Б по ГОСТ 577-68 (класс точности 1,0). Накопленная погрешность между любыми не соседними шагами не более 0,1 мм, просвет при контроле лекальной линейкой образующих по диаметру выступов – не более 0,4 мм, что допустимо по ТУ для предварительной обработки [2, 3].

Предложенный метод обработки роторов героторных одновинтовых насосов позволил расширить технологические возможности фрезерования открытых профилей, повысить производительность и точность обрабатываемой детали благодаря тому, что головка в комплекте из трех фрез, расположенных равномерно в окружном направлении, представляет собой подвижный люнет и уменьшить шероховатость благодаря трехкратному увеличению формообразующих лезвий.

Литература:

- 1 Брусов С.И. Комплексный анализ параметров лезвийной обработки винтовых поверхностей / С.И. Брусов, А.С.Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 128 с.
- 2 Патент РФ №2298458, МКИ В 23 С 3/00, В 23 G 1/32. Способ фрезерования винтов с круглой винтовой поверхностью с большим шагом и малым расстоянием между вершиной и впадиной / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов, М.В. Бородин, Б.И. Афанасьев, Д.С. Фомин, С.И. Брусов. – Опубл. 10.05.2007. Бюл. №13. – 6 с.

3 Патент РФ №2307725, МКИ⁷ В 23 С 3/00, В 23 G 1/32. Устройство для фрезерования винтов с круглой винтовой поверхностью с большим шагом и малым расстоянием между вершиной и впадиной / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов, М.В. Бородин, Б.И. Афанасьев, Д.С. Фомин, С.И. Брусов. – Оубл. 10.10.2007. Бюл. №28. – 7 с.

УДК 621.787.6

Д-р техн. наук, проф. *Киричек А.В., д-р техн. наук **Соловьёв Д.Л., асп. *Поляков А.В.

(*Орловский государственный технический университет,

**Муромский институт Владимирского государственного университета)

Россия, г. *Орел, тел. (4862)555524; E-mail: avk@ostu.ru,

г. **Муром, тел. (49234)32022; E-mail: murstin@yandex.ru

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ УДАРА ПРИ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОМ ДЕФОРМАЦИОННОМ УПРОЧНЕНИИ

For the ensuring the lasting and capacity for work of elements, which work in the heavy conditions, the effective used the durables processing.

Одной из наиболее перспективных и простых является обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД). Результаты ППД во многом зависят от способа сообщения энергии в очаг деформации. В зависимости от типа сообщаемой энергии способы ППД подразделяются на статические (обкатывание, выглаживание, дорнование), динамические (дробеструйная обработка, центробежная обработка, чеканка) и статико-динамические (ультразвуковая обработка, ударное раскатывание, чеканка по предварительно статически нагруженному инструменту). Энергетически динамическое воздействие на материал более выгодно, по сравнению со статическим, необходимым для достижения аналогичных результатов. Однако существенным недостатком динамических способов является то, что энергия удара, расходуемая на пластическую деформацию может быть каждый раз разной и зависеть от ряда параметров, которые при упрочнении ППД ранее не учитывались. Поэтому актуальной проблемой ППД является решение задачи по созданию условий для более эффективного использования энергии удара при упругопластическом деформировании.

Известно, что ударные импульсы с одинаковой кинетической энергией могут характеризоваться различной формой (изменением амплитуды, т.е. силы удара по времени) в зависимости от которой и будет изменяться энергия удара, расходуемая на пластическую деформацию. С увеличением скорости нагружения время на протекание пластической деформации будет уменьшаться. Поэтому для более полной реализации энергии удара при упругопластической деформации значительно эффективнее ударные импульсы с большой длительностью. При ППД традиционно используются импульсы с большой амплитудой и малой длительностью, генерируемые в примитивных ударных системах.

В результате выполненных исследований установлено, что для увеличения длительности ударных импульсов нужно увеличивать длину бойка. На основании этого получены рекомендации по геометрическим параметрам бойка. Установлено, что для эффективной передачи энергии удара при упругопластическом деформировании целесообразно использовать боек цилиндрической формы с длиной не менее 0,07...0,12 м и диаметром не менее 20 мм. Также установлено, что при ударе бойком через промежуточное звено – волновод, появляется возможность использовать энергию отраженных волн деформации, формирующихся в виде хвостовой части импульса, для повторного нагружения. Рациональное использование хвостовой части импульса позволяет интенсифицировать упругопластическую деформацию. Для использования отраженных волн деформации необходимо, чтобы система боек – волновод – инструмент – нагружаемая поверхность после удара находилась в жестком контакте друг с другом в течение времени, превышающем длительность ударного импульса в два и более раза. Поэтому производить нагружение пролонгированными ударными импульсами, состоящими из головной и хвостовой части, можно только при статико-импульсной обработке (СИО). Предварительное статическое поджатие волновода с инструментом на конце не позволяет ему отскакивать от нагружаемой поверхности после удара, обеспечивая рекуперацию отраженных волн деформации. Боек и волновод при СИО должны быть подобраны так, чтобы обеспечивать форму ударного импульса, обеспечивающую наибольшую передачу энергии удара, т.е. наибольший КПД процесса.

Проведены исследования параметров ударной системы боек-волновод из условия обеспечения максимального КПД процесса.

Установлено, что также как и боек, волновод должен иметь гладкую цилиндрическую форму, что позволяет генерировать прямоугольные импульсы несущие наибольшее количество энергии. Поэтому параметрами ударной системы, регулирующей форму ударного импульса, являются длины, а также

акустические жесткости бойка и волновода, характеризующиеся свойствами материалов из которых они изготовлены и площадью поперечного сечения.

В ходе проведенных исследований получены теоретико-экспериментальные зависимости, описывающие форму ударного импульса в упругопластическом очаге деформации. При этом свойства нагружаемого материала и условия контакта инструмента и детали (кривизна и размеры соприкасающихся поверхностей инструмента и детали) выражались через коэффициент сопротивления материала внедрению инструмента k .

При исследовании формы ударного импульса в очаге деформации в зависимости от соотношения ударных жесткостей поверхностей бойка и волновода в диапазоне $r = 1...4$; длин бойка и волновода, соответственно, $n = 2...5$; коэффициента сопротивления внедрению $k = 2,5 \cdot 10^8...7,5 \cdot 10^8$ Н/м установлено, что при постоянном соотношении площадей поперечных сечений бойка и волновода r с увеличением соотношения их длин n , амплитуда (величина контактной силы) головной части и амплитуда хвостовой части импульса возрастают, причем хвостовой в большей степени. При постоянном соотношении длин бойка и волновода n и с увеличением r максимальная амплитуда головной части импульса уменьшается, а хвостовая незначительно увеличивается.

Изменяя, таким образом, геометрические и акустические параметры ударной системы n и r может быть выбрана форма головной и хвостовой части ударного импульса, обеспечивающие наибольшую передачу энергии удара нагружаемому материалу, т.е. максимальный КПД.

В результате установлено, что максимальное количество энергии удара $\eta = 86\%$ расходуется на пластическую деформацию при $r = 1$; $n = 3$ и значения коэффициента сопротивления внедрению, равном $k = (4,5...5,5) \cdot 10^8$ Н/м (рис. 1). При увеличении значения k необходимо выбирать соотношение акустических жесткостей бойка и волновода r ближе к единице. С увеличением соотношения акустических жесткостей бойка и волновода КПД будет уменьшаться. С увеличением соотношения длин бойка и волновода КПД будет уменьшаться не значительно, несмотря на то что увеличивается количество импульсов участвующих в упругопластической деформации. Снижение КПД при увеличении параметра n объясняется увеличением амплитуды головной части импульса и соответственно коэффициента сопротивления внедрению k , что ухудшает условия контакта при действии хвостовой части импульса. Исходя из проведенных исследований, рекомендуемый диапазон геометрических и акустических параметров ударной системы боек-волновод, используемой для нагружения статико-импульсной обработкой, может быть определен, соответственно, как $n = 3...5$, $r = 1...3$.

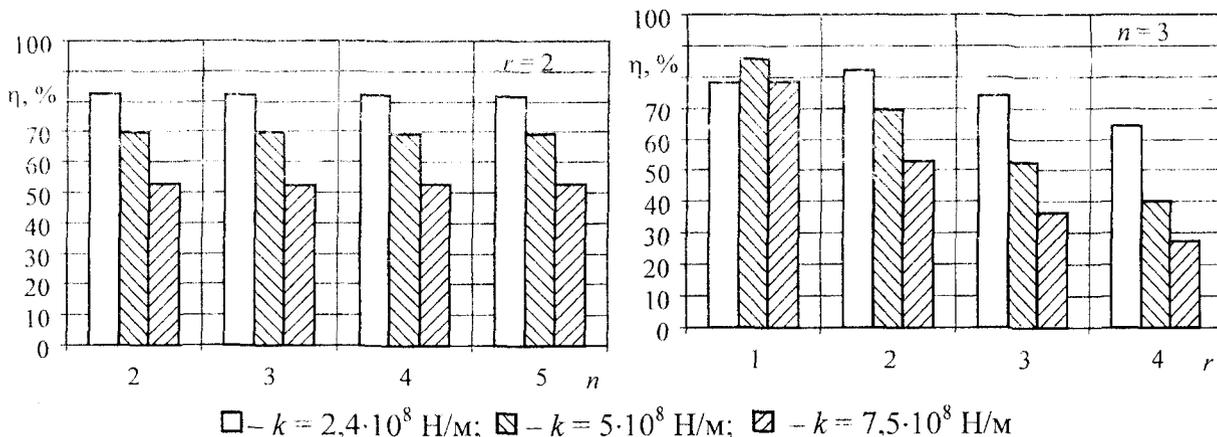


Рис.1. КПД динамического нагружения ударной системой боек-волновод при СНО в зависимости от соотношений акустической жесткости r и длин n бойка и волновода, при различных коэффициентах сопротивления внедрению k

Полученные результаты обеспечили возможность для нагружения ударными импульсами со значительно большей энергией до 300 Дж, чем это использовалось ранее (например, при чеканке энергия удара обычно не превышала 80 Дж). Это позволило значительно расширить диапазон регулирования показателей качества поверхностного слоя: получить на детали упрочненный поверхностный слой с глубиной до 10 мм и степенью упрочнения более 150%; поверхностный слой с малой глубиной до 3...5 мм и низкой шероховатостью (до $Ra = 1,6...0,08$ мкм).

Исследования выполнены при поддержке гранта МД-2698.2007.8

УДК 621.83

Маликов А.А., Валиков Е.Н., Ямников А.С.
 (Тульский государственный университет)
 Россия, г. Тула, тел. (4862)555524; E-mail: avk@ostu.ru,

ПРОГРЕССИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЗУБООБРАБОТКИ

In the article is described the comparative characteristics, the different methods of clean processing of tooth's. Is shown, that the use original method of shaving by the parallel axis storage and instrument very effective. This method is mare in the Tula state university.

В статье Ю.А. Евстегнеева [1], посвященной обзору развития зубообрабатывающих станков, отмечена общая тенденция развития металлообработки в нашей и зарубежной промышленности – приближение формы заготовок к окончательной форме изделий, например, применение метода пластической деформации (МПД) – накатки зубьев конических и цилиндрических зубчатых колёс. Внедрение МПД потребует проведения исследований для определения средств повышения производительности окончательной обработки нагартованных поверхностей повышенных твердостей. Зубошевингование в этом случае не обеспечивает достаточной стойкости инструмента, а зубошлифование малопроизводительно и дорого. На заводах Форда применяют холодную калибровку вместо шевингования, что обеспечивает значительное повышение производительности.

В работе С.М. Башева, О.В. Берестенева и М.В. Хорунженко [2] говорится, что калибрование зубчатых колес фрезерованными зубьями уже сейчас обеспечивает такое же повышение точности, как и шевингование и улучшает чистоту поверхности до 8-9 класса по ГОСТ 2789-59. Оптимальная величина припуска при этом процессе определяется как 0,1...0,13 мм на сторону по нормали к поверхности калибруемого зуба.

В.В. Половников, П.Ф. Филиппов, В.А. Бодажков и Г.Г. Семибратов в своей работе [3] указывают, что зубчатые колеса, изготовленные горячей накаткой, имеют хорошее строение металла, а, следовательно, и большую усталостную прочность. Кроме того, в этом случае экономится металл и резко повышается производительность предварительной обработки зубьев.

Однако изготовление зубьев цилиндрических колес горячей накаткой имеет и недостатки. К первой группе дефектов можно отнести «гребешки» и «закаты». Гребешки (так называют наплывы металла на вершинах и торцах зубьев, образующиеся в результате избыточного течения металла, как это имеет место при ковке и штамповке) могут быть устранены последующей механической обработкой зубчатых колес (точением или шлифованием). Закаты относятся к группе дефектов, уходящих от поверхности металла вглубь его и их можно считать как бы «закатанными» в металл. Закаты на эвольвентной поверхности могут вызвать более раннее выкрашивание – «оспообразование» – при эксплуатации. Они, кроме того, могут служить источниками концентрации напряжений, понижающих усталостную прочность зуба. По опытным данным величина закатов колеблется от 0,01 до 0,2 мм; то есть для их удаления необходимо снимать припуск не менее 0,2 мм на сторону зуба.

В своей работе [3] Половников и его соавторы указывают на другую, не менее важную группу недостатков – низкую точность накатанных зубьев. Так для зубчатого колеса $m = 4$ мм; $z = 36$ среднее значение измеренных величин составило:

- 1) колебание длины общей нормали $FvWr = 90$ мкм (9-я степень точности);
- 2) разность окружных шагов $f_{p_i} = 25$ мкм (8-я степень точности);
- 3) отклонение основного шага $f_{pbr} = 62$ мкм (10-я степень точности);
- 4) радиальное биение зубчатого венца $F_{rr} = 120$ мкм (9-я степень точности);
- 5) погрешность профиля $f_{fr} = 98$ мкм (грубее 8-й степени точности).

Иначе говоря, кинематическая точность накатанных зубьев находится на уровне 9-й степени по ГОСТ 1643-56, а плавность, характеризующаяся разностью окружных шагов, на уровне 8-ой степени точности. У некоторых заготовок колебание длины общей нормали достигало 0,2...0,3 мм; поэтому для заготовок полученных горячим накатыванием авторы рекомендуют следующий технологический процесс обработки зубьев:

- 1) горячее накатывание зубчатого венца;
- 2) зубофрезерование червячными фрезами;
- 3) шевингование или холодная прокатка.

Этот технологический процесс является перспективным с точки зрения экономии металла и повышения усталостной и изгибной прочности зубьев из-за рационального расположения волокон металла в теле зуба.

Однако на подавляющем большинстве заводов нашей страны и за рубежом для производства незакаленных зубчатых колес 7-ой степени точности рекомендуется (см. работы Е.Г. Гинзбурга, А.В. Шаманина и Б.А. Тайца [4]) и применяется ставший классическим следующий технологический процесс:

- 1) зубофрезерование, которое может разделяться на черновое и чистовое для крупномодульных зубчатых колес;
- 2) шевингование дисковыми шеверами, которое улучшает плавность и контакт зацепления.

При сравнении этих двух технологических процессов: прогрессивного и классического, становится очевидным, что для перспективного технологического процесса обработки венцов зубчатых колес

необходимо вводить дополнительную операцию (первую), а последующие две есть повторение классического технологического процесса.

Напрашивается вывод, что необходимо создание нового технологического процесса, в котором зубофрезерование и шевингование были бы заменены одной операцией – чистовой обработкой накатанных зубчатых колес, обеспечивающей требуемую степень точности (например, 7-ю) при относительно низкой степени точности заготовки (9...11 степени). Тем более, что и исследования точности зубчатых колес, обработанных по классическому технологическому процессу, проведенные Я.С. Израилевичем и В.Н. Кошелем [5], показывают, что кинематическая точность зубчатых колес при контроле по комплексу $F_{rr} + F_{vWr}$ не удовлетворяет в большинстве случаев требованиям чертежа (обычно 7-й или 8-й степени точности по ГОСТ 1643-56) по колебанию длины общей нормали. Эксперименты, проведенные авторами, показали, что радиальное биение зубчатого венца полученного фрезерованием при шевинговании уменьшается, но, зато, колебание длины общей нормали увеличивалось по зависимости:

$$\delta(F_{vWr}) = C \delta F_{rr} \quad (1)$$

где $\delta(F_{vWr})$ – приращение колебания длины общей нормали, вызванное уменьшением радиального биения при шевинговании;

C – численный коэффициент, теоретическое значение которого $C = \sin 2\alpha_s = 20^\circ$; $C = 0,64$ практически, по экспериментальным данным – $C = 0,6...0,7$;

δF_{rr} – уменьшение радиального биения зубчатого венца при шевинговании.

Значит, шевингование не исправляет кинематической точности зубчатого колеса. Это подтверждают исследования, проведенные Б.А. Гайцем [4].

Методом чистовой обработки горяченакатанных зубчатых колес может стать обработка кромочными шеверами, имеющими за рубежом название «ГЕРАК» или «ДЖЕРАК». Кромочный шевер – это зубчатое колесо, сопрягаемое с обрабатываемым зубчатым колесом и составляющее с ним винтовую пару, (то есть оси кромочного шевера и обрабатываемого зубчатого колеса скрещиваются). При этом теоретические контактные линии на зубьях шевера превращены в режущие кромки за счет удаления части зубьев шевера специально запрограммированным по расчетной кривой шлифовальным кругом. В отличие от обычного шевингования, обработка зубчатых колес кромочными шеверами осуществляется при принудительном движении взаимного обката инструмента и заготовки, что позволяет исправлять кинематическую погрешность заготовки. Большой объем стружечной канавки кромочных шеверов позволяет снимать гораздо большие припуски, чем при обычном шевинговании и применять кромочные шеверы для чистовой обработки горяченакатанных зубчатых колес, минуя промежуточное зубофрезерование. Этот метод не получил широкого распространения в промышленности из-за сложности расчета и изготовления инструмента.

Что касается обычного шевингования, то применять его в качестве чистовой обработки зубчатых колес сразу после горячей накатки не позволяют следующие специфические недостатки, обусловленные самой сущностью процесса шевингования:

- 1) невозможность исправления кинематических погрешностей обрабатываемого зубчатого колеса;
- 2) малая величина снимаемого припуска;
- 3) неравномерность снятия припуска по высоте зуба, которая вынуждает применять инструмент для предварительного зубонарезания под шевингование сложного, так называемого модифицированного профиля.

Все сказанное про обычное шевингование можно отнести и к калиброванию зубчатых колес методом холодной обкатки.

Тульским государственным университетом (ТулГУ) разработан способ финишной обработки цилиндрических зубчатых колес после предварительного формообразования зубьев литём, пластическим деформированием, резанием [6,7,8]. Шевингование-прикатывание в опытном варианте производилось на токарном станке, в соответствии с рис. 1, с использованием инструментального блока

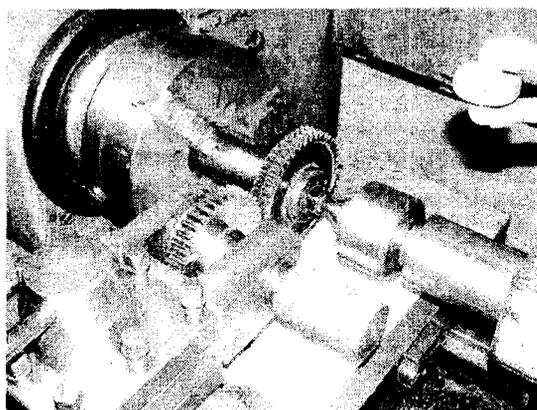


Рис. 1. Зона обработки

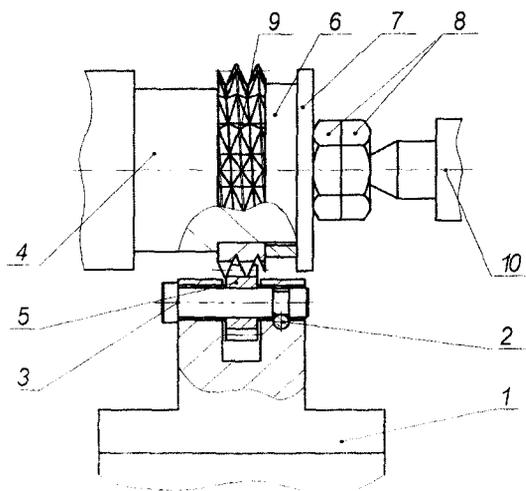


Рис. 2. Схема шевингования-прикатывания одним шевером-прикатчиком с радиальной подачей

Схема шевингования-прикатывания одним инструментом с радиальной подачей заготовки показана на рис. 2. Шевер-прикатник 9 устанавливается на инструментальной оправке 4 в шпиндель станка. Инструмент 9 фиксируется втулкой 6, шайбой 7 и двумя гайками 8. Инструментальный блок поджимается центром 10, установленным в задней бабке станка. Шпиндель приводился во вращение приводом с частотой 315 мин^{-1} . Заготовка (колесо) 5 свободно вращалась на оправке 3 в корпусе 1 приспособления и фиксировалась штырем 2. Приспособление устанавливалось в резцедержатель станка. Колесо 5 приводилось во вращение инструментом 9. В момент обработки осуществлялась радиальная подача вдоль оси обрабатываемой заготовки на величину $0,03 \text{ мм/цикл}$. Обработывалась партия из 50 прямозубых цилиндрических колес с модулем 2 мм и числом зубьев 11 цилиндрическим шевером-прикатником с числом зубьев 31. Заготовка свободно вращалась на оправке приспособления и находилась в двухпрофильном (безззорном) зацеплении с инструментом. После совершения инструментом числа оборотов, равных числу зубьев обрабатываемой заготовки осуществлялось реверсирование. Обработка производилась за три рабочих цикла с периодической подачей сближения заготовки и два цикла выхаживания без подачи заготовки. В результате обработки удалялся припуск $0,08 \dots 0,12 \text{ мм}$ по толщине зуба. Шероховатость после зубофрезерования составила $R_z = 4,25 \text{ мкм}$; шероховатость после шевингования-прикатывания – $R_z = 2,36 \text{ мкм}$. После шевингования-прикатывания прирост микротвердости составил от 7 % до 16 %. На основании замеров точностных параметров зубчатого колеса до и после чистовой обработки проводилось статистическое исследование точности, задачей которого являлось выявление достижимой точности шевингования-прикатывания, а также исправляющей способности процесса. Для этого использовались заготовки, предварительно нарезанные зубофрезерованием. Результаты обработки экспериментальных данных методами математической статистики при обработке партии колес из 50 штук показали, что по параметрам F_{rr} – радиальное биение зубчатого колеса, f_{ir} – наибольшее радиальное биение на одном зубе точность повышается на три степени; параметры f_{pr} – погрешность шага, F_{pr} – накопленной погрешности шага до и после шевингования-прикатывания мало отличаются по величине и расположению (на одну степень точности), а тангенциальная составляющая кинематической точности (F_{vwr}) и плавности (f_{vwr}) ухудшается на одну степень точности, что интегрально даёт повысить точность на две степени при повышении производительности в 3...4 раза по сравнению с другими окончательными обработками.

Литература:

1 Евстигнеев Ю.А. *Зубообрабатывающие станки* // «Станки и инструмент», 1969, №3.

- 2 Башев С.М. Влияние калибрования на работоспособность зубчатых колёс / С.М. Башев, Ю.В. Берестенев, М.В. Хорунженко // «Станки и инструмент», 1969, №3.
- 3 Половников В.В. Изготовление цилиндрических зубчатых колес прокаткой / В.В. Половников, П.Ф. Филиппов, В.А. Бодажков, Г.Г. Семибратов. – М.: Машигиз, 1961.
- 4 Тайц Б.А. Анализ погрешностей различных методов зубообработки. // В сб. «Взаимозаменяемость и технические измерения». – Под ред. А.И. Якушева. – М.: Машигиз, 1960.
- 5 Израшевич Я.С. Кинематическая точность зубчатых колес после механической и термической обработки / Я.С. Израшевич, В.Н. Кошель // «Вестник машиностроения», 1969, №11.
- 6 Пат. 2224624 Российская Федерация, МПК⁷ В 23F 19/06. Способ шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес / В.П. Карпухин, А.С. Ямников, Е.Н. Валиков; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет – №2001132029/02; заявл. 27.11.2001; опубл. 27.02.2004, Бюл. №6 – 8 с.
- 7 Пат. 2230635 Российская Федерация, МПК⁷ В 23F 21/28. Дисковый шевер / В.П. Карпухин, А.С. Ямников, Е.Н. Валиков; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет – №2001132030/02; заявл. 27.11.2001; опубл. 20.06.2004, Бюл. №17 – 4 с.
8. Валиков Е.Н. Деформирующее шевингование зубчатых колёс / Е.Н. Валиков, И.А. Коганов, А.С. Ямников, В.А. Горчаков, В.П. Карпухин // СТИН. – 2002. – Вып. 3 – С. 13-16.

УДК 621.83

Маликов А.А., Валиков Е.Н., Ямников А.С., Белякова В.А.
(Тульский государственный университет)
Россия, г. Тула, тел. (4862)555524; E-mail: avk@ostu.ru,

РАСЧЁТ КООРДИНАТ ТОЧЕК РЕЖУЩИХ КРОМОК ШЕВЕРА - ПРИКАТНИКА

The method of finish processing the cylinder tooth wheels later the preliminary creation form the tooth of casting, plastic processing or cutting is elaborated.

В Тульском государственном университете (ТулГУ) разработан способ финишной обработки цилиндрических зубчатых колес после предварительного формообразования зубьев литьем, пластическим деформированием, резанием [1]. Сущность способа заключается в следующем (рис. 1).

Заготовка – 1, находится в безззорном зацеплении с инструментом – 2, названным авторами шевером-прикатником [2]. Такое название ему присвоено потому, что в процессе работы осуществляется срезание тонких слоев стружки и выглаживание боковых поверхностей зубьев заготовки за счет профильного проскальзывания.

Для интенсификации скоростей скольжения по рабочей высоте боковых поверхностей зубьев зубчатая пара заготовка-инструмент проектируется с внеполюсным (предполюсным или заполюсным) зацеплением.

Обработку ведут с периодической радиальной подачей после каждого из 3-4 рабочих ходов, включающих поворот шевера-прикатника в прямом и обратном направлениях на количество оборотов, равное числу зубьев обрабатываемого колеса, и без радиальной подачи в течение 1-2 ходов выхаживания, включающих поворот шевера-прикатника в прямом и обратном направлениях на количество оборотов, равное числу зубьев обрабатываемого колеса.

Число зубьев инструмента не должно иметь общих множителей с обрабатываемым колесом.

Шевер-прикатник представляет собой корригированное цилиндрическое зубчатое колесо с режущими кромками, образованными пересечением боковых поверхностей зубчатого венца с одно или многозаходной винтовыми канавками, прорезанными по всей высоте зуба (рис. 2).

На рис. 2 представлены развертки цилиндров произвольного радиуса шеверов-прикатников. Формообразование боковых поверхностей зубьев обрабатываемой заготовки совершается за количество оборотов инструмента, равное числу зубьев заготовки. Заготовка при этом совершает количество оборотов равное числу зубьев инструмента.

На рис. 3 показана последовательность обработки боковой поверхности зуба колеса одно и трёхзаходным шевером-прикатником.

Предлагается следующая последовательность расчета координат точек режущих кромок шеверов-прикатников для обработки косозубых колес [3]:

1) расчёт основных геометрических параметров цилиндрического зубчатого колеса и шевера-прикатника;

2) подготовка исходных данных для производящей поверхности и стружечной канавки шевера-прикатника в соответствии с рис. 4:

а) уравнения производящей поверхности:
торцевой модуль:

$$m_{t0} = \frac{m}{\cos \beta_0}, \quad (1)$$

где m – модуль,

β_0 – угол наклона зуба;
торцевой угол профиля:

$$\operatorname{tg} \alpha_{t0} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta_0}, \quad (2)$$

где α – угол главного профиля;
делительный диаметр:

$$d_0 = m_{t0} \cdot z_0, \quad (3)$$

где z_0 – число зубьев;
основной диаметр:

$$d_{b0} = d_0 \cdot \cos \alpha_{t0}; \quad (4)$$

б) уравнения стружечной канавки:
желаемый угол наклона стружечной канавки β'_S ;
число заходов:

$$z'_S = z_0 \cdot \frac{\cos \beta'_S}{\cos \beta_0}, \quad (5)$$

принять z_S целое число;

уточненный угол наклона стружечной канавки:

$$\cos \beta_S = \frac{z_S}{z_0} \cdot \cos \beta_0; \quad (6)$$

торцевой угол профиля:

$$\operatorname{tg} \alpha_{tS} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta_S}; \quad (7)$$

основной диаметр стружечной канавки:

$$d_{bS} = \frac{m \cdot z_S}{\cos \beta_S} \cdot \cos \alpha_{tS}; \quad (8)$$

в) определение центрального угла, соответствующего половине ширины впадины по основной окружности (производящей и стружечной), в соответствии с рис. 5:

производящей поверхности:

$$\psi_0 = \psi - \operatorname{inv} \alpha_{t0}; \quad (9)$$

стружечной канавки:

$$\psi_S = \psi - \operatorname{inv} \alpha_S; \quad (10)$$

г) определение винтовой поверхности (производящей и стружечной):

винтовая производящая поверхность:

$$p_0 = \frac{r_0}{\operatorname{tg} \beta_0}, \quad (11)$$

где r_0 – радиус делительной окружности производящей поверхности,

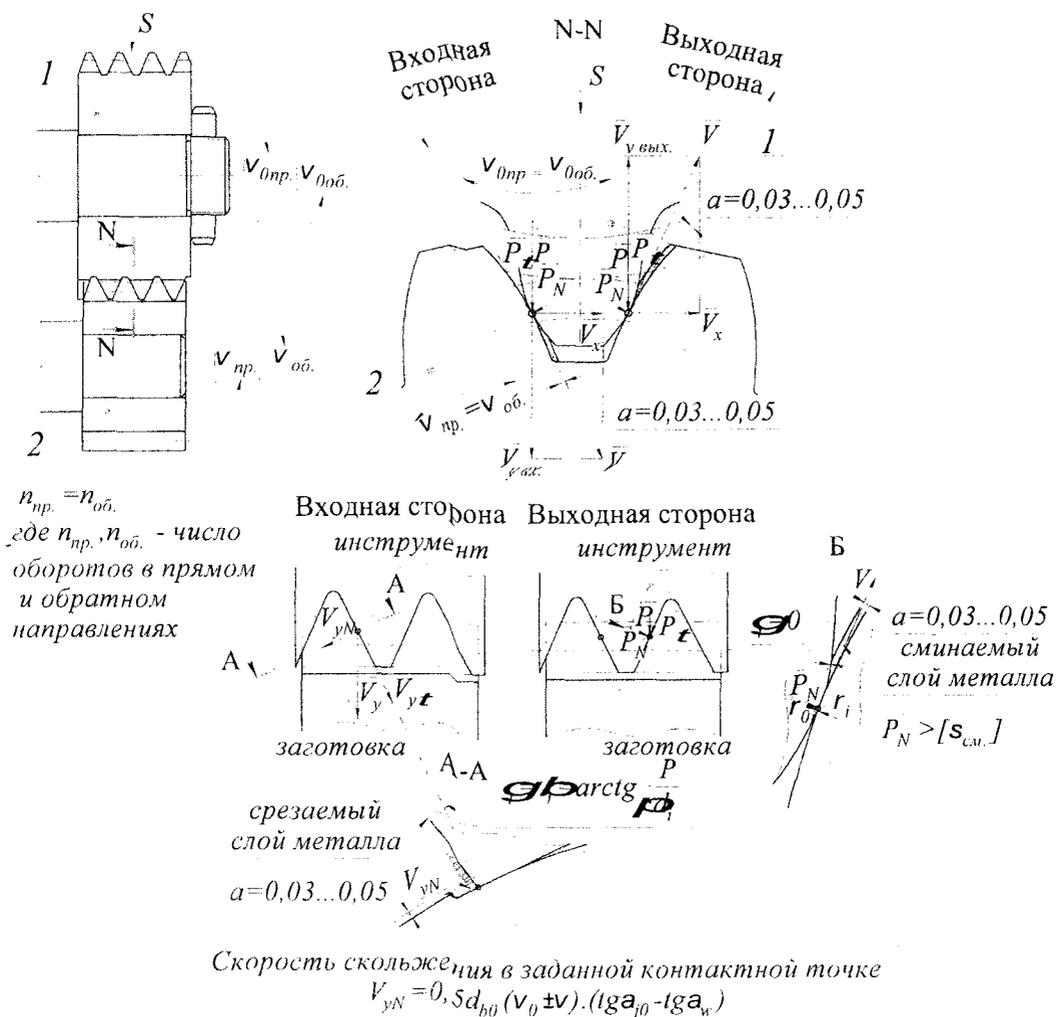
β_0 – угол наклона зуба;

винтовая поверхность стружечной канавки:

$$p_S = \frac{r_S}{\operatorname{tg} \beta_S}, \quad (12)$$

где r_S – радиус делительной окружности стружечной канавки,

β'_S – угол наклона стружечной канавки.



ω, ω_0 -- частота вращения обрабатываемой заготовки и инструмента; S – периодическая подача

Рис. 1. Схема шевингования и прикатывания цилиндрических зубчатых колес

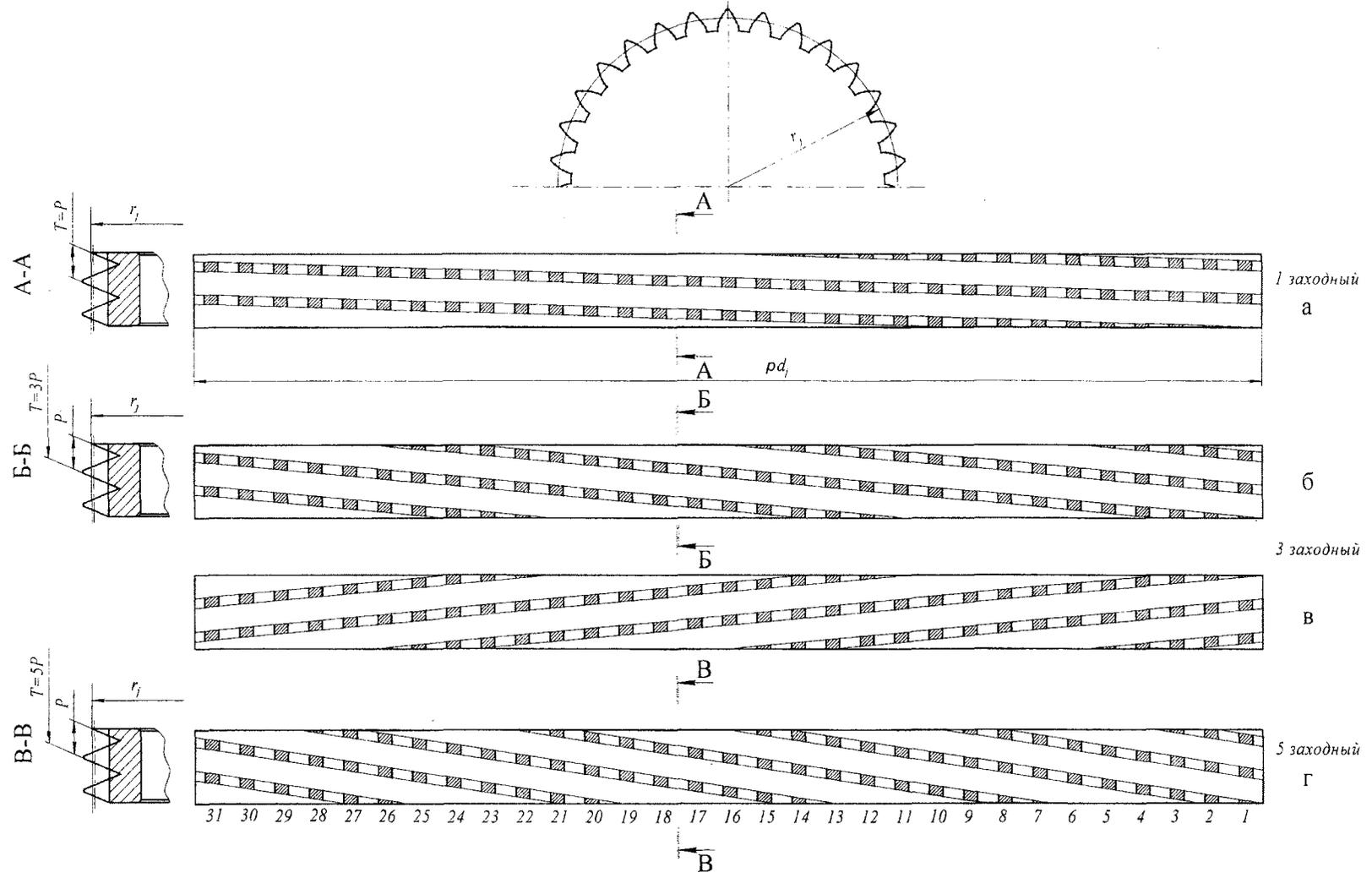
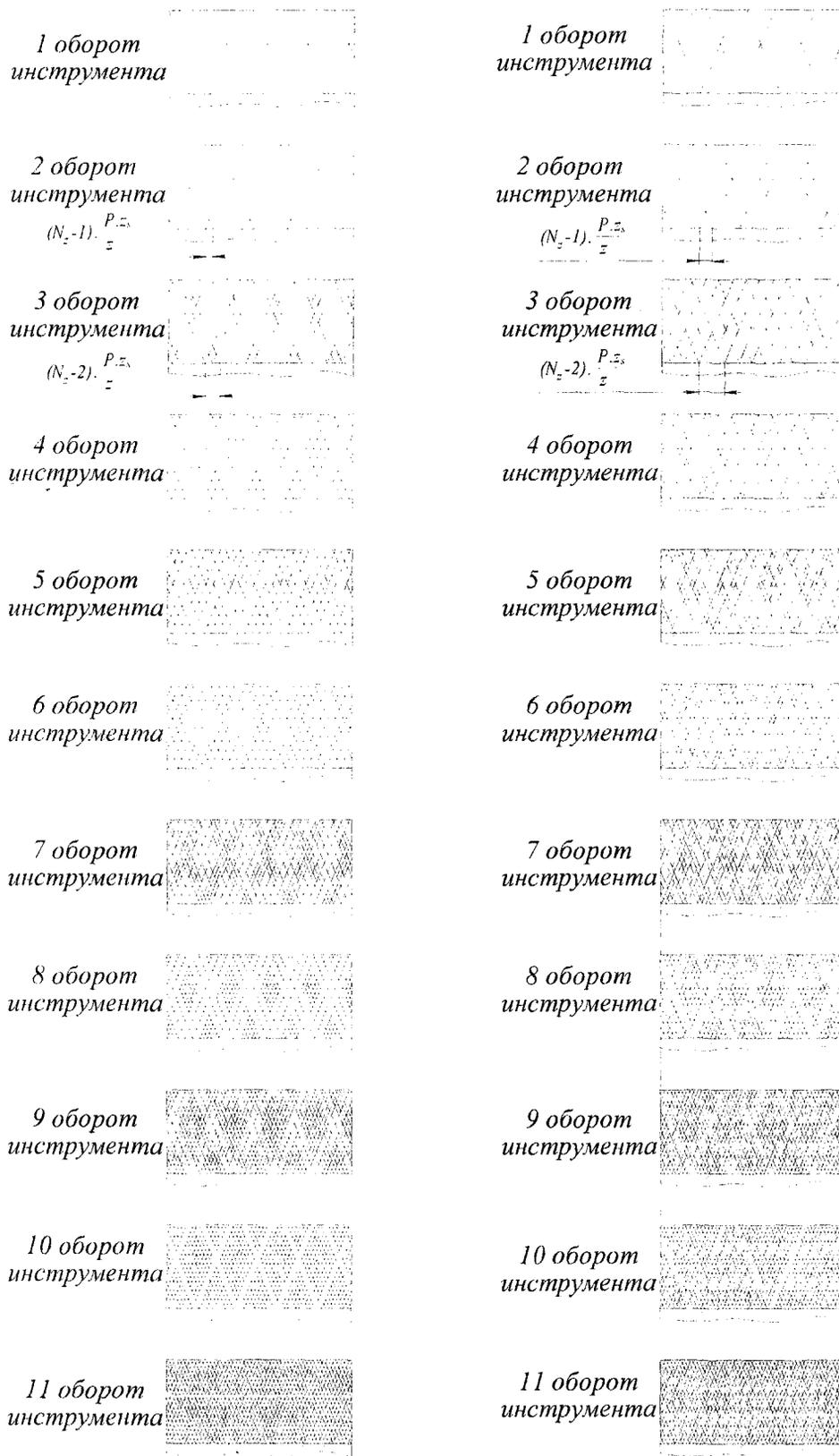


Рис. 2.. Развертки цилиндров, радиусом r_j , на плоскость
а – шевер-прикатник с однозаходной стружечной канавкой; б – шевер-прикатник с трехзаходной правой стружечной канавкой;
в – шевер-прикатник с трехзаходной левой стружечной канавкой; г – шевер-прикатник с пятизаходной стружечной канавкой.



— след от режущих кромок расположенных на 1-ом заходе;
 — след от режущих кромок расположенных на 2-ом заходе;
 — след от режущих кромок расположенных на 3-ем заходе.

а)

б)

Рис. 3. Формообразование боковой поверхности зубьев заготовки

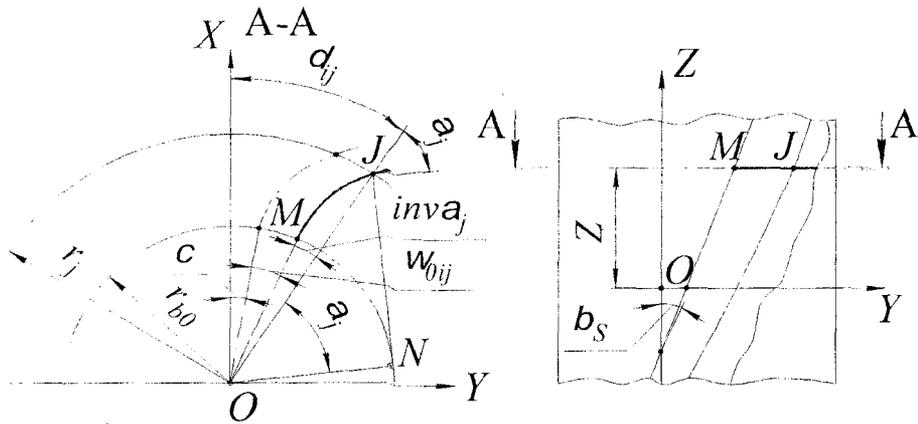


Рис. 4. Схема для определения производящей поверхности и стружечной канавки

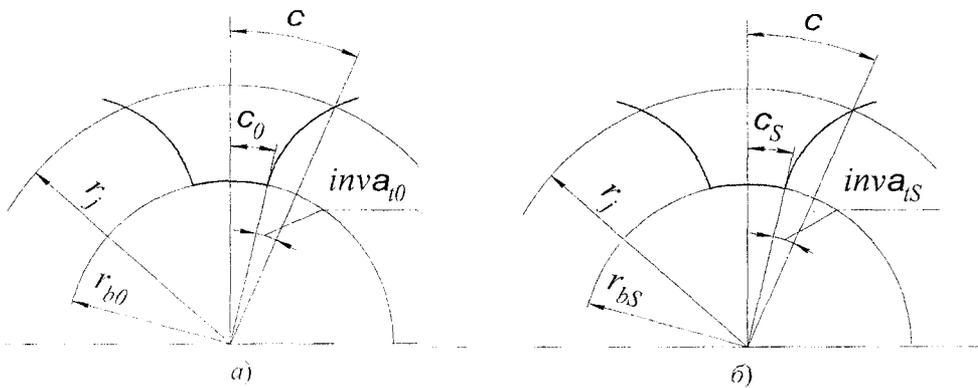


Рис. 5. Схемы для определения углового положения разносторонних боковых поверхностей: а) производящих; б) стружечной канавки

Определение координат режущих кромок шевров-прикатников:

– задаемся радиусами точек r_j ;

определяем угол давления (профиля) в расчетной точке производящей поверхности

$$\cos \alpha_j = \frac{r_{b0}}{r_j}; \quad (13)$$

– определяем угол давления (профиля) в расчетной точке стружечной канавки

$$\cos \alpha_{Sj} = \frac{r_{bS}}{r_j}; \dots \dots \dots (14)$$

– определяем X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij} , предварительно выбрав знак и определив углы φ_{0ij} и δ_{ij} в соответствии с таблицей 1:

$$\varphi_{0ij} = \frac{1}{\frac{p_0}{p_S} - 1} (\psi_0 - \psi_S + \text{inv} \alpha_j - \text{inv} \alpha_{Sj}) ; \quad (15)$$

$$\delta_{ij} = \psi_0 + \varphi_{0ij} + \text{inv} \alpha_j$$

$$X_{ij} = r_j \cdot \cos \delta_{ij}$$

$$Y_{ij} = r_j \cdot \sin \delta_{ij} \quad (16)$$

$$Z_{ij} = p_0 \cdot \varphi_{0ij}$$

Расчет координат точек профиля шевров-прикатников для обработки прямозубых колес производится по следующей методике.

Стружечная канавка имеет образующую прямолинейную в осевом сечении. Общий случай: *правая сторона впадины зуба – правая сторона канавки в торцевой плоскости (VR-KR)*.

Если смотреть *вдоль оси Y*, то в осевой плоскости угол наклона образующей ξ_{KR} будет откладываться по часовой стрелке от оси *X* (как показано на рис. 4).

В начальный момент (при $Z = 0$) образующая пересекает ось *X* в точке $X = b_K$.

Величина b_K -- постоянная. Таким образом, канавка задается двумя параметрами: b_{KR}, ξ_{KR} .

Соответственно левая сторона определяется параметрами b_{KL}, ξ_{KL} , причем $\xi_{KL} < 0$.

Рассмотрим развертку цилиндра радиуса r_j .

В начальный момент (в осевой плоскости) точка канавки на радиусе r_j будет иметь координату

$$Z_{Kj} = -(r_j - b_{KR}) \cdot \text{tg} \xi_{KR}. \quad (17)$$

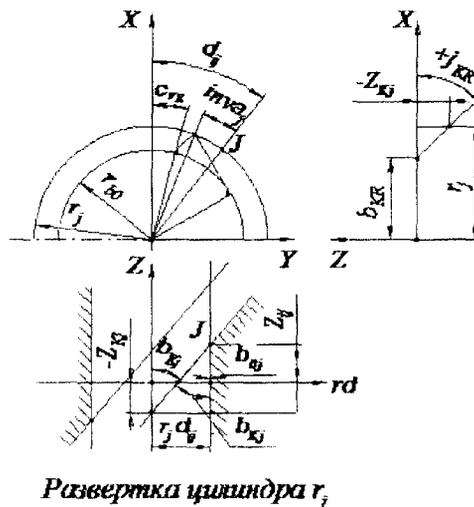
По развертке можно составить зависимости:

$$\begin{aligned} r_j \delta_j &= [Z_{ij} + (-Z_{Kj})] \cdot \text{tg} \beta_{Kj} \\ r_j \delta_j &= r_j \cdot (\psi_{VR} + \text{inv} \alpha_j) + Z_{ij} \cdot \text{tg} \beta_{0j} \end{aligned} \quad (18)$$

где $\cos \alpha_j = r_{b0} / r_j$.

Таблица 1 – Выбор знаков

№ режущей кромки	ψ_0	ψ_S	$\text{inv} \alpha_j$	$\text{inv} \alpha_{Sj}$	p_0
1 ($\alpha_j > 0, \alpha_{Sj} > 0$)	+	+	+	+	-
2 ($\alpha_j > 0, \alpha_{Sj} < 0$)	+	-	+	-	-
3 ($\alpha_j < 0, \alpha_{Sj} > 0$)	-	+	-	+	-
4 ($\alpha_j < 0, \alpha_{Sj} < 0$)	-	-	-	-	-



Развертка цилиндра r_j

Рис. 6. Схема для определения координат точек режущих кромок X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}

Приравнивая, левые и правые части уравнений получим:

$$[Z_{ij} + (-Z_{Kj})] \cdot \text{tg} \beta_{Kj} = r_j \cdot (\psi_{VR} + \text{inv} \alpha_j) + Z_{ij} \cdot \text{tg} \beta_{0j};$$

$$Z_{ij} \cdot \text{tg} \beta_{Kj} - Z_{Kj} \cdot \text{tg} \beta_{Kj} = r_j \cdot (\psi_{VR} + \text{inv} \alpha_j) + Z_{ij} \cdot \text{tg} \beta_{0j};$$

$$Z_{ij} = \frac{r_j \cdot (\psi_{VR} + \text{inv} \alpha_j) + Z_{Kj} \cdot \text{tg} \beta_{Kj}}{\text{tg} \beta_{Kj} - \text{tg} \beta_{0j}}. \quad (19)$$

$$Z_{ij} = \left(r_j (\psi_{VR} + inv\alpha_j) + Z_{Kj} \frac{r_j}{p_K} \right) / \left(\frac{r_j}{p_K} - \frac{r_j}{p_0} \right). \quad (20)$$

$$Z_{ij} = \left(\psi_{VR} + inv\alpha_j + \frac{Z_{Kj}}{p_K} \right) / \left(\frac{1}{p_K} - \frac{1}{p_0} \right). \quad (21)$$

$$\delta_{ij} = \frac{Z_{ij} - Z_{Kj}}{p_K} \Rightarrow \delta_{ij} = \psi_{VR} + inv\alpha_j + \frac{Z_{ij}}{p_0} \quad (\text{в рад.}) \quad (22)$$

$$X_{ij} = r_j \cdot \cos \delta_{ij}. \quad (23)$$

$$Y_{ij} = r_j \cdot \sin \delta_{ij}. \quad (24)$$

Координаты точек режущих кромок рассчитываем по формулам 21, 23, 24 [4].

Выбор знаков:

$$VR-KR \quad \psi_{VR} > 0 \quad \alpha_j > 0 \quad \xi_K > 0;$$

$$VR-KL \quad \psi_{VR} > 0 \quad \alpha_j > 0 \quad \xi_K < 0;$$

$$VL-KR \quad \psi_{VL} < 0 \quad \alpha_j < 0 \quad \xi_K > 0;$$

$$VL-KL \quad \psi_{VL} < 0 \quad \alpha_j < 0 \quad \xi_K < 0.$$

Шевер-прикатник, рассчитанный по приведенной методике был испытан при обработке цилиндрических зубчатых колес с модулем $m = 2$ мм, числом зубьев $z = 11$, коэффициентом смещения $\chi = 0$. Обработка производилась одним шевером – прикатником с радиальной подачей на станке 16К20. Заготовки предварительно были нарезаны зубофрезерованием. Результаты обработки экспериментальных данных методами математической статистики при обработке партии колес из 50 штук показали:

а) расположения и характеристики кривых распределения по параметрам F_{rr} – радиальное биение зубчатого колеса, f_{rr} – наибольшее радиальное биение на одном зубе убеждают в высокой (на 3 степени точности) исправляющей способности процесса шевингования-прикатывания именно по этим параметрам;

б) кривые распределения для параметров f_{rr} – погрешности шага, F_p – накопленной погрешности шага до и после шевингования-прикатывания мало отличаются по значениям и расположению, это говорит о невысокой (на 1 степень точности) исправляющей способности, что характерно для способа обработки по методу свободного обката;

в) большие по величине погрешности предварительной обработки по радиальным составляющим кинематической точности (200 мкм) и плавности (201 мкм) приводят к увеличению тангенциальной составляющей кинематической погрешности (F_{vwr}).

Экспериментально установлено, что радиальная составляющая кинематической точности (F_{rr}) и плавности (f_{rr}) улучшается на 3 степени точности, а тангенциальная составляющая кинематической точности (F_{vwr}) и плавности (f_{vwr}) ухудшается на 1 степень точности, что интегрально дает повысить точность на 2 степени при повышении производительности в 3...4 раз по сравнению с другими окончательными обработками.

Литература:

1 Пат. 2224624 РФ, МПК⁷ В 23F 19/06. Способ шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес / В.П. Карпунин, А.С. Ямников, Е.Н. Валиков; опубл. 27.02.2004, Бюл. №6 – 8 с.

2 Пат. 2230635 РФ, МПК⁷ В 23F 21/28. Дисковый шевер / В.П. Карпунин, А.С. Ямников, Е.Н. Валиков; опубл. 20.06.2004, Бюл. №17 – 4 с.

3 Валиков Е.Н. Расчет координат профиля режущих кромок шевера-прикатника / Е.Н. Валиков, Н.Г. Стаханов, В.А. Белякова // Известия Тульского государственного университета. – Сер. Технология машиностроения. Тула: ТулГУ, 2004. – Вып. 1. – С. 61-65.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ,
МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА И ЭКОЛОГИИ**

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА И ЭКОЛОГИИ

УДК 681.5.08

Канд. техн. наук Углова Н.В., канд. техн. наук, доц. Лисовская З.П.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

СТАНДАРТЫ ИСО СЕРИИ 14000: ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ПРАКТИКА СЕРТИФИКАЦИИ

This article touches upon the actual theme of necessity of state cooperation with the purpose of searching new ways of solving ecological problems. Environment protection activities must be the integral part of world development process. The experience of introducing ecological managements systems in Europe and Japan has been shown. Tendencies of ecological management systems development are presented on the basis of ISO 14000 standards in Russia. Chief reasons of introducing the ecological certification systems are pointed out in the article.

На II Всемирной конференции ООН по охране окружающей среды и развитию, прошедшей 3-14 июня в 1992 г. в Рио-де-Жанейро, в которой участвовали представители более 100 стран, была принята Концепция устойчивого развития и сохранения биосферы Земли. Она определила основные направления развития мирового сообщества в XXI веке.

В Декларации конференции подчеркивалось, что «экологический менеджмент следует отнести к высшим приоритетам промышленности и предпринимательства.

Природоохранная деятельность должна стать неотъемлемой частью процесса мирового развития». Результатом этой встречи и Уругвайского раунда переговоров по Всемирному торговому соглашению стало решение по разработке международных стандартов на системы управления окружающей средой (СУОС). Система управления окружающей средой (ГОСТ Р ИСО 14001) – часть общей системы административного управления, которая включает в себя организационную структуру, планирование, ответственность, методы, процедуры, процессы и ресурсы, необходимые для разработки, внедрения, реализации, анализа и поддержания экологической политики.

Земляне стали искать новые пути решения экологических проблем. Сегодня государствам необходимо сотрудничать для достижения устойчивого развития в рамках Мирового сообщества. Действия, связанные с глобальными экологическими проблемами, должны быть согласованы на международном уровне.

Как отмечалось на конференции, такое взаимодействие Мирового сообщества связано с глобальным характером экологических проблем, стоящих перед всеми странами независимо от их социально-политического и экономического развития [1].

Опыт Великобритании. Первым стандартом на системы экологического управления был Британский национальный стандарт BS 7750 «Общие требования к системам управления окружающей средой». Его по заданию Британской конфедерации промышленности разработал

Британский институт стандартов (BSI) при участии более 500 представителей различных отраслей промышленности в 1992 г. Этот стандарт не формулирует требований к природоохранной деятельности предприятия, но содержит рекомендации по созданию эффективной системы экологического управления, развитию экологического аудита, что непременно должно сказаться на улучшении экологических характеристик предприятия в целом. Позже BS 7750, детально продуманный и сопровождаемый вспомогательными материалами, стал основой для разработки международных стандартов ИСО серии 14000. BS 7750 предлагает следующие стадии разработки и внедрения системы экологического управления:

- предварительное исследование ситуации;
- разработка заявления об экологической политике;
- распределение ответственности;
- оценка степени воздействия предприятия на окружающую среду;
- разработка экологических целей и задач;
- определение стадий производства, оказывающих наибольшее влияние на окружающую среду и разработка системы мониторинга и контроля;
- создание программы экологического менеджмента;
- выпуск руководства для аудитора;
- установление системы регистрации экологически значимых событий;
- аудит.

Экологический менеджмент в Европе. В начале 90-х годов мировое сообщество в лице Консультационной группы ИСО/МЭК по определению стратегических направлений охраны окружающей среды (SAGE) сделало вывод о необходимости создания систем управления окружающей средой EMS. Стандарт BS 7750 послужил моделью для разработки EMAS – Европейская схема для экологического менеджмента и аудита. Целью разработки EMAS стало создание условий для оценивания экологических показателей деятельности промышленных предприятий и

определения возможности их улучшения. Правила, изложенные в EMAS, позволили организациям сертифицировать свои системы экологического менеджмента.

С 1995 г. предприятия стран-членов ЕС получили возможность сертифицировать свои системы экологического управления в соответствии со Схемой экологического менеджмента и аудита EMAS (Eco-Management and audit scheme). EMAS – это сборник документов, определяющих принципы работы предприятия, необходимые для достижения целей экологической политики и решения производственных задач, связанных с охраной окружающей среды. По мнению ряда специалистов, моделью для разработки EMAS послужил стандарт BS 7750: многие требования этих документов весьма близки. Система экологического менеджмента в соответствии с принципами EMAS включает 5 основных компонентов:

- разработку экологической политики;
- оценку существующей ситуации (установление начальных характеристик деятельности, по отношению к которым будет оцениваться эффективность функционирования системы);
- формулирование конкретных задач в соответствии с целями экологической политики;
- разработку экологической программы поэтапного решения поставленных задач;
- проведение экологического аудита с целью анализа эффективности функционирования системы и экологических показателей деятельности предприятия в целом.

Японский прорыв. По данным 1999 г. на предприятиях Японии сертифицировано 3015 систем экологического менеджмента – это в несколько раз превышает показатели любой страны мира, включая «первопроходца» – Великобританию. Такой прорыв можно объяснить конкурентной стратегией японских компаний (особенно тех, которые имеют предприятия в других странах). Её характерная черта – «игра на опережение». Они не ждут, когда правительства стран, в которых находятся их предприятия, примут законы по защите окружающей среды, а заранее вводят жесткие внутрифирменные экологические нормы. И когда пакет экологических законов страна принимает, японские компании уже имеют конкурентные преимущества. С другой стороны, такая забота о природе обусловлена острой необходимостью: подрыв биосферы на небольшой территории с высокой плотностью населения приобрел в Японии масштабы стихийного бедствия.

Экологические проблемы достались Японии в наследство от эпохи сверхвысоких темпов экономического роста. Поначалу основными источниками окружающей среды были бумажная, химическая и горно-добывающая промышленность, потом печальный список дополнили нефтехимические комплексы, автомобильный, железнодорожный и авиатранспорт, атомная энергетика и даже индустрия досуга. В 60-е годы государство и предпринимательские круги Японии с целью

экономии средств игнорировали экологический фактор, к тому же не было национальных экологических стандартов. Постепенно стало очевидным, что полученная экономия многократно перекрывается уроном, нанесенным биосфере, и затратами, связанными с его покрытием.

Тем не менее, государство смогло мотивировать японскую промышленность к принятию высоких экологических стандартов и взяло на себя контроль над малыми и средними предприятиями – основными виновниками загрязнений биосферы. Под действием государственной политики кардинально изменилось и отношение производителей и общестественности к осуществлению проектов, несущих угрозу окружающей среде. Сейчас национальные расходы на охрану окружающей среды – один из самых высоких показателей в мире.

Международный опыт: MC ИСО серии 14000. Международный опыт: MC ИСО серии 14000 – семейство международных стандартов (MC) с 1993 года разрабатываемых ИСО/ТК 207 «Управление окружающей средой» в ответ на требование ООН в отношении охраны окружающей среды. Первая версия стандартов увидела свет в сентябре 1996 г.

MC ИСО серии 14000 в отличие от многих природоохранных и других стандартов не регламентируют количественные показатели воздействия на окружающую среду (объём выбросов и сбросов, ПДК вредных веществ, ПДУ радиации и т.д.) и не требуют обязательного применения ВАТ-технологий (Best Available Technology – наилучшая из возможных технологий). Стандарты не содержат никаких абсолютных требований к экологической эффективности, за исключением того, что организация должна объявить о своих стремлениях соответствовать требованиям национальных природоохранных законодательных актов и регламентов. Предметом этих стандартов является экологический менеджмент. В его основе лежат разработанные организационные процедуры, соблюдение которых способствует достижению экологических и экономических выгод организации.

Главным достоинством стандартов ИСО серии 14000 является создание международного согласованного метода оценки и управления окружающей средой. Недаром большой интерес к этим стандартам проявила Всемирная торговая организация (ВТО).

Их основная идея – внедрение *системы* экологического управления (менеджмента) (EMS – Environmental Management System) и в ее рамках – следование принципу постоянного улучшения. Стандарты серии ИСО 14000 не заменяют законодательных требований и не вторгаются в сферу действия национальных нормативов, а дополняют их. Они призваны уменьшить вредное воздействие на окружающую среду на трех уровнях:

- организационном (улучшение экологического «поведения» предприятий);

– государственном (дополнения к национальной нормативной базе и экологической политике);

– международном (улучшение условий торговли на мировом рынке, снижение барьеров в торговле).

Стандарты серии 14000 воплощают следующие аспекты управления окружающей средой:

– системы экологического менеджмента (EMS);

– экологический аудит и исследования (EA&RI);

– экологическая маркировка (EI);

– оценка изделий на различных стадиях жизненного цикла (LSA);

– термины и определения (T&D).

Основной стандарт системы МС ИСО 14001 «Система управления охраной окружающей среды. Общие требования и руководящие указания». Соответствие именно этому документу является предметом сертификации. Основные этапы подхода, заложенного в этом стандарте:

– разработка и утверждение политики в области охраны окружающей среды;

– планирование;

– внедрение и функционирование;

– контрольные и корректирующие действия;

– анализ со стороны руководства;

– непрерывное улучшение.

Международные стандарты в области управления окружающей средой предназначены для обеспечения организаций элементами эффективной СУОС, которые могут сочетаться с другими элементами административного управления. Такое объединение должно содействовать организациям в достижении их экономических целей.

Нередко чувствуется недопонимание смыслового значения понятий «экологическая схема EMAS» и «система экологического управления EMS», лежащей в основе МС ИСО серии 14000. Подобная путаница, проистекающая, вероятно, из-за похожего звучания аббревиатур, наблюдается и во многих источниках. Однако разница между этими понятиями довольно существенная. В основе EMS лежит системный подход – инструмент, позволяющий организациям любого типа и размера уменьшить степень воздействия своей деятельности, продукции, услуг на окружающую среду. Требования к EMS содержатся в МС ИСО 14001.

МС ИСО серии 14000 являются добровольным документом и отражают вклад в их разработку специалистов и заинтересованных сторон всех стран-членов ИСО. В свою очередь, EMAS – документ европейского уровня, имеющий правовой статус в пределах стран-членов ЕС.

Ещё одно принципиальное отличие состоит в том, что EMAS ориентировано исключительно на применение промышленными предприятиями, в то время как МС ИСО серии 14000 – универсальны, и их с успехом осваивают и внедряют организации любой области деятельности, размера, формы собственности.

Поскольку требования МС ИСО серий 14000 и 9000 пересекаются, для предприятий, уже имеющих сертификат по МС ИСО серии 9000, возможна облегченная схема сертификации.

Международная организация по стандартизации 8 ноября 2004 г. приняла новые стандарты ИСО 14001 и ИСО 14004 версии 2004 г. Эти стандарты, в отличие от МС ИСО серии 9000, выпущенных в 2000 г., радикально не изменились. Здесь не требовался, например, специальный переход к процессному подходу, который и без того подразумевался, в частности, в комплексе стандартов ИСО 14040 «Оценка жизненного цикла продукции и услуг». Стандарты новой версии более созвучны со стандартами ИСО серии 9000.

15 ноября 2004 года ИСО опубликовала новые версии стандартов ИСО 14001 и ИСО 14004. Как отметили некоторые представители, эти стандарты представляют верх искусства в экологической практике управления. Они помогут организациям развиваться сразу в трех направлениях менеджмента: социальном, экономическом и экологическом [2].

Охрана окружающей среды в России. Устойчивое развитие РФ, ее национальная безопасность, высокий уровень жизни и здоровья россиян могут быть обеспечены только при условии сохранения природных систем и поддержания соответствующего качества окружающей среды. Основной причиной развития экологического кризиса в России является, прежде всего, низкая эффективность используемых в промышленности механизмов охраны окружающей среды. Как показала практика, применение только административных методов управления оказалось недостаточно эффективным. Это и предопределило в 80-х годах необходимость сочетания административных методов управления с методами экологического регулирования. Однако упор на экономические методы также не позволяет изменить ситуацию в экологической сфере в лучшую сторону.

Состояние планетарных экологических систем вызывает все большую озабоченность Мирового сообщества. Эрозия почв, необратимое нарушение водного баланса и антропогенное загрязнение атмосферы сопровождаются нехваткой пресной воды, изменением климата, исчезновением лесов и многих тысяч биологических видов. В этих условиях особое значение приобретают огромные природные пространства нашей страны, которая пока может рассматриваться как один из немногих остающихся в мире «экологических доноров». Россия, в частности, до сих пор имеет резерв по выбросам парниковых газов, угрожающих Глобальным потеплением.

Реальным доказательством готовности России поддерживать планетарное экологическое равновесие является ее присоединение к Киотскому протоколу, обязывающему страны либо ограничивать загрязнение атмосферы, либо заимствовать «право на загрязнение» у стран, не исчерпавших свои лимиты по выбросам. Указанный протокол вступил в силу 16 февраля 2005 г., и, возможно, в ближайшие годы мы будем свидетелями развития международного рынка

принципиально нового типа – рынка по торговле квотами на загрязнение атмосферы.

Вместе с тем, экологические проблемы России в целом далеки от разрешения. Экологическая напряженность в стране обусловлена природозатратным уклоном национальной экономики, ориентированной на материально-энергоемкие технологии добычи и переработки полезных ископаемых. Такая экономика оказывает повышенное давление на окружающую среду, вследствие чего вопросы эффективного управления природопользованием и корректного экологического сопровождения хозяйственной деятельности в нашей стране весьма актуальны.

Как известно, ФЗ «О техническом регулировании» рассматривает охрану окружающей среды как приоритетную задачу обеспечения национальной безопасности. Поэтому в Программе разработки технических регламентов на 2004-2006 гг., утвержденной распоряжением Правительства, среди семи общетехнических регламентов обозначается документ «Об экологической безопасности». Требования по охране окружающей среды войдут в десятки других специальных технических регламентов, регулирующих безопасность строительства, транспорта и т.д. [3].

Среди международных документов, устанавливающих принципы обеспечения такого рода безопасности, важную роль играют стандарты ИСО серии 14000 «Системы управления окружающей средой», в основном принятые в России в качестве национальных стандартов в 1998 году, когда были введены первые основополагающие стандарты этой серии – ГОСТ Р ИСО 14001-98 и ГОСТ Р ИСО 14004-98.

Их использование в организациях считалось весомым доказательством надлежащей практики ведения бизнеса, а сертификация СУОС организацией на соответствие этим документам являлась способом достижения преимуществ в конкуренции.

Хотя Российские и Международные стандарты ИСО серии 14000 носят добровольный характер, создание и внедрение СУОС по этим стандартам в организациях способствует обеспечению перехода России к устойчивому развитию, благодаря повышению эффективности природоохранной деятельности и рационального использования природных ресурсов.

На сегодняшний день существуют различные причины для внедрения систем экологической сертификации. Назовем наиболее типичные:

- улучшение имиджа фирмы в области выполнения природоохранных требований;
- удовлетворение требований инвесторов и, как следствие, доступ к капиталу;
- снижение затрат на страхование;
- укрепление позиций на рынке;
- совершенствование контроля за издержками;
- экономия энергии и ресурсов за счёт рационального и эффективного их использования;
- стремление завоевать рынки «экологически чистой» продукции;
- заинтересованность в привлечении высококвалифицированных кадров;

– улучшение отношений с правительственными органами и общественностью.

К настоящему времени СУОС внедрены на десятках предприятий в различных регионах страны. В России существует несколько систем сертификации СУОС.

1 Система обязательной сертификации по экологическим требованиям (СОСЭТ), заявитель – Госкомэкология, зарегистрирована Госстандартом России в октябре 1996 г. как обязательная. В связи с тем, что необходимость сертификации по экологическим требованиям законодательством РФ не установлена, СОСЭТ не прошла регистрацию в Минюсте России. Поэтому система, несмотря на свое название, не является обязательной. Она не имеет права на проведение обязательной сертификации, а ее деятельность в этом направлении является нелегитимной.

2 Постановлением Госстандарта России № 56 от 04.08.2000 г. зарегистрирована Система добровольной сертификации, созданная ВНИИ сертификации Госстандарта России (ВНИИС). Данная система не претендует на роль общенациональной и не включает в себя центральный орган.

3 В июне 2000 г. постановлением Госстандарта России № 38 была зарегистрирована федеральная Система добровольной сертификации «Военный регистр». Эта система заявлена Министерством обороны РФ. В «Военный регистр» входит самостоятельная подсистема, в рамках которой организуются и проводятся работы по сертификации СУОС организаций.

Подсистема сертификации систем управления окружающей средой «Военного регистра» (ее организационная структура, порядок функционирования, руководящие методические документы) создана специалистами ФГУП ГНИЦ «Инверсия» Ростехрегулирования.

Следует отметить, что объектами сертификации в системе являются СУОС не только предприятий оборонно-промышленного комплекса. Подсистема открыта для сертификации СУОС любых организаций, предприятий, фирм, любых форм собственности независимо от ведомственной принадлежности.

4 Другой Федеральной системой сертификации по вопросам, связанным с охраной окружающей среды и рациональным использованием природных ресурсов, является Система добровольной сертификации объектов ресурсопользования России, заявленная Минприроды России.

5 С октября 2002 года на федеральном уровне аккредитована на сертификацию СУОС Система добровольной сертификации материалов (продукции) и эффективных технологий «МЭТ-Сертификация».

Наряду с рассмотренными федеральными системами сертификации СУОС в России созданы две региональные системы:

1 Постановлением Госстандарта России № 55 от 01.08.2000 г. зарегистрирована региональная система добровольной сертификации

«Экоответствие», представленная Нижегородским ЦСМ Госстандарта России.

2 Система добровольной сертификации «Московский экологический регистр». Система создана по инициативе Департамента природопользования и охраны окружающей среды правительства Москвы и зарегистрирована постановлением Госстандарта России № 106 от 28.10.2000 г. Система введена в действие в 2003 г.

В 2001-2004 гг. в создании, внедрении и сертификации СУОС организаций наиболее активное участие принимает «Военный регистр» и ее подсистема сертификации СУОС [4].

Направления развития СУОС.

Сертификация системы экологического менеджмента по ИСО 14001 (ГОСТ Р ИСО 14001) представляет собой процесс формального подтверждения соответствия систем экологического менеджмента предприятия данному стандарту специально аккредитованной на оказание таких услуг организацией.

Основными объектами оценки являются:

- деятельность по обеспечению, управлению и улучшению охраны окружающей среды в организации в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 14001;

- технологические этапы производства, при которых возможно появление продуктов, вызывающих загрязнение или оказывающих вредное воздействие на окружающую среду непосредственно своим появлением или за счет увеличения концентрации выбросов за определенный интервал времени;

- экологичность продукции на этапах маркетинга, разработки, изготовления, потребления и утилизации.

Международные сертифицирующие компании имеют примерно одинаковые условия сертификации систем экологического менеджмента (СЭМ); в то же время, их требования к системе экологического менеджмента могут отличаться.

Через 2-3 года после выдачи происходит подтверждение сертификата, для чего специалистами органа по сертификации проводится аудит. Процесс сертификации СЭМ занимает примерно столько же, сколько и её внедрение, т.е. 1 - 1,5 года. Сертификация системы и ее регистрация в соответствующем реестре являются средством демонстрации возможностей предприятия в эффективном менеджменте качества окружающей среды. Если организация набирает опыт в управлении окружающей средой, и СЭМ начинает действовать, то реализуемые процедуры направляются на улучшение экологических характеристик ее деятельности.

Стандарты ИСО серии 14000 имеют много схожего с МС ИСО серии 9000. Совмещение процессов управления качеством и окружающей средой на основе идеологии интегрированных систем позволяет снизить затраты на разработку и сертификацию по крайней мере в полтора раза.

Тенденции развития работ в области сертификации и качества указывают на то, что в

ближком будущем ожидается интеграция ряда систем поддержки основных видов деятельности организации. Прежде всего, имеется в виду объединение систем управления качеством, окружающей средой и надежностью (безопасностью). Одновременно развивается ряд других систем обеспечения деятельности в каждой организации, которые в ближайшей перспективе также будут интегрироваться в единую систему управления качеством.

Внедрение интегрированных систем менеджмента на основе стандартов ИСО серий 9000 и 14000 создает предпосылки для перехода российской экономики на принципы устойчивого развития.

Интегрированные системы менеджмента требуют внимания к процессу согласования целей охраны окружающей среды с целями качества и стратегическими целями всего предприятия. Новая философия производства закладывает новое отношение не только к потребителю, но и к человеку на производстве, выдвигая на первый план здоровье людей, работающих на предприятии, живущих в его экологической зоне, потребляющих его продукцию. Поэтому подготовка специалистов по интегрированным системам менеджмента включает большой гуманитарный пласт, направленный на формирование умений и навыков организационной работы и мотивирования персонала, мультипликации знаний и опыта в производственно-управленческой среде, пропаганды позитивных результатов и ликвидации экологической безграмотности широких слоев населения.

Введение системы сертификации по экологическим требованиям - новый, прогрессивный шаг в развитии системы охраны окружающей среды. Как показал Российский эксперимент по внедрению данной системы, - это выгодный, эффективный механизм, направленный на переход на качественно новый уровень развития промышленности. Предприятие берет на себя ответственность за охрану окружающей среды и подтверждает сертификатом, что не нуждается в постоянном контроле своей деятельности. Система управления окружающей средой существует практически на любом предприятии, необходимо только её эффективно отрегулировать. Сертификация «третьей» независимой стороной позволяет предприятию решать свои проблемы самостоятельно, без привлечения специалистов экологического контроля [5].

Обеспечение планомерного эффективного улучшения экологической обстановки в промышленных центрах России требует усиления рыночной мотивации предприятий на внедрение систем экологического менеджмента. Отсутствие в России международного уровня менеджеров и аудиторов окружающей среды сдерживает внедрение систем экологического менеджмента. Промышленные предприятия вынуждены обращаться к зарубежным консалтинговым фирмам и органам по сертификации и нести большие расходы при разработке и внедрении

своих систем. Очень важно, что органы власти начали уделять внимание вопросам подготовки отечественных кадров по интегрированным системам менеджмента.

Как показывает опыт, внедрение СУОС на Российских предприятиях в качестве элемента общей системы административного управления позволит в значительной мере повысить эффективность природоохранной деятельности и рационального использования природных ресурсов.

Литература:

1 Розенталь О.М. *Природа и мы* // *Стандарты и качество*, 2005. – № 4. – С.24-25.

2 Аладышкина Н. *Стандарты ИСО 14000: история и статистика* // *Стандарты и качество*, 2000. – № 9. – С. 35-37.

3 Петюшенко Л. *Охрана окружающей среды и человеческая деятельность* // *Стандарты и качество*, 2003. – № 2. – С. 88-91.

4 Пункевич Б.С. *Стандарты ИСО серии 14000 в действии* / Б.С. Пункевич, В.Н. Фокин // *Стандарты и качество*, 2005. – № 4. – С. 26-30.

5 Федянин В.И. *Экологическая безопасность производств* / В.И. Федянин, О.Н. Болдырева, А.В. Звягинцева // *Машиностроитель*, 2004. – № 8. – С. 39-41.

УДК 614.8

Д-р техн. наук, проф. Гушина Т.В.

(Орловский государственный аграрный университет)

Россия, г. Орёл, тел. (4862)555524; E-mail: avk@ostu.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

The quality of production in our branch is the saved health and protected and Sometimes saved life of a working man.

Работники промышленных предприятий подвергаются воздействию химических веществ (окислы азота, кислоты, сероводород, оксид и диоксид углерода), пыли (например, минеральная, зерновая, сахарная), других вредных и опасных производственных факторов. Большинство химических соединений относятся к II – IV классам опасности по ГОСТ 12.1.005, а их содержание превышает ПДК в десятки раз.

Поражения человека вредными и опасными факторами являются случайными событиями со сложной причинно-следственной связью, а их характер имеет вероятностную природу. Надежность и стабильность системы «человек – средства индивидуальной защиты – производственная среда» зависит от условий труда на производстве и таких факторов как правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные.

Ассортимент выпускаемых средств индивидуальной защиты (СИЗ) насчитывает около тысячи наименований различного назначения с

разной степенью эффективности и других потребительских характеристик. Вопрос о расширении ассортимента и качества средств индивидуальной защиты, установление номенклатуры показателей качества и их нормативов с целью повышения защитных свойств является сложным.

Достоверную оценку устойчивости системы «человек – средства индивидуальной защиты – производственная среда» дают методы квалиметрии, которые позволяют объединить количественные и качественные показатели свойств изделий, процессов и систем.

На эффективность средств индивидуальной защиты оказывают влияние различные показатели (свойства).

Аппарат квалиметрии позволяет выделить свойства и признаки оцениваемого объекта по своей весомости влияния на качество объекта. Используя для этой цели классификацию СИЗ, предложенную автором, выстраиваем систему оценки свойств средств защиты, которая представлена в таблице.

Таблица – Ранжирование свойств средств индивидуальной защиты

I ранг – ПОКАЗАТЕЛИ НАЗНАЧЕНИЯ (ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА)		
1 Механическое воздействие	7 Нефтепродукты	13 Растворы кислот
2 Скольжение	8 Статические нагрузки	14 Растворы щелочей
3 Повышенные температуры	9 Сигнальная	15 Общие производственные загрязнения
4 Пониженные температуры	10 Электроток	16 Биологические факторы
5 Радиоактивные загрязнения	11 Нетоксичная пыль	<i>Всего 72 показателя</i>
6 Органические растворители	12 Токсичные вещества	
II ранг – ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ		
1 Стойкость к действию вредных факторов производственной среды	4 Загрязняемость	8 Дезактивируемость
2 Очищаемость	5 Истираемость по поверхности	9 Восприимчивость к биологическому загрязнению
3 Ворсоотделение	6 Прочность шва	
	7 Пылепроницаемость шва	
III ранг – ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ		
1 Работоспособность	2 Тепловое содержание человека в СИЗ	3 Соответствие линейных размеров антропометрическим данным человека
IV ранг – ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ		
1 Безвредная утилизация	2 Возможность переработки и вторичного использования	
V ранг – ЭСТЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ		
1 Соответствие современному направлению конструирования	2 Функционально-конструктивная приспособляемость	3 Художественно-колористическое оформление

Отсутствие основного защитного показателя (например, от статического электричества) позволяет использовать предлагаемые СИЗ только для защиты от общих производственных загрязнений, а недостаточные физико-механические показатели материалов и вовсе исключают изделия из класса СИЗ.

Некоторые показатели, например эстетичные свойства СИЗ, казалось, не влияют на эффективность изделий, но здесь вступает фактор психофизиологического состояния человека, который играет важную роль в поддержании иммунного статуса человека и сопротивляемости его организма.

Большое значение при применении СИЗ на производстве имеет сохранение их защитных свойств во времени, возможность осуществлять очистку от вредных и опасных веществ, способность сохранять прочностные свойства, не загрязнять воздух рабочей зоны и выпускать продукцию.

Применение ранжирования свойств средств защиты по различным показателям позволяет разработать не только высокоэффективные СИЗ, но и построить систему их применения.

Методология создания защитной одежды основана на сопоставлении основных показателей качества и гигиенических свойств действующего ассортимента изделий и тканей для спецодежды.

Необходимым условием создания высокоэффективных СИЗ является разработка материалов нового поколения, определяющих защитные свойства этих изделий, а также методов, позволяющих оценить их свойства и пригодность к использованию в тех или иных конкретных условиях, прогнозировать поведение СИЗ в различных условиях.

Специальные материалы (хлопчатобумажные, полимерные и смесовые ткани) с различными пропитками должны обладать уникальными защитными свойствами, но при этом исключать

возможность токсического, раздражающего и сенсibilизирующего действия на организм человека и допущены к применению Государственным санитарно-эпидемиологическим надзором.

СИЗ разрабатываются в соответствии с требованиями ГОСТ 15.004-88, предполагающего испытания изделий. В процессе испытаний оцениваются конструкция, материалы, защитные показатели и др. Некоторые показатели первоначально определяют в лабораторных условиях – физико-механические и защитные свойства материалов, что позволяет обрабатывать опытные варианты СИЗ.

Поведение материалов для изготовления СИЗ при воздействии вредных и опасных производственных факторов позволяет прогнозировать применение известного математического метода «движения границ прогноза вперед» («шаги вперед»).

Научно-практические работы, направленные на повышение эффективности СИЗ для работников народного хозяйства, необходимо проводить по следующим основным направлениям:

- анализ условий выполнения работниками трудовых обязанностей и опасных и вредных производственных факторов, действующих на предприятиях исследуемой отрасли экономики;
- разработка методов испытаний по определению характеристик СИЗ;
- разработка средств индивидуальной защиты и материалов для их изготовления, проведение стендовых и производственных испытаний;
- разработка нормативной документации (межгосударственные, российские и отраслевые стандарты на средства индивидуальной защиты, методы испытаний и правила обеспечения);
- разработка рекомендаций по использованию средств индивидуальной защиты отечественного и зарубежного производства на предприятиях АПК;
- обучение специалистов технических специальностей вопросам обеспечения

современными средствами индивидуальной защиты, в том числе нормативно-правовым;

- разработка и распространение специальной литературы (каталоги-справочники и отраслевые

нормы бесплатной выдачи спецодежды, специальной обуви и других СИЗ), проведение консультативной работы для специалистов предприятий.

УДК 632.3

Д-р техн. наук, проф. Гущина Т.В.

(Орловский государственный аграрный университет)

Россия, г. Орёл, тел. (4862)555524; E-mail: avk@ostu.ru

МЕТОДОЛОГИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЛАНДШАФТНЫХ РАБОТ

In this article is product the methodology of safety landscape work.

К области деятельности ландшафтного дизайна относится садово-парковое искусство в садах и парках любых размеров – от традиционных шести соток до безграничных территорий заповедных лесопарков. В задачи специалиста ландшафтного дизайна входит создание красоты «на голом месте» – формирование «альпийских» гор, высадка редких растений, строительство беседок, фонтанов, бассейнов, применение скульптурных сооружений. Такая работа требует специальных знаний и соответствующего образования, высшего архитектурного и озеленительного.

Особенностью выполнения работ является их поэтапное выполнение: сначала проектные (подготовительные) и затем непосредственно на объекте, зачастую удаленного от населенных мест.

Требования охраны и безопасности при выполнении проекта на объекте, должны быть предусмотрены уже на первом проектом этапе, так как второй этап характеризуется воздействием на работника следующих неблагоприятных факторов:

- разнообразием работ, нередко с использованием изношенного или приспособленного оборудования;
- выполнением технологических операций в различных условиях;
- распределением рабочей силы по отдаленным районам, в которых связь со службами охраны здоровья недостаточно налажена;
- природными метеорологическими факторами, определяющими условия труда рабочих;
- низким уровнем и недостаточным внедрением трудовоохраняющих мероприятий на объектах.

Высокие результаты любого производственного (технологического процесса) должны достигаться при условии выполнения требований охраны труда.

Общие требования безопасности. Безопасность производственных процессов в течение всего времени их функционирования обеспечивается выбором производственных помещений, оборудования, исходных материалов, технологических процессов, приемов, режимов работы, средств защиты работающих, соответствующих характеру проявления возможных опасных и вредных производственных факторов.

Объектно-пространственная (ландшафтная) среда должна формироваться с учетом обеспечения единства профессиональной (производственной)

деятельности с требованиями безопасности; навыки по созданию нормальных условий труда и освоению методов определения зон повышенного техногенного риска; умение выбора системы защиты человека при эксплуатации отдельных видов технологических процессов и производственного оборудования.

Обеспечение безопасности работников на производстве предполагает проведение мероприятий:

- удаление опасных и вредных веществ и материалов из рабочей зоны;
- снижение уровня вредных факторов до величины, установленной санитарными нормами;
- защиту от действия опасных и вредных производственных факторов, сопутствующих принятой технологии и условиям работы или возникающих при нарушении технологического процесса.

Работы по ландшафтному дизайну необходимо начинать не только с ознакомления требований Заказчика к результатам оформительских и строительных работ, но и тщательного изучения:

- анализа организации работы по охране труда и пожарной безопасности на предприятии, для которого ведется разработка;
- оценки сложившейся системы охраны труда на предприятии;
- оценки безопасности исходных и расходных материалов, необходимых в производственных и вспомогательных процессах;
- оценки и обеспечения безопасности конкретного технологического процесса;
- потерь от травматизма и заболеваемости;
- мероприятий по обеспечению безопасности.

Оценка условий труда на предприятии опирается на исследование следующих показателей:

- характеристики уровня механизации работ и напряженности труда;
- аттестации рабочих мест по условиям труда (микроклимат, освещенность, запыленность, загазованность, шум, вибрация);
- наличия средств нормализации условий труда, компенсационных средств, санитарно-бытовых помещений;
- обеспечения и организации ухода за средствами индивидуальной защиты.

Санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны, оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата (температура воздуха; относительная влажность воздуха; скорость движения воздуха; интенсивность теплового излучения) в производственных помещениях должны соответствовать ГОСТ 12.1.005-88.

Проектно-конструкторский этап. Специалисту ландшафтного дизайна при проектировании необходимо учитывать требования безопасности труда при создании и формировании благоприятной для человека объектно-пространственной среды с целью получения максимального санитарно-гигиенического, рекреационного, природоохранного, эстетического, градостроительного эффекта от системы озеленяемых и благоустраиваемых территорий населенных мест.

На стадии проектирования следует опираться на основные положения в области охраны труда, изложенные в Конституции Российской Федерации, Трудовом кодексе Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ, законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.06.1997 г. № 116-ФЗ, законе «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 г. № 181-ФЗ, Постановлении Минтруда РФ «О проведении аттестации рабочих мест по условиям труда» от 14.03.1997 № 12, которые устанавливают гарантированные права работников на сохранение жизни и здоровья в процессе трудовой деятельности на предприятиях различных форм собственности, независимо от сферы хозяйственной деятельности и ведомственной подчиненности.

В проектно-конструкторский и технологический разделы квалификационной работы должны быть включены требования безопасности при производстве работ по благоустройству и озеленению территорий населенных мест, исходным материалам, а также при эксплуатации готового объекта.

Проектные работы должны начинаться с проведения анализа территории объекта по благоустройству и озеленению населенных мест и предприятий на наличие техногенной опасности:

- расположение подземных коммуникаций;
- расположение линий воздушных электропередач;
- вредные и опасные производственные факторы от действующего оборудования;
- пожаробезопасность проводимых работ;
- вредные и опасные производственные факторы от технологического оборудования;
- оформление допуска на проводимые работы;
- необходимость применения средств защиты.

Требования к готовому объекту:

- на территории должны быть установлены ограждения и знаки безопасности опасных зон;
- материалы, используемые при благоустройстве и озеленении не должны оказывать опасного и вредного воздействия на человека и животных;
- конструкция и взаимное расположение малых форм (фонтаны, фонтанчики для питья, скамьи, столы и др.), используемых для благоустройства, должны соответствовать антропометрическим

показателям человека и эргономическим требованиям по ГОСТ 12.2.032 -78 и ГОСТ 12.2.033-78;

- готовые объекты или его части не должны вызывать физических и нервно-психических перегрузок;
- на отдаленных объектах должна быть предусмотрена защита от возможных негативных воздействий природного характера и погодных условий.

Требования к растениям, применяемым для озеленения (требования должны особенно строго соблюдаться при оформлении детских площадок):

- любая часть растений (корни, стебли, ветви, листья, цветы, плоды) не должны быть токсичными для человека, или вызывать аллергические реакции;
- растения своими частями (шипы) не должны наносить механические повреждения;
- при выборе растений следует учесть возможность развития корневой и наземной части насаждений, особенно на участках прокладки подземных коммуникаций и воздушных линий электропередач.

Строительные работы, выполняемые на благоустраиваемом объекте, должны соответствовать:

- СНиП 12-03-2001 Безопасность труда в строительстве Часть 1. Общие требования;
- СНиП 12-04-2002 Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство.

На общем листе (графическая часть) проекта должны быть обозначены опасные зоны производства работ осуществляется знаками безопасности по ГОСТ Р 12.4.026-2001.

Безопасность выполнения работ на объекте зависит от следующих факторов:

- научной организации труда;
- выполнения организационных, технических, организационно-технических и санитарно-гигиенических мероприятий;
- профессиональной квалификации персонала, стажа, возраста, здоровья;
- проведения инструктажей;
- постоянного контроля выполнения работ.

Выводы

Для успешной деятельности выпускников кафедры ландшафтного дизайна студентов необходимо обучать не только основам профессии, включающей знания в области строительства, архитектуры, растениеводства и экологии, но следует уделять серьезное внимание вопросам охраны труда, производственной безопасности, эргономики и БЖД

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 539.3

Д-р техн. наук, проф., Гордон В.А., асп. Волчков А.А.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орёл, тел. (4862)419848; E-mail: gordon@ostu.ru

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ОПОРНЫХ СВЯЗЕЙ НА ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛКИ

The influence of the harnesses of supporting connections for the frequencies of the natural flexural vibrations is investigated based on example of simple beam.

В современном машиностроении получают широкое распространение мехатронные системы – управляемые электромеханические устройства. Особый практический интерес представляет использование активных магнитных подшипников (АМП) в опорных узлах роторных машин. Основные преимущества АМП – отсутствие механического контакта и смазки – позволяют использовать их при высоких скоростях вращения, в вакууме и агрессивных средах, высоких и низких температурах, стерильных технологиях.

Применение АМП за счет увеличения частоты вращения повышает производительность роторов и снижает весогабаритные показатели, улучшает виброакустические характеристики машин. Перспективной является возможность повышения производительности и чистоты обработки металлообрабатывающими электрошпинделями на основе АМП, а также возможность комбинированного движения инструмента, например использование микроколебаний при шлифовании или микродолбежки при сверлении.

Применение АМП позволяет также активно управлять вибрацией упругой механической системы, изменяя в широких пределах жесткость и демпфирование опорных связей, и, тем самым, изменяя в необходимую сторону частоты и формы собственных упругих колебаний системы.

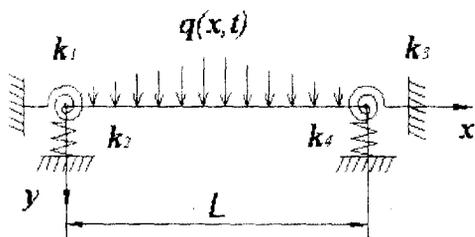


Рис. 1. Расчетная схема вибрирующей балки

В настоящей работе исследуется зависимость частот собственных изгибных колебаний балки от жесткостей опорных связей. На рис. 1 изображена расчетная схема двухопорной балки, упруго опертой по обоим концам. Предполагается, что концы балки удерживаются каждый двумя упругими связями с жесткостями k_1, k_3 и k_2, k_4 , ограничивающими

соответственно повороты и вертикальные смещения концевых поперечных сечений. Величины жесткостей $k_i (i=1,4)$ с течением времени по различным причинам и законам могут квазистатически изменяться.

Ставится задача определения частот собственных изгибных колебаний балки при различных сочетаниях жесткостей опорных связей. Уравнение собственных движений изображенной на рис. 1 балки, согласно теории стержней Эйлера-Бернулли, имеет вид:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где $y = f(x,t)$ – поперечное смещение оси балки;

E, ρ – соответственно, модуль упругости и плотность материала балки;

A, J – соответственно площадь и осевой момент инерции поперечного сечения балки;

L – длина балки.

В общем случае упругой заделки обоих концов граничные условия принимают вид:

$$\begin{aligned} EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{x=0} &= k_1 \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=0}, & EJ \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \Big|_{x=0} &= -k_2 y \Big|_{x=0} \\ EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{x=L} &= -k_3 \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=L}, & EJ \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \Big|_{x=L} &= k_4 y \Big|_{x=L}. \end{aligned} \quad (2)$$

Начальные условия в задаче о собственных колебаниях не формулируются.

Приведем уравнение (1) и граничные условия (2) к безразмерному виду введением безразмерных переменных и параметров:

$$\begin{aligned} \eta = \frac{y}{L}, \xi = \frac{x}{L}, \omega_0^2 &= \frac{EJ}{\rho AL^4}, \tau = \omega_0 t, \\ \alpha_1 = \frac{k_1 L}{EJ}, \alpha_2 = \frac{k_2 L^3}{EJ}, \alpha_3 &= \frac{k_3 L}{EJ}, \alpha_4 = \frac{k_4 L^3}{EJ}. \end{aligned}$$

Тогда уравнение движения и граничные условия принимают соответственно вид (3) и (4):

$$\frac{\partial^4 \eta}{\partial \xi^4} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial \tau^2} = 0; \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} \right|_{\xi=0} = \alpha_1 \left. \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0}, \quad \left. \frac{\partial^3 \eta}{\partial \xi^3} \right|_{\xi=0} = -\alpha_2 \eta|_{\xi=0} \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} \right|_{\xi=1} = -\alpha_3 \left. \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right|_{\xi=1}, \quad \left. \frac{\partial^3 \eta}{\partial \xi^3} \right|_{\xi=1} = \alpha_4 \eta|_{\xi=1}$$

Разделяя переменные уравнения (3) представлением

$$\eta(\xi, \tau) = W(\xi)T(\tau), \quad (5)$$

получим два обыкновенных дифференциальных уравнения для функций $W(\xi)$ и $T(\tau)$:

$$\frac{d^4 W}{d\xi^4} - \omega^2 W = 0; \quad (6)$$

$$\frac{d^2 T}{d\tau^2} - \omega^2 T = 0, \quad (7)$$

где ω – безразмерная частота собственных изгибных колебаний балки.

Общие решения уравнений (6) и (7) имеют вид,

$$\begin{cases} \alpha_1 C_1 + \sqrt{\omega} C_2 + \alpha_1 C_3 - \sqrt{\omega} C_4 = 0 \\ -\omega \sqrt{\omega} C_1 + \alpha_2 C_2 + \omega \sqrt{\omega} C_3 + \alpha_2 C_4 = 0 \\ (\alpha_3 \cos \sqrt{\omega} - \sqrt{\omega} \sin \sqrt{\omega}) C_1 - (\alpha_3 \sin \sqrt{\omega} + \sqrt{\omega} \cos \sqrt{\omega}) C_2 + \\ + (\alpha_3 \cosh \sqrt{\omega} + \sqrt{\omega} \sinh \sqrt{\omega}) C_3 + (\alpha_3 \sinh \sqrt{\omega} + \sqrt{\omega} \cosh \sqrt{\omega}) C_4 = 0 \\ (-\alpha_4 \sin \sqrt{\omega} - \omega \sqrt{\omega} \cos \sqrt{\omega}) C_1 + (-\alpha_4 \cos \sqrt{\omega} + \omega \sqrt{\omega} \sin \sqrt{\omega}) C_2 + \\ + (-\alpha_4 \sinh \sqrt{\omega} + \omega \sqrt{\omega} \cosh \sqrt{\omega}) C_3 + (-\alpha_4 \cosh \sqrt{\omega} + \omega \sqrt{\omega} \sinh \sqrt{\omega}) C_4 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Условием существования ненулевых решений системы однородных (11) является равенство нулю ее определителя:

$$\begin{vmatrix} P_1(\omega, \alpha_4) & P_2(\omega, \alpha_4) & P_3(\omega, \alpha_4) & P_4(\omega, \alpha_4) \\ Q_1(\omega, \alpha_4) & Q_2(\omega, \alpha_4) & Q_3(\omega, \alpha_4) & Q_4(\omega, \alpha_4) \\ -\omega \sqrt{\omega} & \alpha_2 & \omega \sqrt{\omega} & \alpha_2 \\ \alpha_1 & \sqrt{\omega} & \alpha_1 & -\sqrt{\omega} \end{vmatrix} = 0, \quad (12)$$

В уравнении (12) обозначено:

$$\begin{aligned} P_1 &= -\alpha_4 \sin \sqrt{\omega} - \omega \sqrt{\omega} \cos \sqrt{\omega}, \\ P_2 &= -\alpha_4 \cos \sqrt{\omega} + \omega \sqrt{\omega} \sin \sqrt{\omega}, \\ P_3 &= -\alpha_4 \sinh \sqrt{\omega} + \omega \sqrt{\omega} \cosh \sqrt{\omega}, \\ P_4 &= -\alpha_4 \cosh \sqrt{\omega} + \omega \sqrt{\omega} \sinh \sqrt{\omega}, \\ Q_1 &= \alpha_3 \cos \sqrt{\omega} - \sqrt{\omega} \sin \sqrt{\omega}, \\ Q_2 &= -\alpha_3 \sin \sqrt{\omega} - \sqrt{\omega} \cos \sqrt{\omega}, \\ Q_3 &= \alpha_3 \cosh \sqrt{\omega} - \sqrt{\omega} \sinh \sqrt{\omega}, \\ Q_4 &= -\alpha_3 \sinh \sqrt{\omega} - \sqrt{\omega} \cosh \sqrt{\omega}. \end{aligned}$$

Раскрывая определитель (12), получим частотное уравнение, из которого могут быть определены собственные частоты ω_n изгибных колебаний балки.

На рис. 2, 3, 4 изображены трехмерные диаграммы зависимости между двумя безразмерными

соответственно:

$$W = C_1 \sin \sqrt{\omega} \xi + C_2 \cos \sqrt{\omega} \xi + C_3 \sinh \sqrt{\omega} \xi + C_4 \cosh \sqrt{\omega} \xi \quad (8)$$

$$T = A \sin \omega \tau + B \cos \omega \tau, \quad (9)$$

где $A, B, C_i (i=1,4)$ – постоянные интегрирования.

Разделяя переменные в граничных условиях (4) получим:

$$\begin{aligned} W''(0) &= \alpha_1 W'(0), \quad W'''(0) = \alpha_2 W(0) \\ W''(1) &= -\alpha_3 W'(1), \quad W'''(1) = -\alpha_4 W(1), \end{aligned} \quad (10)$$

где штрих означает дифференцирование по ξ .

Удовлетворяя граничным условиям (10) с учетом вида функции (8), получим однородную систему алгебраических уравнений для коэффициентов $C_i (i=1,4)$:

жесткостями α_1, α_2 связей одной опоры и шестью первыми безразмерными собственными частотами $\omega_1(a), \omega_2(b), \omega_3(v), \omega_4(z), \omega_5(d), \omega_6(e)$ при постоянных значениях жесткостей $\alpha_3 = \alpha_4$ связей в другой опоре.

Анализ характера поверхностей, изображенных на рис. 2, 3, 4, показывает, что в указанных диапазонах изменения α_1, α_2 при заданных значениях $\alpha_3 = \alpha_4$:

– основная частота ω_1 более чувствительна к изменению жесткости связи α_2 (ограничение поступательных перемещений), чем к изменению α_1 (ограничение поворотов);

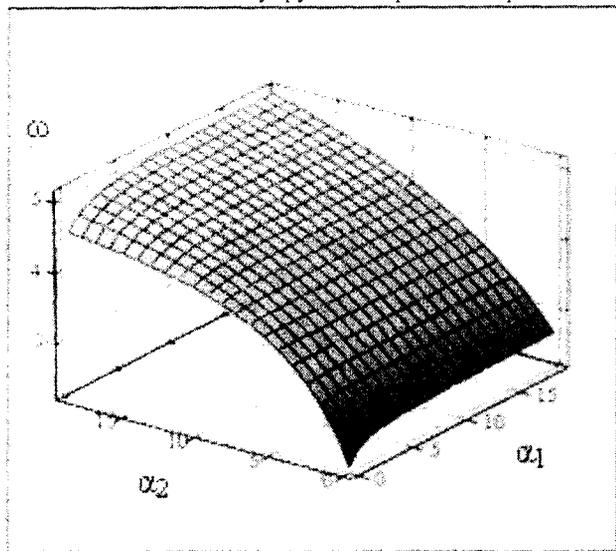
– при увеличении жесткостей связей $\alpha_3 = \alpha_4$ поверхность диаграммы для основной частоты ω_1 стремится к симметричному виду, что означает выравнивание чувствительности основной частоты к изменению жесткостей α_1 и α_2 (диаграммы на рис. 2, а; 3, а; 4, а);

– для второй частоты ω_2 наблюдается обратная тенденция – при малых $\alpha_3 = \alpha_4$ диаграмма 2б почти симметрична относительно изменения α_1 и α_2 , тогда как при увеличении $\alpha_3 = \alpha_4$ зависимость ω_2 от α_2 ослабевает по сравнению с зависимостью от α_1 (диаграммы на рис. 3, б; 4, б);

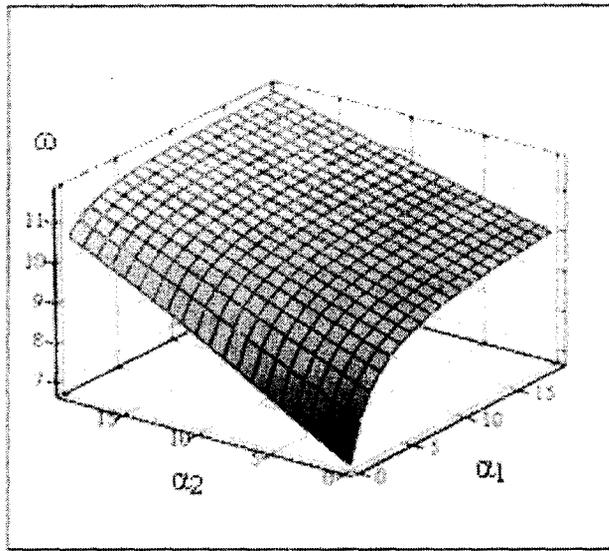
– высшие частоты, начиная с третьей ω_3 , практически не зависят от изменения α_2 .

Таким образом, заключаем, что, варьируя жесткости связей α_1, α_2 (особенно α_1) можно эффективно управлять спектром частот собственных изгибных колебаний упруго опертых стержней,

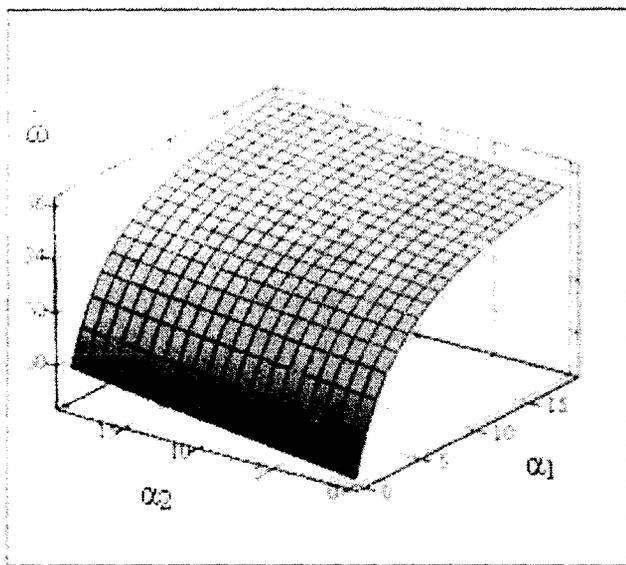
причем изменение жесткости α_2 связи, ограничивающей поступательное перемещение опорного сечения, сказывается лишь на основной и второй частотах, практически не оказывая влияния на более высокие частоты.



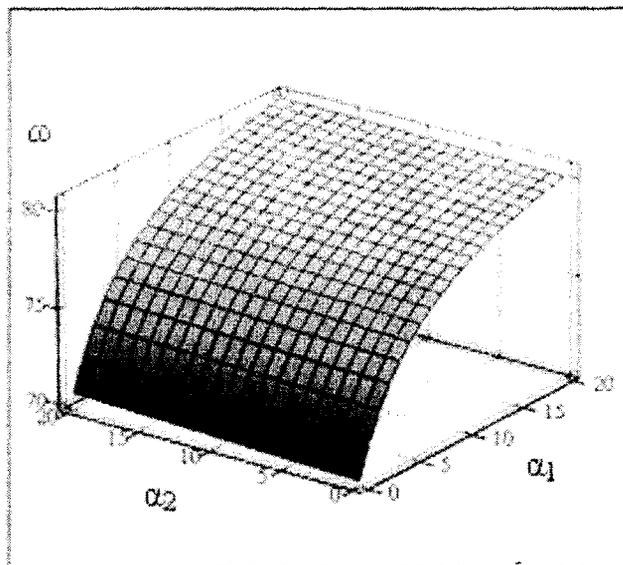
а)



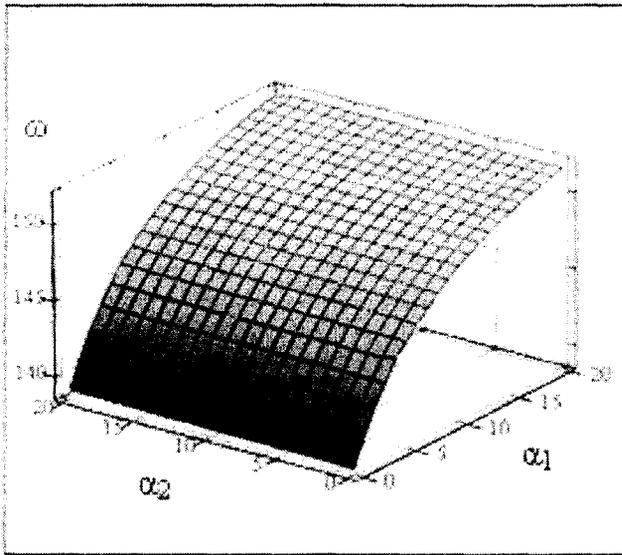
б)



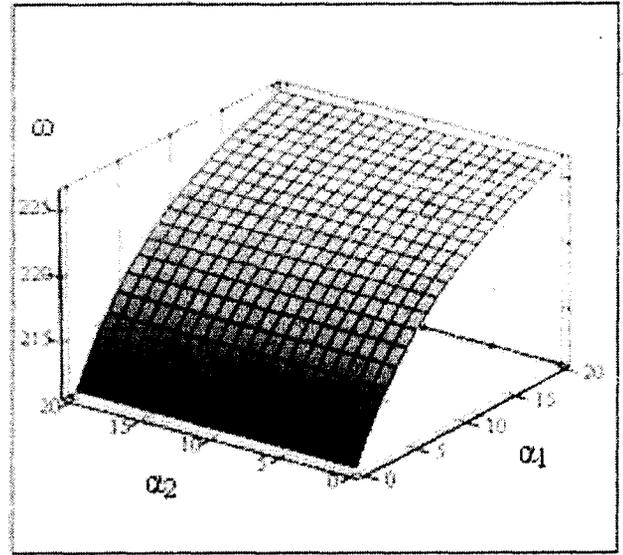
в)



г)

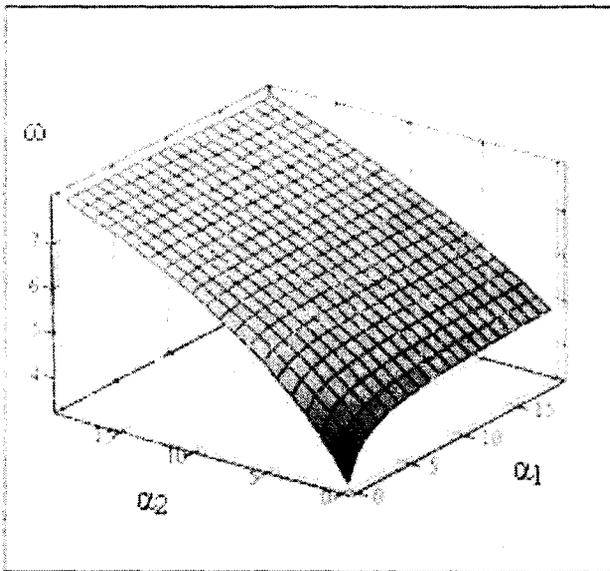


д)

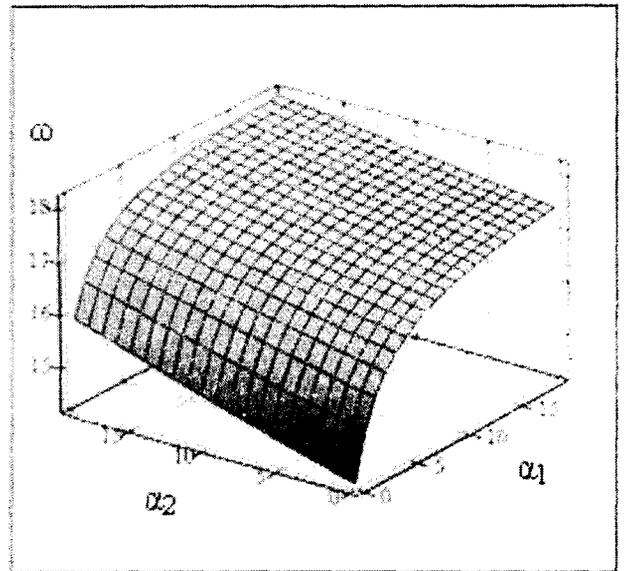


е)

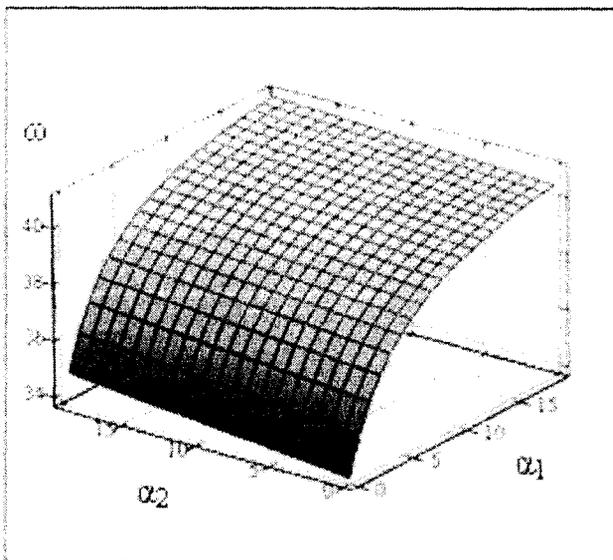
Рис. 2. Зависимость ω от α_1 и α_2 при $\alpha_3 = \alpha_4 = 10$



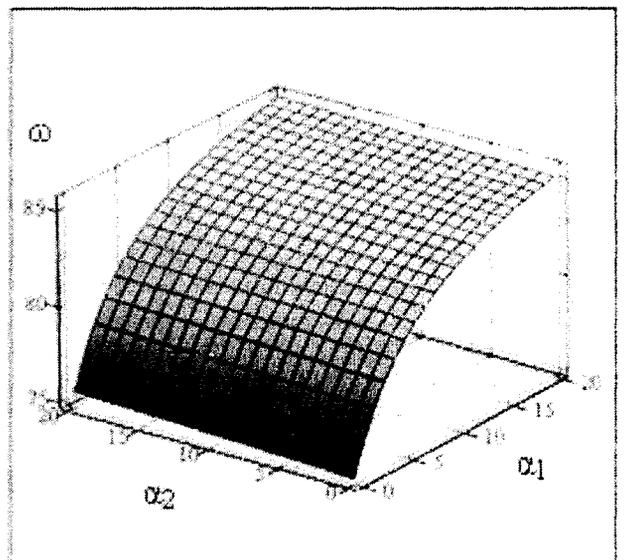
а)



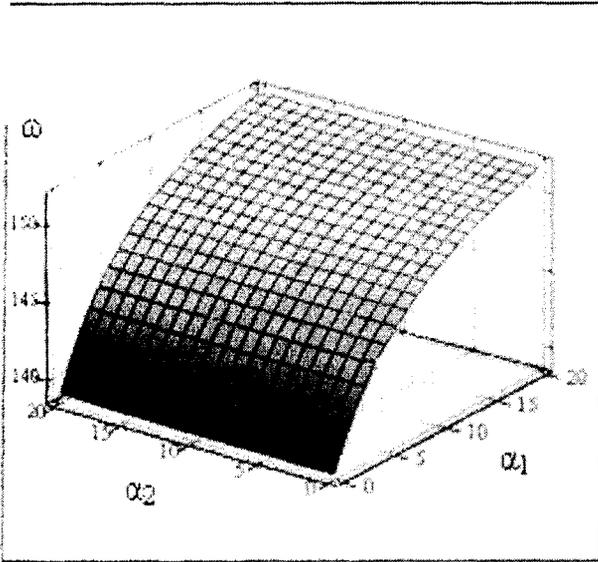
б)



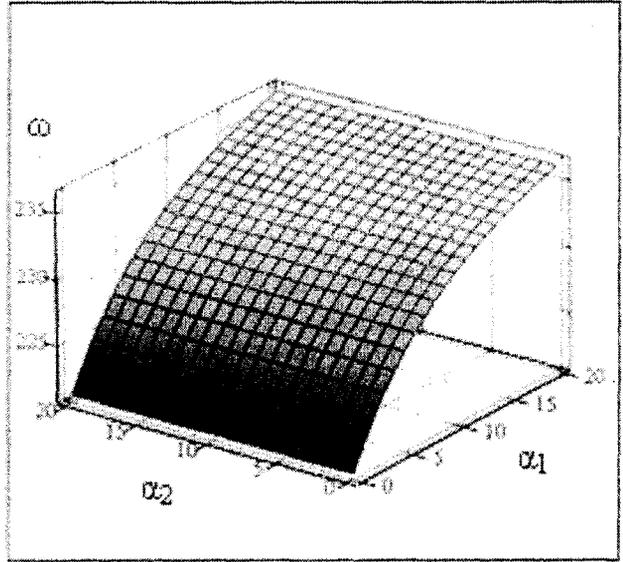
в)



г)

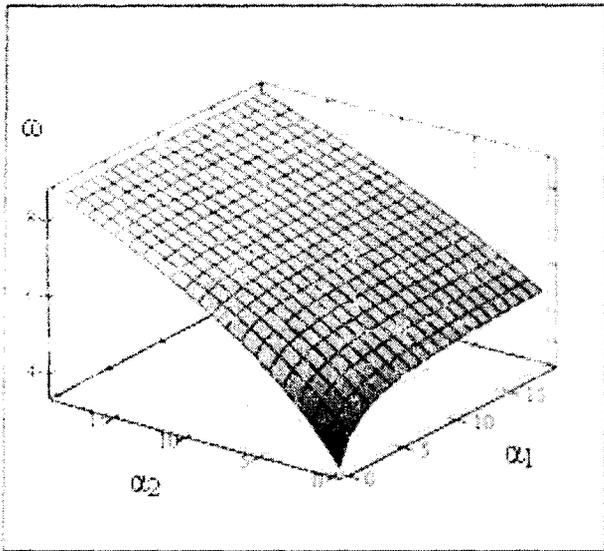


д)

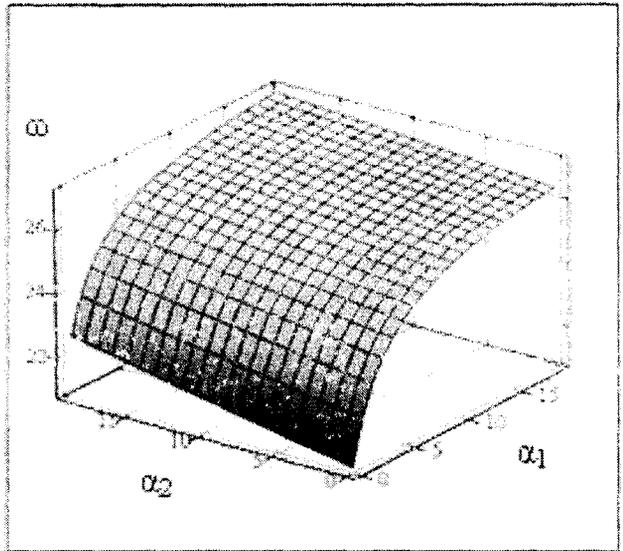


е)

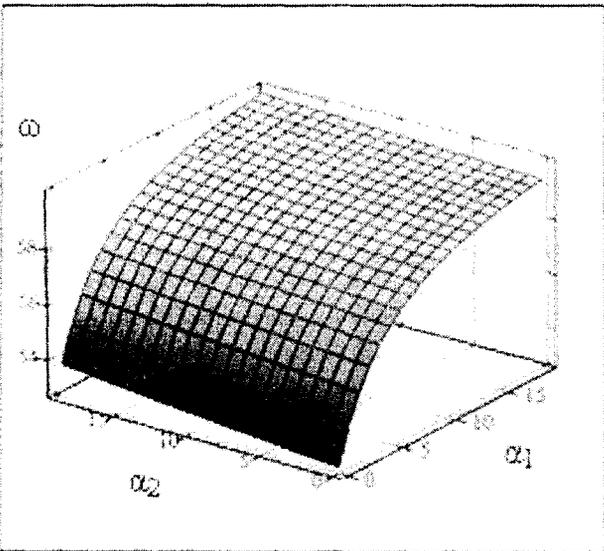
Рис. 3. Зависимость ω от α_1 и α_2 при $\alpha_3 = \alpha_4 = 100$



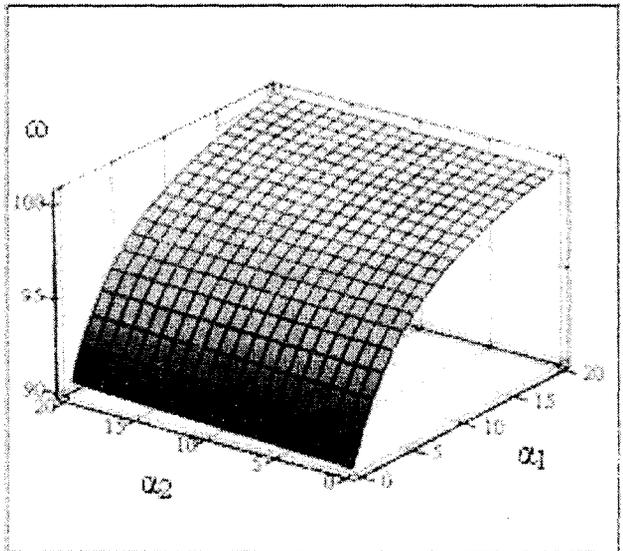
а)



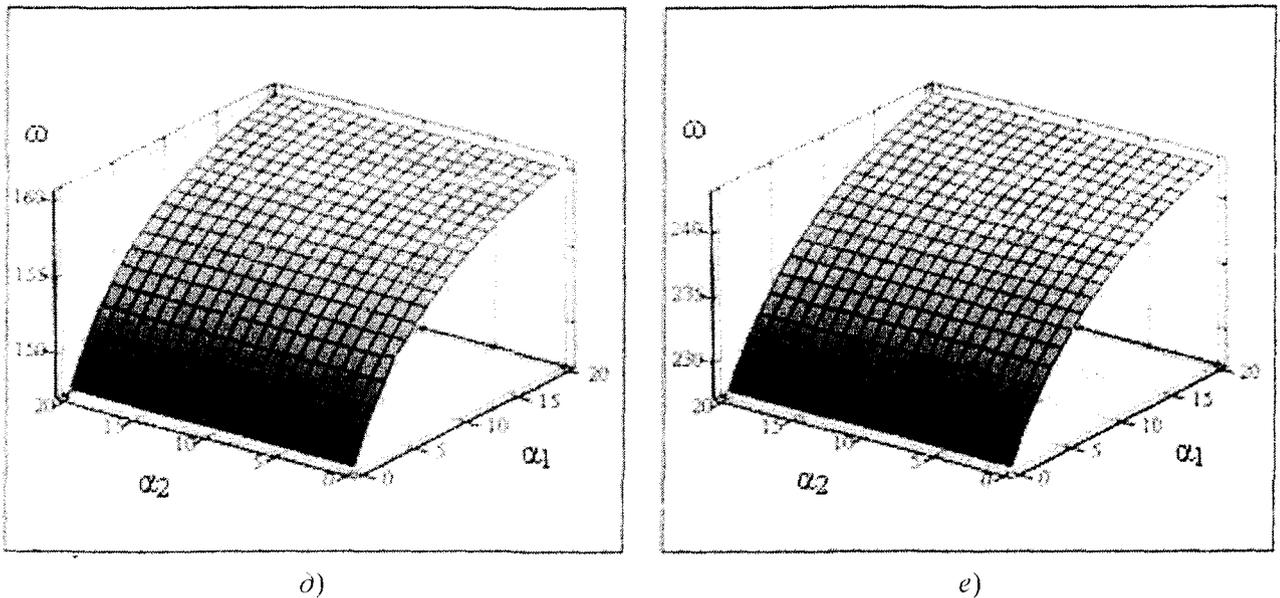
б)



в)



г)

Рис. 4. Зависимость ω от α_1 и α_2 при $\alpha_3 = \alpha_4 = 1000$

УДК 531.13

Канд. техн. наук, доц. Екимов Л.С.
 (Орловский государственный технический университет)
 Россия, г. Орёл, тел. (4862) 419889; E-mail: physics@ostu.ru

ПРОЦЕСС ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ ЭЛЛИпсоИДНОЙ И ШАРООБРАЗНОЙ ФОРМЫ ПО НАКЛОННЫМ ПЛОСКОСТЯМ

This paper presents the description of the process of the movement of globe-shaped and elliptical solids downhill and results of theoretical solution which exclude the additional damages of the solids when they ball on the surface several times. These analytical equations have not only theoretical but and practical means because they may be use for designing machines and conditions of their works.

В машиностроительной, строительной и металлургической промышленности имеют место движения тел эллипсоидной и шарообразной формы по наклонным плоскостям.

В процессе движения таких тел наибольшее влияние на повреждаемость насыпного материала оказывает превышение допустимых скоростей при движении их по наклонным поверхностям. Кроме того, при ударе тело плоскость возможны различные случаи, в том числе и его отражение (остаток) от преграды, повторное падение на нее, что вызывает дополнительный травматизм тел. С целью исключения такого случая исследуем процесс удара тела о преграду и установим условия, при которых исключается его отражение и повреждение.

Для тела безопасен отскок (отражение), обладающей энергией, не превышающей допустимого ее изменения при повторном ударе.

Это изменение энергии можно рассчитать по следующей формуле:

$$\Delta E = \frac{m}{2}(V_1^2 - V_0^2) + \frac{J_0}{2}(\omega_1^2 - \omega_0^2). \quad (1)$$

За время полета ΔE возрастает за счет увеличения вертикальной составляющей скорости полета, тогда как её горизонтальная составляющая и угловая скорость вращения тела остаются постоянными, то есть, можно записать:

$$\Delta E = \frac{m}{2}(V_2^2 - V_1^2). \quad (2)$$

Но известно, что

$$\Delta A = mgl \sin \alpha. \quad (3)$$

Приравняем выражения (2) и (3):

$$mgl \sin \alpha = \frac{\dot{m}}{2}(V_2^2 - V_1^2).$$

Откуда получаем зависимость:

$$V_2^2 = V_1^2 + 2gl \sin \alpha. \quad (4)$$

Для вычисления скорости падения тела в момент его удара о преграду необходимо знать скорость отражения тела после первого удара \vec{V}_0 , рис. 1.

Пусть тело массой m имеет \vec{V}_1 и ω_0 падает и ударяется в точке I о плоскость, наклоненную под углом α к горизонту. В точке I тело отражается под углом γ к нормали к плоскости падения. Скорость отраженного тела \vec{V}_1 . Из рис. 1 следует, что

$$\gamma_0 = 90^\circ - (\alpha + \gamma). \quad (5)$$

Запишем систему уравнений падения тела после его отражения

$$V_1 \sin \gamma_0 \cdot \tau + \frac{g\tau^2}{2} = l \sin \alpha, \quad (6)$$

$$V_1 \cos \gamma_0 \cdot \tau = l \cos \alpha. \quad (7)$$

Откуда получаем зависимость вида:

$$\tau = \frac{l \cdot \cos \alpha}{V_1 \cdot \cos \gamma_0}. \quad (8)$$

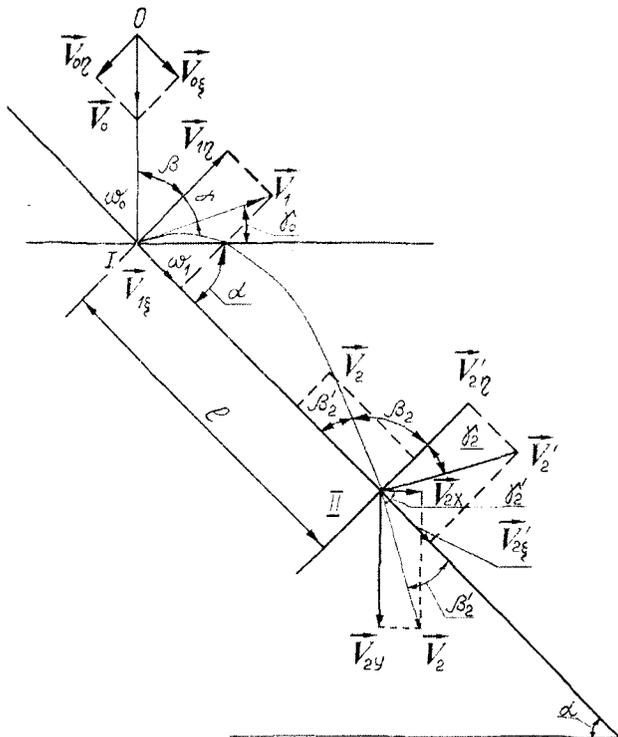


Рис. 1. Процесс удара тела о преграду

С учетом (8) выражение (6) запишется в виде:

$$V_1 \sin \gamma_0 \cdot \frac{l \cos \alpha}{V_1 \cos \gamma_0} + \frac{g}{2} \left(\frac{l \cos \alpha}{V_1 \cos \gamma_0} \right)^2 = l \cdot \sin \alpha.$$

После преобразований получим

$$l \cdot \frac{g}{2} \frac{\cos^2 \alpha}{V_1^2 \cos \gamma_0} = \sin(\alpha - \gamma_0). \quad (9)$$

После подстановки (5) в (9) получим:

$$l = \frac{2V_1^2}{g} \frac{\sin(\alpha + \gamma) \cdot \cos(2\alpha + \gamma)}{\cos^2 \alpha}. \quad (10)$$

В момент удара о плоскость составляющие скорости определяется из рис. 1 по формулам:

$$V_{2y} = V_1 \cdot \sin \gamma_0 + g\tau, \quad (11)$$

$$V_{2x} = V_1 \cdot \cos \gamma_0. \quad (12)$$

Откуда получаем:

$$\operatorname{tg} \gamma_2^1 = \operatorname{tg} \gamma_0 + \frac{gl \cos \alpha}{V_1^2 \cdot \cos^2 \gamma_0}. \quad (13)$$

После подстановки (10) в (13) получим

$$\operatorname{tg} \gamma_2^1 = \operatorname{tg} \gamma_0 - \frac{2 \cos(2\alpha + \gamma)}{\cos \alpha \cdot \sin(\alpha + \gamma)}. \quad (14)$$

Откуда

$$\gamma_2^1 = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \gamma_0 - \frac{2 \cos(2\alpha + \gamma)}{\cos \alpha \cdot \sin(\alpha + \gamma)} \right]. \quad (15)$$

Угол

$$\beta_2 = 90^\circ - \beta_2^1 = 90^\circ + \alpha - \gamma_2^1. \quad (16)$$

Определим составляющие скорости \vec{V}_2 к плоскости качения:

$$V_{2\eta}^1 = V_2 \cdot \sin \beta_2^1, \quad (17)$$

$$V_{2\varepsilon}^1 = V_2 \cdot \cos \beta_2^1. \quad (18)$$

Подставим (15) в (16), получим

$$\beta_2 = 90^\circ + \alpha - \operatorname{arctg} \left[\operatorname{ctg}(\alpha + \gamma) - \frac{2 \cos(2\alpha + \gamma)}{\cos \alpha \cdot \sin(\alpha + \gamma)} \right]. \quad (19)$$

После некоторых преобразований выражение (19) запишется в виде:

$$\beta_2 = 90^\circ + \alpha - \operatorname{arctg} \frac{\cos \gamma - 3 \cos(2\alpha + \gamma)}{\sin \gamma + \sin(2\alpha + \gamma)}. \quad (20)$$

Изменение энергии за время удара

$$\Delta E = \frac{m}{2} (V_1^2 - V_0^2) + \frac{J_0}{2} (\omega_1^2 - \omega_0^2). \quad (21)$$

Момент инерции шара определим, как

$$J_{ш} = \frac{2}{5} mR^2. \quad (22)$$

С учетом (22) выражение (21) запишется в виде

$$\Delta E = \frac{m}{2} \left[V_1^2 - V_0^2 + \frac{2}{5} R^2 (\omega_1^2 - \omega_0^2) \right]. \quad (23)$$

Допустимое изменение энергии за время удара

$$\Delta E_{\text{доп}} = mgh_{\text{доп}}. \quad (24)$$

Коэффициент допустимого изменения энергии клубня при ударе найдём из выражения:

$$K = \frac{\Delta E}{\Delta E_{\text{доп}}} = \frac{V_1^2 - V_0^2 + \frac{2}{5} R^2 (\omega_1^2 - \omega_0^2)}{2gh_{\text{доп}}} \quad (25)$$

При $k \geq 1$ тела будут повреждаться, что необходимо учитывать при разработке новых конструкций.

Наиболее полное описание процесса послепударного качения тела по наклонной плоскости в отсутствие его отскока от преграды (рис. 2) даёт следующая система дифференциальных уравнений

$$m\ddot{x}_0 = -T + G \cdot \sin \alpha, \quad (26)$$

$$J_0 \cdot \ddot{i} = T \cdot R - N_p \cdot f_k, \quad (27)$$

$$N_p - G \cdot \cos \alpha = 0, \quad (28)$$

$$\ddot{x}_{0'} = R \cdot \ddot{i}. \quad (29)$$

Момент инерции тела эллипсоидной формы

$$J_0 = \frac{1}{5} m(b^2 + c^2), \quad (30)$$

где b и c – полуоси эллипса.

Положим, что

$$R_{\text{ср}} = \frac{c+b}{2}. \quad (31)$$

С учетом (30) выражение (31) запишется

$$J_0 = \frac{1}{5} m R_{\text{ср}}^2 \beta_{\text{ш}}. \quad (32)$$

Коэффициент $\beta_{\text{ш}}$ определяется из соотношения:

$$\left(\frac{c+b}{2}\right)^2 \cdot \beta_{\text{ш}} = c^2 + b^2.$$

Откуда получаем выражение:

$$\beta_{\text{ш}} = \frac{4(c^2 + b^2)}{(c+b)^2}. \quad (33)$$

Таким образом, трехосный эллипсоид заменяется эллипсоидом вращения с моментом инерции $J_{0 \text{ вр}} = J_0$ и радиусом $R = R_{\text{ср}}$.

Система уравнений (26) – (29) с учетом (33) имеет вид:

$$mR\ddot{i} = -T + G \sin \alpha,$$

$$\frac{1}{5} mR \cdot \beta_{\text{ш}} \cdot \ddot{i} = T \cdot R - G \cdot f_k \cdot \cos \alpha.$$

Откуда получаем зависимость вида:

$$T = G \frac{\frac{1}{5} R \cdot \beta_{\text{ш}} \cdot \sin \alpha + f_k \cdot \cos \alpha}{R \left(1 + \frac{\beta_{\text{ш}}}{5}\right)}. \quad (34)$$

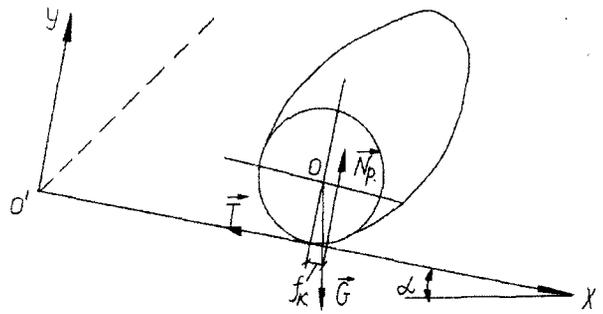


Рис. 2. Процесс качения тела

После преобразований (35) получим

$$\ddot{x}_0 = \frac{5}{5 + \beta_{\text{ш}}} \cdot g \cdot \left(\sin \alpha - \frac{f_k}{R} \cos \alpha \right). \quad (35)$$

Обозначим

$$\gamma_{\text{ш}} = \frac{5}{5 + \beta_{\text{ш}}}. \quad (36)$$

С учетом (33) выражение (36) запишется, как

$$\gamma_{\text{ш}} = \frac{1}{1 + \frac{4(c^2 + b^2)}{5(c+b)^2}}. \quad (37)$$

Введем подстановку $\dot{x} = V$ и получим:

$$\ddot{x} = V_0' \cdot V. \quad (38)$$

С учетом (38) выражение (35) запишется в виде:

$$V_2^2 = V_0^2 + \gamma_{\text{ш}} g \left(\sin \alpha - \frac{f_k}{R} \cos \alpha \right) \cdot x, \quad (39)$$

где V_0 – начальная скорость тела, м/с.

Полученное аналитическое решение задачи имеет не только теоретическое, но и практическое значение, так как позволяет получить поля скоростей в зависимости от начальной скорости движения тела и угла наклона плоскости. Данное уравнение может быть использовано при определении повреждаемости тел рабочими органами машин и обосновании параметров и режимов работы этих органов.

Литература:

- 1 Бермант А.Ф. Краткий курс математического анализа / А.Ф. Бермант, И.Г. Араманович. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
- 2 Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. – М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 432 с.
- 3 Яблонский А.А. Курс теоретической механики / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Высшая школа, 1987. – 430 с.
- 4 Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. – 231 с.
- 5 Екимова Л.С. К расчёту скорости движения тел эллипсоидной формы по наклонной плоскости. – Депонированные научные труды (ВИНИТИ). – М.

УДК 543.554.6:546.881.5]:628.316.12

Канд. хим. наук, доц. Комова В.И.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орёл, тел. (4862)419892; E-mail: chemistry@ostu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАНАДИЯ В СТОЧНЫХ ВОДАХ ТИТАНО-МАГНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПОМОЩЬЮ ПЛЕНОЧНОГО ИОНОСЕЛЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОДА

Is creation the plasticization ion selective electrode, which sensible with ion of vanadium (V) by the base of electrode-active unites the helate vanadium (V) with 5,7-dibromoxihinoline – DBO.

На основе созданного нами пленочного ванадийселективного электрода, разработаны и испытаны экспрессные ионометрические методики по определению содержания ионов ванадия (V) от 0,1 до 26 г/л в маточных растворах, промышленных водах в процессе получения пятиоксида ванадия из технического окситрихлорида ванадия. Измерения производили на иономере И-115. Подготовку иономера к работе производят согласно инструкции завода-изготовителя.

Перед работой необходимо подготовить ванадий-селективный электрод. Во внутреннюю полость ванадий-селективного электрода помещают 1,5 – 2,0 мл стандартного раствора, представляющего смесь растворов $5 \cdot 10^{-2}$ М ванадия

(V) и $5 \cdot 10^{-2}$ М хлорида натрия, имеющую рН = 3,0. Перед замером электрод поместить на 15 минут в 0,001М раствор ванадия (V). По окончании измерений электрод оставляют в эксикаторе.

Содержание ванадия (V) в растворе пробы определяют по градуировочному графику, выражающему зависимость потенциала ионоселективного электрода от концентрации ванадия (V) в пробе. Для построения градуировочного графика в мерные колбы вместимостью 50 мл вводят соответствующее количество 0,2М раствора ванадия (V), добавляют 15 мл 0,15М раствора хлорида натрия (кислотность раствора с рН = 3,0 создают H_2SO_4 в объёме 1:1), доводят до метки водой.

Таблица 1 – Данные для построения градуировочного графика

№ раствора	1	2	3	4	5
Объём 0,2М раствора ванадия (V), мл	0,25	1,25	2,5	12,5	25,0
Концентрация ванадия (V), моль/л	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$

Таблица 2 – Результаты определения содержания ванадия в маточных растворах и промышленных водах, образующихся в процессе получения пятиоксида ванадия из окситрихлорида ванадия

Раствор	Химический метод $n = 9$	Ионометрический метод	
		$\bar{X} \pm \frac{t_p S}{\sqrt{n}}$	S_r
фильтрат	$0,138 \pm 0,005$	$0,141 \pm 0,006$	0,060
	$7,6 \pm 0,2$	$7,8 \pm 0,3$	0,033
	$8,9 \pm 0,4$	$9,2 \pm 0,5$	0,065
концентрат	$16,7 \pm 0,8$	$17,0 \pm 0,8$	0,066
	$26,9 \pm 1,3$	$27,1 \pm 1,5$	0,070

Таблица 3 – Сопоставление ионометрического и контрольного методов анализа сточных вод по критерию Стьюдента

Номер пробы	Найдено ванадия (V), г/л		Расхождение $d_i = X_i - X$, г/л
	Ионометрический метод X_i	Контрольный метод X	
1	8,76	8,70	0,06
2	8,58	8,52	0,06
3	8,76	8,76	0
4	8,35	8,33	0,02
5	8,50	8,50	0

Контрольные растворы переносят в стаканы вместимостью 50 мл. Ионоселективный электрод и наконечник электролитического ключа погружают поочередно, начиная с разбавленных растворов, в стаканы на 3 минуты. Показания иономера записывают с точностью до 0,1 мВ. По полученным данным строят график, откладывая на оси абсцисс концентрацию ванадия (V) моль/л, а по оси ординат - в линейной зависимости - соответствующие им показания прибора (мВ). Положение графика проверяют через 4-8 часов.

Проведение определения проводят следующим образом: 10 мл исходного раствора вносят в мерную колбу на 100 мл, добавляют 10 мл 0,2N раствора H_2SO_4 , доводят до метки водой. Аликвотную часть полученного раствора переносят в мерную колбу емкостью 50 мл, добавляют 15 мл 0,15M раствора NaCl, разбавляют водой до метки рН измеряемых растворов находится в пределах 2,0-4,0. Рабочие растворы переносят в стаканы на 50 мл, в которые погружают ионоселективный электрод и наконечник электролитического ключа. Измеряют ЭДС гальванического элемента через 3 минуты после погружения электродов в раствор. Определяемое содержание ванадия (V) в пробе находят по градуировочному графику.

Результаты ионометрического определения хорошо согласуются с результатами химического метода, которые представлены в таблице 2.

$$n = 9, P = 0,95, t_p = 2,31,$$

где \bar{X} - среднее арифметическое n определений;

S - среднее квадратичное отклонение;

S_r - относительное стандартное отклонение.

Разработанный ионометрический метод определения ванадия (V) в сточных водах, по сравнению с используемыми в производстве контроля химическими методами, отличается рядом преимуществ. Из них следует выделить: экспрессность, улучшение условий труда, простоту определений.

Было опробовано использование пленочного ванадийселективного электрода в режиме автоматического определения ванадия (V) в сточных водах на установке «Ион», которая успешно применяется для автоматического определения концентрации ионов хлора, активного хлора, рН в стоках Березниковского титано-магниевого комбината.

Перед измерением анализируемый раствор (колотца) с помощью погружного насоса поступает в бак-отстойник, где происходит осветление воды от взвесей. Продолжительность работы насоса 5 минут. После отключения насоса, включается дозатор и подает в датчики анализируемую воду и буферный раствор. На ИСЭ устанавливается

равновесный потенциал, характеризующий концентрацию анализируемого компонента. После этого сигналы поступают на преобразователи П-201 и далее потенциометр КСУ-4. Запись показания с датчика включается на 5 мин. По окончании записи, на 10 мин. открываются клапаны в бак-отстойнике, откуда в канализацию сливается раствор с осадком.

Для оценки правильности измерения содержания ванадия (V) в сточных водах отбирали две пробы и анализировали их в лабораторных условиях по контрольной методике. Статистически значимое расхождение обоих методов, оцененное по критерию Стьюдента отсутствует, о чем свидетельствуют данные таблицы 3.

$$t_{\text{экср}} = \frac{\bar{d}\sqrt{n}}{S} = 2,10;$$

$$t_{\text{табл}}(n = 5, P = 0,95) = 2,57; t_{\text{экср}} < t_{\text{табл}}$$

Апробация ванадий-селективного пленочного электрода в режиме автоматического определения ванадия в сточных водах на установке «Ион», позволяет предположить о возможности использования ИСЭ в качестве потенциометрического датчика.

Литература:

1 Лугинин В.А. Пленочный ионоселективный электрод для определения ванадия (V) / В.А. Лугинин, В.И. Комова, А.Л. Грекович // Журнал прикладной химии. - 1987. - № 1. - С. 189-190.

2 Комова В.И. Разработка методов ионометрического и экстракционно-фотометрического определения ванадия (V) в сточных водах: Автореф. дис... канд. хим. наук / ЛГУ им. А.А.Жданова. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. - 18 с.

3 Лугинин В.А. Определение ионов ванадия (V) в растворе с помощью жидкостного ионоселективного электрода / В.А. Лугинин, В.И. Комова, А.Л. Грекович, Т.И. Пальникова // Вестник ЛГУ. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. - Вып. 1. - С. 95-97.

4 Лугинин В.А. Электродные свойства жидкой мембраны на основе 5,7-дибромоксинолина / В.А. Лугинин, В.И. Комова, И.А. Церковницкая // Аналитическое приборостроение. Методы и приборы для анализа жидких сред: Тез. докл. всесоюз. конф. - Тбилиси, 1986. - С. 60.

5 Лугинин В.А. Пластифицированный ионоселективный электрод для определения ванадия (V) / В.А. Лугинин, В.И. Комова, А.Л. Грекович // Современные проблемы физической химии растворов / Тез. докл. XIV Межвуз. конф. молодых ученых: Ленинград, 17-19 марта. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. - С. 32.

Д-р техн. наук, проф., Куценко С.А., асп. Хрулева Ж.В., канд. техн. наук, доц. Цымай Д.В.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орёл, тел. (4862)419892; E-mail: chemistry@ostu.ru

ОЧИСТКА КИСЛЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ЦИНКА

The problem of removal of heavy metals from waste waters exists in many industries. The main pollutants are salt heavy metals, such as: Fe, Zn, Cu, Ni, Cr, With, Pb, Sb. Isocheim of these metals are processes of etching of metals, wash down, defeating, zinc plating, nickel plating, a chromium coating of a surface of items, etc.

Проблема удаления тяжелых металлов (ТМ) из сточных вод существует во многих отраслях промышленности. Основными загрязнителями являются соли тяжелых металлов, таких, как: Fe, Zn, Cu, Ni, Cr, Co, Pb, Sb. Их источниками являются процессы травления, промывка, обезжиривание, цинкование, никелирование, хромирование поверхности изделий и т.д. Тяжелые металлы характеризуются высокой токсичностью и не способны разлагаться в естественных условиях. Необходимы эффективные методы очистки сточных вод, которые снизят отрицательное воздействие на окружающую среду и человека.

Поэтому содержание ТМ в сточных водах требует тщательного контроля и очистки. Решение данной

задачи усложняется ужесточением нормативов Госстроя России к показателям допустимого загрязнения сточных вод. Иногда ситуация доходит до абсурда, когда требуемые предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в сбрасываемых сточных водах значительно выше, чем нормативы качества питьевой воды. В таблице 1 приведены некоторые показатели сбрасываемых в канализацию сточных вод, которые предъявляет к промышленным предприятиям МУПП «Орелводоканал».

Таким образом, приходится искать новые технологические решения, менять или модернизировать существующие схемы, подбирать новые реагентные методы очистки стоков.

Таблица 1 - Сравнительные показатели требований к качеству питьевой и сточной воды

Требования нормативов к воде	Показатели, мг/л						
	Алюминий Al ³⁺	Железо (Fe общ)	Марганец (Mn, общ)	Медь (Cu, общ)	Никель (Ni, общ)	Цинк (Zn ²⁺)	Свинец (Pb, общ)
Питьевая вода (Сан ПиН 2.1.4.559-96)	0,5	0,3-1	0,1-0,5	1,0	0,1	5,0	0,03
Сбрасываемые сточные воды в канализацию (МУПП «Орелводоканал»)	0,0041	0,0486	0,001	0,0002	0,003	0,0036	0,0011

Нами был разработан и запатентован [1] метод очистки кислых сточных вод от цинка. Для внедрения метода в производство было необходимо:

1) выбрать нетоксичные, дешевые и эффективные реагенты;

2) в лабораторных условиях очистить сточную воду до ПДК;

3) подобрать простое аппаратное оформление технологии.

Разработанный метод очистки сточных вод от цинка был опробован и внедрен на заводе холодильного оборудования.

Сточные воды производства на данном заводе образуются на стадии водной промывки металлических корпусов холодильников и других изделий, подвергаемых производственной операции одновременного обезжиривания и фосфатирования путем распыления растворов. При обработке изделий, изготовленных из оцинкованного стального листа, оборотный

моюще-фосфатирующий рабочий раствор загрязняется, в основном, цинком и железом.

Для удаления остатков рабочего раствора обработанные изделия подвергаются двухстадийной водной промывке. Вначале осуществляется промывка умягченной водой, пропущенной через катионитовую ионообменную смолу, а затем деионизированной водой, пропущенной через катионитовую и анионитовую смолы. С целью уменьшения расхода воды обе промывки осуществляются в замкнутых оборотных циклах. Однако из-за остатков рабочего раствора на промываемых изделиях происходит постоянное загрязнение оборотных промывных растворов, в первую очередь, в танке-емкости с умягченной водой, а затем и в танке с деионизированной водой. Поэтому, часть промывных вод периодически выводится из цикла и поступает на заводские очистные сооружения. На очистку поступают также сливные воды при мокрой уборке производственных помещений.

Таблица 2 – Результаты анализа

Номер опыта	10 % раствор NaOH, мл	20% раствор CaCl ₂ ,мл	pH раствора после первой стадии очистки	10% раствор Na ₂ CO ₃ , мл	pH раствора после второй стадии очистки	содержание Zn ²⁺ после очистки мг/л
1	0,7	2,6	8,0	2,7	9,8	0,018
2	0,5	1,5	7,1	1,5	9,0	0,012
3	0,6	2,0	7,6	2,1	9,5	0,005
4	0,6	1,5	7,4	1,5	9,2	0,008

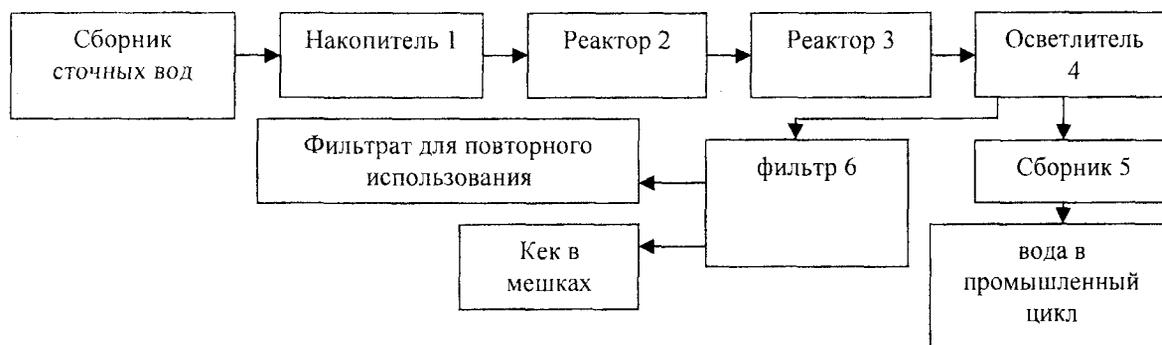
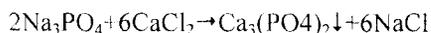
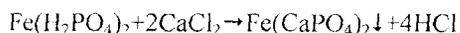
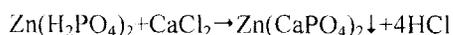
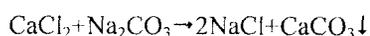


Рис. 1. Принципиальная схема очистки сточных вод

Исследованиями установлено, что загрязняющие примеси находятся в сточных водах, преимущественно, в виде растворимых метафосфатов Zn(H₂PO₄)₂ и Fe(H₂PO₄)₂, а также натриевых солей фосфорной кислоты. Для осаждения загрязняющих примесей нами предложено использовать хлористый кальций. Процесс осаждения происходит в соответствии с реакциями:



Для нейтрализации избыточной кислотности сточные воды обрабатываются раствором каустика (едким натром) до pH 8 – 9. Слабощелочная среда способствует дополнительному осаждению ионов металлов в виде труднорастворимых гидроксидов. Поскольку для полноты осаждения загрязняющих примесей хлорид кальция подается с небольшим избытком, то для снижения жесткости очищаемой воды и формирования легкоотстаивающегося, хорошо фильтруемого осадка на заключительной стадии очистки сточные воды обрабатывают раствором кальцинированной соды:



Выпадающий при этом карбонат кальция способствует укрупнению ранее образовавшихся осадков и адсорбирует на своей поверхности токсичные примеси. Процесс осаждения цинка из кислых сточных вод осуществляется в две стадии: вначале сточные воды обрабатываются растворами гидроксида натрия и хлорида кальция, затем раствором карбоната натрия. Дозированный расход карбоната натрия позволяет точно регулировать pH осаждения, добиваясь наибольшей полноты осаждения цинка при pH 9,0-10,0. Осаждение цинка проводили при комнатной температуре из кислого раствора, содержащего 100мг/л Zn²⁺, pH=3,0.

Количество очищаемого раствора во всех опытах брали равным 3000 мл, температура осаждения 20 °С. Ориентировочные расходы реагентов определяли в соответствии со стехиометрией протекаемых при очистке реакций. Остаточное содержание цинка в очищенных растворах определяли атомно-абсорбционной спектроскопией. Результаты анализа представлены в таблице 2.

С целью упрощения обслуживания очистных сооружений химические реагенты-осадители подавали в рабочие аппараты насосами-дозаторами в виде водных растворов (рис. 1).

Сточные воды с промывными водами, периодически по мере накопления откачиваются насосом в емкость 1 стабилизации и первичного осаждения фосфатов, где происходит их гомогенизация и снижение гидравлической нагрузки до уровня, необходимого для системы очистки. В эту ёмкость насосом-дозатором подается рабочий раствор хлорида кальция для образования труднорастворимых смешанных фосфатов цинка, железа и кальция. Для избежания осаждения осадка на дно и стенки резервуара, а также для перемешивания сточных вод, в емкость постоянно подается через диффузоры сжатый воздух из заводской пневмосистемы. При поддержании постоянного потока сточные воды откачиваются насосом в следующую секцию системы и поступают в емкость 2 для корректировки pH. Сюда подается насосом-дозатором рабочий раствор гидроксида натрия для нейтрализации стоков и корректировки водородного показателя pH в пределах 8-9. В емкость 3 подается насосом-дозатором рабочий раствор карбоната натрия. Подача соды снижает жесткость очищаемой воды и способствует формированию легкоотстаивающегося осадка. В тех случаях, когда наблюдается частичное выпадение осадка в емкости 3 из-за недостаточности перемешивания, целесообразно перевести подачу карбоната натрия непосредственно в емкость 4, которая снабжена диффузорами для постоянной подачи сжатого

воздуха. Аэродинамическое перемешивание пульпы предотвращает выпадение осадка в емкости 4 и способствует окислению Fe(II) в Fe(III), что снижает содержание железа в стоках до сотых долей мг/литр. Из емкости 4 пульпа самотеком поступает в отстойник-осадитель, где происходит осветление очищенных сточных вод, то есть выпадение осадка на конусном дне отстойника. Осветленные стоки по периферийному сливу поступают в емкость 5, служащую сборником, из которого, в соответствии с показаниями уровнемера очищенная вода через контрольный песчаный фильтр откачивается для повторного использования в качестве промывных вод и приготовления моюще-фосфатирующих растворов.

Выпавший в отстойнике осадок периодически взмучивается со дна воздушно-подающим насосом и через коллектор поступает в фильтрационный пакет 6, включающий три мешочных фильтра. После заполнения мешочных фильтров на две трети осуществляется их замена. Получаемый

осадок не содержит примесей тяжелых металлов и других токсичных примесей и подвергается утилизации совместно с другими производственными отходами.

С целью предотвращения загрязнения осадком очищенных сточных вод, последние обязательно должны проходить через контрольный песчаный фильтр.

Разработанный способ позволил очистить сточные воды от цинка до тысячных долей мг/л., что соответствует современным требованиям МУП «Орелводоканал», который ограничивает содержание цинка при сбросе сточных вод в канализацию тысячными долями мг (0,003 мг/л).

Литература:

1. Куценко С.А. Способ очистки кислых сточных вод от цинка / С.А. Куценко, Ж.В. Хрулева // Патент РФ № 2294316, МПК⁷ C02F 1/62, 103/16, C01G 9/02. – Бюл. №6. – Оубл. 27.02.2007.

УДК 542.61+543.422.7:546.881.5]:628.316.12

Канд. хим. наук, доц. Комова В.И.

(Орловский государственный технический университет)

Россия, г. Орёл, тел. (4862)419892; E-mail: chemistry@ostu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ ВАНАДИЯ В СТОЧНЫХ ВОДАХ ТИТАНО-МАГНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭКСТРАКЦИОННО-ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Is creation the extract-photometrical method of definition of vanadium (V) with use the 5,7-dibromoxiholine – DBO in the mixture of solvent.

При получении пентаоксида ванадия (V) из технического окситрихлорида V образуется большое количество сточных вод, представляющих маточные растворы и промышленные воды метаванадата аммония. На 1 т V₂O₅ образуется до 100 м³ сточных вод, содержащих 0,1-3 г/л V и 5-100 г/л хлоридов натрия и аммония. Это приводит к безвозвратным потерям V (со сточными водами теряется до 5-10% V, поступающего на участок получения V₂O₅) и к загрязнению окружающей среды. В связи с этим остро встает задача оперативной организации аналитического контроля содержания V в сточных водах.

В данной статье предлагается методика определения содержания ионов ванадия (V) в сточных водах титано-магниевого производства экстракционно-фотометрическим методом.

Метод основан на реакции образования комплексного соединения ванадия (V) с 5,7-дибромоксихинолином – ДБО в смеси растворителей: гексанол – хлороформ (1:2) и три-н-бутилфосфат гексанол (1:6), окрашенного в

красный цвет. Комплекс образуется при pH 1,0-5,0. Максимальное светопоглощение комплекса ванадия (V) с ДБО наблюдается при pH = 2,0. Оптическая плотность растворов пропорциональна концентрации ванадия (V) в интервале 0,20-30 мкг/мл.

1 Построение градуировочного графика

В ряд делительных воронок помещают определенные количества стандартных растворов А, Б, В ванадия (V) с pH = 2,0. Добавляют 5 мл буферного раствора с pH = 2,0, приливают 5 мл 2,5·10⁻³М раствора ДБО в смеси растворителей (гексанол – хлороформ 1:2 или три-н-бутилфосфат – гексанол 1:6) и 5 мл смеси растворителей, экстрагируют в течение 4-х минут. После отстаивания и расслоения фаз экстракт отделяют и переводят в мерную колбу вместимостью 25 мл через фильтр. После повторной экстракции экстракты соединяют, доводят до метки хлороформом или гексанолом и перемешивают. Измеряют оптическую плотность на

фотоколориметре ФЭК-56М при $\lambda = 410$ нм в кювете с толщиной слоя 5 см. В качестве раствора сравнения используют ДБО, проведенный через все стадии анализа. По найденным значениям оптической плотности растворов и соответствующим им значениям концентрации ванадия (V) строят градуировочный график.

2 Проведение определения

2.1 Анализ кислых стоков (кол. 203)

Аликвотную часть исходного раствора 10 мл, не фильтруя, помещают в стакан вместимостью 50 мл и с помощью серной кислоты (1:1) создают кислотность раствора, равную $\text{pH} = 2,0$. Затем раствор переводят в мерную колбу на 100 мл, доводят до метки дистиллированной водой. Если проба с осадком, ее отфильтровывают через фильтр с белой лентой. Берут из колбы аликвотную часть раствора - 5 мл и переносят в делительную воронку, приливают 5 мл $2,5 \cdot 10^{-3}$ М раствор ДБО в смеси растворителей (гексанол - хлороформ 1:2 или три-н-бутилфосфат - гексанол 1:6) и 5 мл смеси растворителей и экстрагируют в течение 4-х мин. После отстаивания и расслоения фаз экстракт отделяют и переводят в мерную колбу вместимостью 25 мл через фильтр. После повторной экстракции экстракты соединяют, доводят до метки хлороформом или гексанолом и перемешивают. Измеряют оптическую плотность на фотоколориметре ФЭК-56М при $\lambda = 410$ нм в кювете с толщиной слоя 5 см. В качестве раствора сравнения используют раствор ДБО, проведенный через все стадии анализа. По найденным значениям оптической плотности растворов и

соответствующим им значениям концентрации ванадия (V) строят градуировочный график.

2.2 Анализ промливневых стоков, речной воды (кол. №70, вып. № 2)

Аликвотную часть 10 мл нефилтрованной анализируемой воды помещают в стакан вместимостью 50 мл и с помощью H_2SO_4 (объем 1:1) создают кислотность раствора, равную $\text{pH} = 2,0$. Затем раствор переводят в мерную колбу на 100 мл, доводят до метки дистиллированной водой. Берут из колбы аликвотную часть раствора 10 мл и переносят в делительную воронку, приливают 5 мл $2,5 \cdot 10^{-3}$ М раствор ДБО в смеси растворителей (гексанол - хлороформ 1:2 или три-н-бутилфосфат - гексанол 1:6) и 5 мл смеси растворителей и экстрагируют в течение 4-х мин. После отстаивания и расслоения фаз экстракты отделяют и переводят в мерную колбу 25 мл через фильтр или вату, доводят до метки хлороформом или гексанолом. Измеряют оптическую плотность растворов при $\lambda = 410$ нм в кювете с толщиной слоя 5 см. Содержание ванадия (V) определяют по градуировочному графику. Концентрацию ванадия (V) в мкг/мл вычисляют по формуле:

$$X = \frac{a \cdot V_2}{V_1 \cdot V_3}, \quad (1)$$

где a - масса ванадия, найденная по градуировочному графику, мкг;
 V_1 - аликвотная часть пробы, взятая на анализ, мл;
 V_2 - вместимость мерной колбы при разведении, мл;
 V_3 - аликвотная часть пробы, взятая на экстракцию, мл.

Таблица 1 - Результаты анализов сточных вод

Содержание ванадия (V) в пробе, мкг/мл		
Экстракционно-фотометрический метод с ДБО $\bar{X} \pm \frac{t_p \cdot S}{\sqrt{n}}$	Экстракционно-фотометрический метод с АГАК $\bar{X} \pm \frac{t_p \cdot S}{\sqrt{n}}$	Амперометрический метод $\bar{X} \pm \frac{t_p \cdot S}{\sqrt{n}}$
0,2±0,06	0,24±0,05	-
0,39±0,09	0,4±0,05	-
0,92±0,1	0,92±0,1	0,96±0,02
4,2±0,2	4,3±0,2	4,0±0,05
20,3±0,3	20,8±0,7	20,3±0,12
29,2±0,9	29,5±1,5	29,4±0,16

$$n = 5, P = 0,95$$

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о хорошей согласованности результатов, полученных при определении содержания ванадия (V) в сточных водах, предложенным нами методом с другими методами: амперометрическим методом и экстракционно-фотометрическим с АГАК. Сравнивая разработанный нами метод с применяемым экстракционно-фотометрическим на основе АГАК в хлороформе для определения малых содержаний ионов ванадия (V) в сточных водах, следует

отметить, что методы по пределу обнаружения одинаковы, они позволяют контролировать предельные концентрации ванадия (V) в сточных водах титано-магниевого производства. Однако экстракционно-фотометрический метод на основе АГАК в хлороформе отличается многооперационностью, применением большого ассортимента реактивов, длительностью. Реагент не легко доступен в практике аналитических лабораторий.

Описанный ранее экстракционно-фотометрический метод на основе ДБО в

хлороформе для определения содержания ванадия (V) в рудах, уступает нашему по пределу обнаружения, который составляет 0,7 мкг/мл. Исходя из полученных нами результатов, следует, что применение смеси растворителей позволило снизить нижнюю границу определяемых концентраций ванадия (V) до 0,2 мкг/мл, а по экспрессности они одинаковы.

Амперометрическое титрование ванадия (V) солью Мора по простоте превосходит наш метод, но уступает по нижней границе определяемых концентраций ванадия (V).

Положительным фактором является то, что реагенты, используемые в ходе анализа предлагаемого нами метода, доступны для аналитических лабораторий и достаточно

экономичны. Время анализа составляет одного образца 10-15 минут.

Литература:

1 Комова В.И. Разработка методов ионометрического и экстракционно-фотометрического определения ванадия (V) в сточных водах: Автореф. дис... канд. хим. наук / ЛГУ им. А.А.Жданова. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. – 18 с.
 2 Дубровина Л.Т. Об экстракции ионов ванадия (V) в системе 5,7-дибромоксихинолин – гексанол – хлороформ / Л.Т. Дубровина, В.И. Комова, В.А. Лугинин, И.А. Церковницкая // ЛГУ им. А.А. Жданова. – Л.: ЛГУ, 1987. – Деп. ВНИИТэхим 03.02.87, № 89-ХИ-87.

УДК 551.57

Асп. Бондаренко М.В., д-р техн. наук, проф., Куценко С.А.
 (Орловский государственный технический университет)
 Россия, г. Орёл, тел. 8920287268; E-mail: michael.bondarenko@orl.unimilk.ru

**О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ФОТОЛИЗА ВОДЫ
 НА ЭВОЛЮЦИЮ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

In clause the opportunity of occurrence of oxygen in an atmosphere is considered by dissociation waters in the top layers of an atmosphere under influence of a ultra-violet sunlight, calculations are resulted according to the prospective mechanism of the given reaction. Ways of education of existing structure of an atmosphere of the Earth are analyzed.

В статье рассматривается возможность возникновения кислорода в атмосфере путём диссоциации паров воды в её верхних слоях под действием ультрафиолетового солнечного излучения, приводятся расчеты в соответствии с предполагаемым механизмом данной реакции. Проанализированы пути образования существующего состава атмосферы Земли.

В высоких слоях атмосферы состав воздуха меняется под действием жесткого излучения Солнца, которое приводит к распаду молекул кислорода на атомы. Атомарный кислород является основным компонентом высоких слоев атмосферы. Наконец, в наиболее удаленных от поверхности Земли слоях атмосферы главными компонентами становятся самые легкие газы – водород и гелий. Так как основная масса вещества сосредоточена в нижних 30 км, изменения состава воздуха на высотах более 100 км не оказывают заметного влияния на общий состав атмосферы нашей планеты.

Масса атмосферы нашей планеты ничтожна – всего лишь одна миллионная массы Земли (общий вес газов атмосферы составляет приблизительно $4,5 \cdot 10^{15}$ тонн). Однако её роль в природных процессах биосферы огромна. Наличие атмосферы вокруг земного шара определяет общий тепловой режим поверхности нашей планеты, защищает её от

вредных космического и ультрафиолетового излучений. Циркуляция атмосферы оказывает влияние на местные климатические условия.

Современный газовый состав атмосферы – результат длительного исторического развития земного шара. Нижние слои атмосферы состоят из смеси газов (таблица 1). Кроме приведенных в таблице, в виде небольших примесей в воздухе присутствуют и другие газы: озон, метан, такие вещества, как оксид углерода (СО), оксиды азота и серы, аммиак [1]. Также необходимо отметить, что важную роль в атмосфере играет водяной пар.

Таблица 1 – Современный состав атмосферы

Газ		Содержание в сухом воздухе, %
N ₂	азот	78,08
O ₂	кислород	20,95
Ar	аргон	0,93
CO ₂	углекислый газ	0,034
Ne	неон	0,0018
He	гелий	0,0005
Kr	криптон	0,0001
H ₂	водород	0,00005
X	ксенон	0,0000087

Наибольшее значение для различных экосистем имеют три газа, входящих в состав атмосферы:

кислород, углекислый газ и азот. Эти газы участвуют в основных биогеохимических циклах.

Кислород играет важнейшую роль в жизни большинства живых организмов на нашей планете. Он необходим всем для дыхания. Кислород не всегда входил в состав земной атмосферы. Он появился 2,4 млрд. лет назад. Под действием ультрафиолетовых лучей он превращался в озон, по мере накопления которого в верхних слоях атмосферы происходило образование озонового слоя. Озоновый слой, как экран, надежно защищает поверхность Земли от ультрафиолетовой радиации, губительной для живых организмов.

Современная атмосфера содержит едва ли двадцатую часть кислорода, имеющегося на нашей планете. Главные запасы кислорода сосредоточены в осадочных породах (карбонатах), в воде и органических веществах. Часть кислорода растворена в воде. В атмосфере, по-видимому, сложилось приблизительное равновесие между производством кислорода в процессе фотосинтеза и его потреблением живыми организмами. Но в последнее время появилась опасность, что в результате человеческой деятельности запасы кислорода в атмосфере могут уменьшиться.

Круговорот кислорода в биосфере необычайно сложен, так как с ним вступает в реакцию большое количество органических и неорганических веществ, а также водород, соединяясь с которым кислород образует воду.

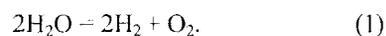
Кислород является наиболее распространенным элементом на Земле. В морской воде содержится 85,82 % кислорода, в атмосферном воздухе 23,15 % по весу и 20,93 % по объёму, в земной коре – 47,2 % по весу. Принято считать, что последние миллионы лет концентрация кислорода в атмосфере поддерживается постоянной благодаря процессу фотосинтеза. В этом процессе зеленые растения под действием солнечного света превращают диоксид углерода и воду в углеводы и кислород. В жизни природы кислород имеет исключительное значение. Кислород и его соединения незаменимы для поддержания жизни. Они играют важнейшую роль в процессах обмена веществ и дыхании. Кислород входит в состав белков, жиров, углеводов, из которых «построены» организмы. Большинство организмов получают энергию, необходимую для выполнения их жизненных функций, за счет окисления тех или иных веществ с помощью кислорода. Убыль кислорода в атмосфере в результате процессов дыхания, гниения и горения возмещается кислородом, выделяющимся при фотосинтезе. Вырубка лесов, эрозия почв, различные горные выработки на поверхности уменьшают общую массу фотосинтеза и снижают круговорот на значительных территориях. Большую популярность имеет мнение, что только благодаря растениям и фитопланктону соблюдается баланс между потреблением и образованием O_2 . Однако необходимо отметить, что во внимание не принимаются другие факторы, способствующие образованию данного вещества, например, процесс возникновения свободного кислорода в атмосфере

Земли путём разложения водяных паров под действием солнечного излучения в верхних слоях атмосферы (верхние слои тропосферы, стратосфера). Ниже мы попытаемся показать механизм этого процесса, обосновать его вероятность и вычислить объемы возможного образования O_2 .

Согласно данным по образованию и потреблению кислорода на Земле [2, 3] известно, что ежегодное мировое техногенное потребление O_2 составляет примерно $2,5 \cdot 10^{10}$ тонн. Львиная доля расходов приходится на сжигание органического топлива. В настоящее время экономика отказывается от твердого топлива и переходит на газ, который горит с большим расходом кислорода. Кроме того, люди изымают кислород из атмосферы, своя леса, осушая болота и распахивая почву. По общему антропогенному потреблению кислорода первое место занимают США, на долю которых приходится более четверти мирового расхода. Они же лидируют по антропогенному потреблению кислорода на душу населения (20 тонн в год). Следом идут Канада и Российская Федерация (соответственно 18 и 12 тонн на человека в год). Большие российские расходы связаны с высокой энергоемкостью внутреннего валового продукта, а также с холодным климатом. Абсолютный минимум, полтонны кислорода на человека, приходится на африканские страны. А среднее годовое потребление кислорода на душу населения составляет около 4 тонн [4].

Такой расход кислорода с учетом гетеротрофного дыхания не полностью компенсируется за счет фотосинтеза в фитосфере Земли, где определяющую роль играет лесная экосистема, содержащая до 70-90 % биосферного углерода. Уже сегодня дефицит составляет около $2 \cdot 10^{10}$ тонн/год, однако при этом не учитывается абиогенное образование кислорода.

Огромное значение в производстве дополнительного кислорода на Земле может иметь фотохимическое разложение водяного пара в верхних слоях атмосферы под влиянием ультрафиолетовых лучей солнца в соответствии с химической реакцией:



Так как кислород после разложения водяных паров, более тяжелый газ, то он опускается к земной поверхности, а вот водород, как самый легкий газ, поднимается в верхние слои атмосферы, и часть атомов водорода мигрируют в околоземное космическое пространство, образуя так называемую «водородную корону» Земли.

Чтобы показать возможный объём фотолитиза воды проведем некоторые расчёты. Для начала определим, достаточно ли энергии проходит через атмосферу для образования такого количества свободного кислорода, которое может восполнить дефицит кислорода в объеме $2 \cdot 10^{10}$ тонн/год. Согласно справочным данным [5] энергия, получаемая Землей от Солнца, за год составляет 10^{25} Дж. Из них не менее 3 % [6] приходится на ультрафиолетовую часть солнечного излучения, или $3 \cdot 10^{23}$ Дж/год. Предположим, что на разложение

водяных паров затрачивается не более 1 % ультрафиолетового излучения, т.е. порядка $3 \cdot 10^{21}$ Дж/год. Для разложения 36 грамм воды и получения 32 грамм кислорода, необходимо затратить 285400 Дж. Итак, ежегодно на Земле под влиянием ультрафиолетовых лучей может образовываться следующее количество кислорода:

$$(3 \cdot 10^{21} \text{ Дж/год} \cdot 32 \text{ грамма}) / 285400 \text{ Дж} = 33,64 \cdot 10^{16} \text{ грамм/год} = 33,64 \cdot 10^{10} \text{ тонн/год.}$$

При этом считается [2, 4], что поступление кислорода от фитопланктона и растений (данные в литературе по поступлению кислорода в атмосферу от растений и фитопланктона различны) составляет от $1,55 \cdot 10^9$ тонн/год до $4 \cdot 10^9$ тонн/год. Поэтому можно сделать вывод, что энергии Солнца для образования дополнительного кислорода в атмосфере путем диссоциации водяного пара в верхних слоях атмосферы более чем достаточно.

Теперь выясним, достаточно ли воды содержится в верхних слоях атмосферы для образования необходимого количества кислорода. Исходя из уравнения (1) для получения $2 \cdot 10^{10}$ тонн кислорода требуется использовать $2,25 \cdot 10^{10}$ тонн воды, находящейся в верхних слоях атмосферы. Сначала выясним, каков объём воды может содержаться в той части атмосферы, где происходит фотохимическое разложение воды. Для расчёта будем использовать 20-ти километровый слой воздуха (30-50 км над уровнем Мирового Океана), т.к. именно в этом слое наблюдается основное поглощение ультрафиолетового излучения.

Расчет общего количества газов в молях ведём по формуле Менделеева – Клайперона:

$$n = PV/RT, \text{ моль} \quad (2)$$

где P – давление, Па;

V – объём, м^3 ;

R – молярная газовая постоянная, $R = 8,31 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{К})$;

T – температура, К.

Вычислим V через формулу:

$$V = (4/3 \cdot \pi \cdot R_1^3) - (4/3 \cdot \pi \cdot R_2^3), \text{ км}^3 \quad (3)$$

где R_1 – радиус Земли + 50 км над поверхностью Мирового Океана;

R_2 – радиус Земли + 30 км над поверхностью Мирового Океана.

Радиус Земли (для упрощения расчетов представляем Землю в форме шара) составляет 6380 км.

$$V = (4/3 \cdot 3,14 \cdot 6430^3) - (4/3 \cdot 3,14 \cdot 6410^3) = 1,113 \cdot 10^{12} - 1,103 \cdot 10^{12} = 0,01 \cdot 10^{12} \text{ км}^3.$$

Так как для разных высот характерны различные давления и температуры, проведем два разных вычисления (для 30 и 50 километровой высоты). Составим таблицу данных для разных высот (таблица 2).

Таблица 2 – Расчётные данные для разных высот

Параметр	Высота 50 км над уровнем Мирового Океана	Высота 30 км над уровнем Мирового Океана
Температура, °С	0	-50
Давление, Па	101,325	10132,5

Проведем расчёт для высоты 30 км:

$$n_1 = 10132,5 \cdot 0,01 \cdot 10^{21} / 8,31 \cdot 223 = 0,05 \cdot 10^{21} \text{ моль.}$$

Проведем расчёт для высоты 50 км:

$$n_2 = 101,325 \cdot 0,01 \cdot 10^{21} / 8,31 \cdot 273 = 0,0004 \cdot 10^{21} \text{ моль.}$$

Для дальнейшего расчёта берем данные с более низкими значениями (чтобы быть уверенными в правильности рассчитанного количества воды).

Массу воды в 20-километровом слое Земли рассчитаем по формуле:

$$m_{\text{воды}} = M_{\text{воды}} \cdot n_2 \cdot P_{\text{воды}} / P_{\text{воздуха}}, \text{ г} \quad (4)$$

где $M_{\text{воды}}$ – молярная масса воды (18 г/моль);

$P_{\text{воды}}$ – 610,8 Па (при $t = 0^\circ\text{C}$);

$P_{\text{воздуха}}$ – 101325 Па (при $t = 0^\circ\text{C}$).

$$m_{\text{воды}} = 18 \cdot 0,0004 \cdot 10^{21} \cdot 610,8 / 101325 = 0,0434 \cdot 10^{18} \text{ г или равная } 4,34 \cdot 10^{10} \text{ тонн.}$$

Сравнив данные, получим, что как энергии, так и воды в атмосфере достаточно для образования $2 \cdot 10^{10}$ т/год кислорода. Также отметим, что молекула воды для ионизации и, соответственно диссоциации, требует всего 13,2 эВ, что меньше чем для других (кроме кислорода) составляющих атмосферу газов – 12,5 эВ (у кислорода – 12,5; углекислого газа – 14,5; водорода – 15,4; азота – 15,8 эВ).

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что мощным источником кислорода является, по-видимому, фотохимическое разложение водяного пара в верхних слоях атмосферы под влиянием ультрафиолетовых лучей солнца. Можно утверждать, что в природе, возможно, непрерывно совершается образование кислорода за счет фотолиза воды.

Теперь попробуем ответить на вопрос об образовании существующего состава атмосферы.

Согласно существующим теориям, первичная атмосфера Земли состояла из водорода и гелия, которая по мере разогревания и остывания планеты замещается на вторичную атмосферу за счет паров воды, углекислого газа, азота и кислых газов. Частично это подтверждается существованием на Венере подобной атмосферы. При сравнении атмосферы Венеры (как более молодой планеты и Земли (таблица 3) можно сделать предположить, что отсутствие на Венере газообразной и жидкой воды в заметных количествах (как на Земле) и преимущественное присутствие CO_2 , связано с тем, что термодинамически образование гидроксидов большинства металлов предпочтительнее, чем карбонатов при температурах, существующих на Венере.

Таблица 3 – Состав атмосфер планет

Газ	Состав атмосферы, %	
	Венера	Земля
Водород, H ₂	<10 ⁻³	<5·10 ⁻³
Кислород, O ₂	<10 ⁻³	20,95
Озон, O ₃	(?)	10 ⁻⁶ <10 ⁻⁵
Азот, N ₂	3,5	78,08
Сера, S ₂	≈2·10 ⁻⁵	нет
Двуокись углерода, CO ₂	96,5	3·10 ⁻²
Водяной пар, H ₂ O	≈0,2	≈0,1
Окись углерода, CO	3·10 ⁻³	10 ⁻⁴
Метан, CH ₄	<10 ⁻⁴	1,8·10 ⁻⁴
Аммиак, NH ₃	<2·10 ⁻⁴	<10 ⁻⁵
Двуокись серы, SO ₂	1,5·10 ⁻²	10 ⁻⁴
Хлористый водород, HCl	4·10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
Фтористый водород, HF	5·10 ⁻⁷	<10 ⁻⁷
Ацетилен, C ₂ H ₂	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁵
Этан, C ₂ H ₆	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁵
Фосфин, PH ₃	–	<10 ⁻⁵
<i>Инертные газы:</i>		
Гелий, He	10 ⁻²	5·10 ⁻⁴
Неон, Ne	1,3·10 ⁻³	1,8·10 ⁻³
Аргон, Ar	1,5·10 ⁻²	0,93
Криптон, Kr	6,5·10 ⁻³	1,1·10 ⁻⁴
Ксенон, Xe	–	8,7·10 ⁻⁶

На нашей планете произошло накопление азота как инертного газа, вероятно за счет выделения его из земной коры, уменьшение содержания углекислого газа за счет образования карбонатных пород и появление свободного кислорода вначале за счет фотолитиза воды, а потом и за счет фотосинтеза.

УДК 536.7, 541.8

Д-р техн. наук, проф., Куценко С.А., *канд. техн. наук, доц.* Цымай Д.В., *асп.* Суханова В.А., *асп.* Малофеев С.М.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орёл, тел. (4862)419892; E-mail: chemistry@ostu.ru

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАВНОВЕСНЫХ СОСТАВОВ В СИСТЕМЕ CaCO₃ – CO₂ – SO₂

The analysis of equilibrium compositions of system CaCO₃ – CO₂ – SO₂ plumps at different temperatures by the solution of system of nonlinear equations of the mass action law concerning degrees of a completeness linearly - independent reactions. The capability of practically full clearing of flue-gases from connections of sulfur is established at use of a limestone or a lime in the interval temperatures from 500 up to 1300 - 1600 K.

Органическое топливо было и остаётся основным источником энергии. Около 80 % потребностей человечества в энергии удовлетворяется за счет нефти, угля, природного газа. Доля их в балансе электроэнергетики несколько ниже, но тоже высока – почти две трети (39% – уголь, 16% – природный газ, 9% – жидкие топлива).

Скорее всего, эти два процесса взаимосвязаны. С учетом того, что кислород атмосферы Земли – это продукт разложения воды [7], а «творение воды» идет путём окисления водорода за счет CO₂ [8], можно предположить, что именно CO₂ опосредованно является источником кислородной атмосферы.

Литература:

- 1 WWW.ssga.ru/erudites_info/vozd_ocean/index.html [Электронный ресурс].
- 2 Реймерс Н.Ф. Природопользование. – М.: Изд-во «Мысль», 1990.
- 3 Михайлов А.И. Техногенно-фитосферный кислородный баланс и средообразующие функции леса // Матер. междунар. конф. – Хельсинки, 1993.
- 4 WWW.informsci.ru/rus/2006/2006-08-21-06_283_r.htm [Электронный ресурс].
- 5 WWW.book.vsem.info/index.php?idpage=1001&id=100112 [Электронный ресурс].
- 6 WWW.sitc.ru/tipn.html [Электронный ресурс].
- 7 Виноградов А.П. Химическая эволюция Земли. – М.: Изд-во АН СССР, 1959.
- 8 Трофимук А.А. Биогенный кислород атмосферы – жизневагент углекислотной оболочки во взаимодействии внешних геосфер / А.А. Трофимук, В.И. Молчанов, В.В. Параев // Вестник ОГГГН РАН. – №3(13). – 2000.
- 9 Болбас М.М. Основы промышленной экологии. – М.: Высшая школа, 1993.
- 10 Акимова Т.А. Экология: Учебник для вузов / Т.А. Акимова, В.В. Хаскин. – М.: Высшая школа, 1999.
- 11 Владимирова А.М. Охрана окружающей среды: Химическая энциклопедия. – Т. 1. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1991.

Уголь вносит наибольший вклад в мировой баланс производства первичных энергетических ресурсов и в то же время является наиболее загрязняющим окружающую среду топливом. Простейший расчет объемного содержания сернистого газа SO₂, который выделится при сжигании угля с содержанием 85% углерода и 2% серы, с учетом избытка воздуха 10% дает результат около 0,15% (объемных). Массовое содержание

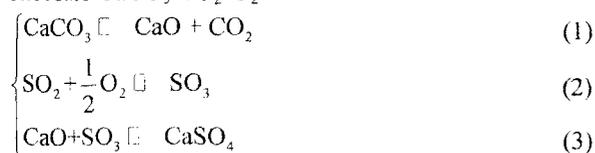
сернистого газа в отходящих газах близко к 4,5 г/м³, при среднесуточной ПДК сернистого газа-0,05-0,5 мг/м³.

Традиционные методы очистки угля дороги и обеспечивают удаление серы не более чем на 30 %. Поэтому наиболее эффективным методом удаления серы является её связывание непосредственно в процессе сгорания топлива. Оксид серы может быть поглощен из топочных газов соединениями щелочных и щелочноземельных металлов. Например, для этой цели используются недорогие известняк (CaCO₃) или известь (CaO), продуктами взаимодействия которых с SO₂ являются сульфат кальция (CaSO₄) или его сульфит (CaSO₃) [1].

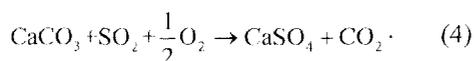
Эффективность указанных реагентов можно оценить, рассмотрев происходящие процессы с позиций химической термодинамики. Стандартную свободную энергию Гиббса ΔG, характеризующую возможность протекания соответствующей реакции рассчитывали по обобщённому уравнению Гиббса-Гельмгольца:

$$\Delta G_{\text{реак}}^0 = \Delta H_{\text{реак}}^0 - T\Delta S_{\text{реак}}^0$$

Результаты выполнения расчётов представлены графически на рис. 1 для возможных реакций в системе CaCO₃-SO₂-O₂:



или суммарная реакция:



Как видно из приведенных данных (рис. 1), реакции сероочистки как при использовании известняка (CaCO₃) так и обожженной извести (CaO) при температурах ниже 2000 К имеют примерно одинаковые значения энергии Гиббса (реакции (3) и (4)). Однако как показывает практика [2], степень связывания SO₂ известью в сопоставимых условиях выше, чем для известняка. Окончательный выбор мог бы быть сделан при сравнении равновесной степени поглощения диоксида серы известняком и оксидом кальция.

Поскольку известные методики термодинамических расчетов не позволяют рассчитывать равновесные составы химических систем с участием конденсированных фаз, нами была предпринята попытка оценить их исходя из предположения, что рассматриваемая система CaCO₃-SO₂-O₂ представляет идеальный раствор. Использование данного подхода можно обосновать значительным измельчением твердой фазы до размеров около 10⁻⁶-10⁻⁷ м. Таким образом, все химические вещества, входящие в систему образуют псевдогомогенную смесь, между частицами которой отсутствуют межмолекулярные взаимодействия. Таким образом, рассматриваемая система имеет свойства идеального раствора и для нее выполняется уравнение:

$$\sum_{j=1}^m x_j = 1, \quad (5)$$

где x_j – мольная концентрация j -го вещества в системе;

m – общее число веществ в системе.

Из всех возможных протекающих при взаимодействии химических реакций выделяли систему линейно-независимых реакций. Выбор системы линейно-независимых реакций зависит от выбора базисных компонентов химической системы.

Число линейно-независимых реакций r определяется по формуле:

$$r = m - n, \quad (6)$$

где n – число базисных компонентов.

Базисные компоненты первоначально выбирали таким образом, чтобы при их взаимодействии можно было бы получить все возможные химические вещества, находящиеся в системе. Определение системы линейно-независимых реакций аналогично определению линейно-независимых алгебраических уравнений. [3].

Для выбранной системы линейно-независимых реакций составлялась система уравнений на основе закона действующих масс.

$$\prod_{j=1}^m x_j^{\alpha_{ij}} = K_i, \quad i = 1, \dots, r, \quad (7)$$

где x_j – мольная концентрация j -го вещества;

K_i – константа равновесия i -й химической реакции;

α_{ij} – стехиометрический коэффициент j -го вещества в i -й реакции.

Величины констант равновесия, K_i , представлены как функции температуры по уравнению:

$$K_i = \exp\left(\frac{-(\Delta H_i - T\Delta S_i)}{RT}\right). \quad (8)$$

где ΔH_i – энтальпия i -й реакции, Дж/моль;

ΔS_i – энтропия i -й реакции, Дж/(мольК);

T – температура, К;

R – универсальная газовая постоянная.

Для упрощения методики расчёта величины мольных долей веществ представлены функциями степеней полноты, X [3,4] r линейно-независимых реакций:

$$x_j = \frac{N_j^0 + \sum_{i=1}^r \alpha_{ij} X_i}{\sum_{j=1}^m \left(N_j^0 + \sum_{i=1}^r \alpha_{ij} X_i \right)}, \quad (9)$$

В формуле (9) условно обозначены: N_j^0 – начальное количество j -го вещества, моль; X_i – степень полноты i -й реакции.

Таким образом, получаем систему r уравнений с неизвестными X_i для расчета равновесного состава исследуемой химической системы. При этом температура и давление считаются заданными:

$$\prod_{j=1}^m \left(\frac{N_j^0 + \sum_{i=1}^r \alpha_{ij} X_i}{\sum_{j=1}^m (N_j^0 + \sum_{i=1}^r \alpha_{ij} X_i)} \right)^{\alpha_{ij}} = K_j, \quad i = 1, \dots, r. \quad (10)$$

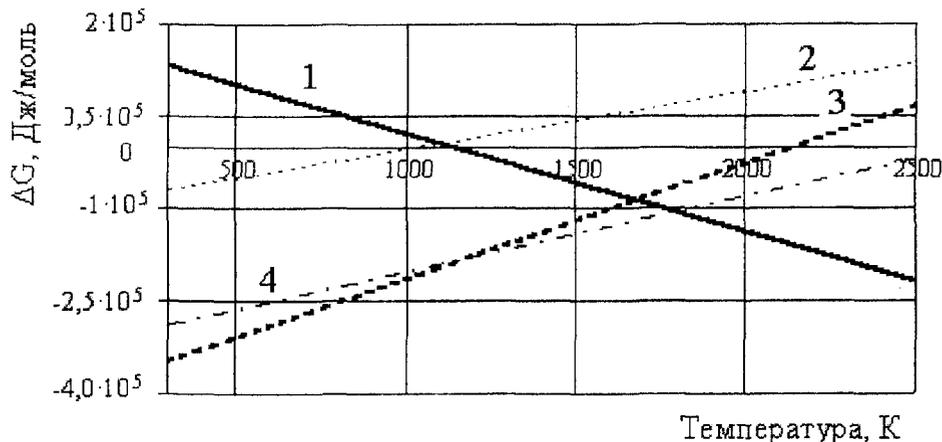


Рис. 1. Зависимость свободной энергии Гиббса от температуры для реакций в системе $\text{CaCO}_3\text{-SO}_2\text{-O}_2$

Таблица 1 – Исходный состав системы, моль

j	1	2	3	4	5	6	7	8
Вещество	CaCO_3	CaO	CaSO_3	CaSO_4	CO_2	SO_2	SO_3	O_2
N_j^0 , моль	1	0	0	0	0	1	0	0,5
	2	0	0	0	0	1	0	0,5
	0	1	0	0	0	1	0	0,5
	0	2	0	0	0	1	0	0,5

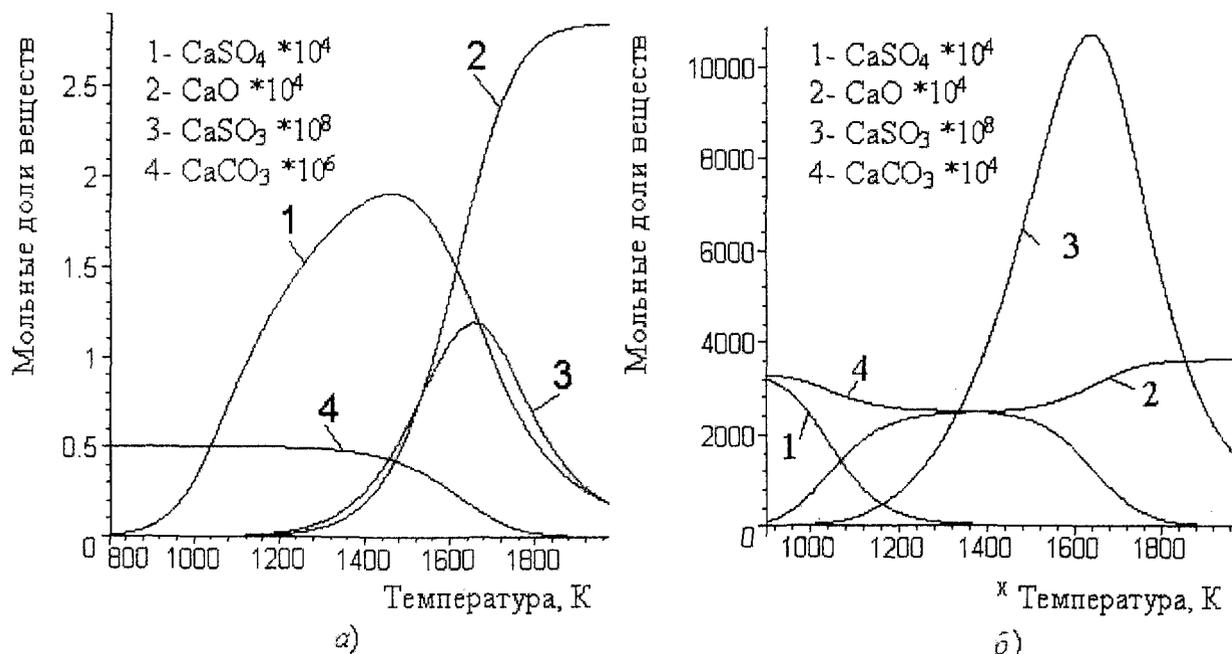


Рис. 2. Зависимость равновесных концентраций x_i в системе $\text{CaCO}_3\text{-SO}_2\text{-O}_2$ при мольном отношении: а) $\text{CaCO}_3/\text{SO}_2 = 1$; б) $\text{CaCO}_3/\text{SO}_2 = 2$

Рассмотрим систему, в которой могут быть следующие вещества:

$\text{CaCO}_3; \text{CaO}; \text{CaSO}_3; \text{CaSO}_4; \text{CO}_2; \text{SO}_2; \text{SO}_3; \text{O}_2$.

Система имеет 8 веществ ($m = 8$) и 4 компонента ($n = 4$). Соответственно в ней может протекать 4 линейно-независимые реакции:

1) $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$;

- 2) $\text{CaSO}_3 = \text{CaO} + \text{SO}_2$;
- 3) $\text{CaSO}_4 = \text{CaO} + \text{SO}_3$;
- 4) $\text{SO}_2 + 0.5\text{O}_2 = \text{SO}_3$.

Стехиометрическая матрица системы имеет вид:

$$\left(\begin{array}{cccccccc|c} \text{CaCO}_3 & \text{CaO} & \text{CaSO}_3 & \text{CaSO}_4 & \text{CO}_2 & \text{SO}_2 & \text{SO}_3 & \text{O}_2 & \\ \hline -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & (1) \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & (2) \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & (3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -0.5 & (4) \end{array} \right)$$

Элементами данной матрицы являются стехиометрические коэффициенты протекающих реакций. Каждая строка матрицы соответствует реакции, а столбец матрицы – определенному веществу. Расчет равновесных значений молярного состава системы от температуры выполняли при заданном начальном составе, соответствующем мольному отношению $\text{CaCO}_3 (\text{CaO}) : \text{SO}_2 = 1$ или 2 составу очищаемых топочных газов (1-я и 2-я строки таблицы 1).

Если в системе отсутствуют CaCO_3 и CO_2 , в ней могут протекать три линейно-независимые реакции:

- 1) $\text{CaSO}_3 = \text{CaO} + \text{SO}_2$;
- 2) $\text{CaSO}_4 = \text{CaO} + \text{SO}_3$;
- 3) $\text{SO}_2 + 0.5\text{O}_2 = \text{SO}_3$.

Стехиометрическая матрица исследуемой системы будет иметь следующий вид:

$$\left(\begin{array}{cccccc|c} \text{CaO} & \text{CaSO}_3 & \text{CaSO}_4 & \text{SO}_2 & \text{SO}_3 & \text{O}_2 & \\ \hline 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & (2) \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & (3) \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -0.5 & (4) \end{array} \right)$$

Расчет равновесных значений молярного состава системы от температуры выполняли при заданном начальном составе, соответствующем мольному отношению $\text{CaCO}_3 (\text{CaO}) : \text{SO}_2 = 1$ или 2 составу очищаемых топочных газов (3-я и 4-я строки таблицы). Результаты расчетов представлены на рис. 2 для исходных мольных отношений $\text{CaCO}_3 : \text{SO}_2$ равных 1 (рис. 2, а) и 2 (рис. 2, б).

Расчеты выполняли в программе Maple 9.5 путем численного решения соответствующих систем уравнений при заданных начальном составе системы, термодинамических характеристиках всех веществ участников реакции и макропараметрах температуре и давлении. Давление принимали равным атмосферному для всех расчетов, а температуру варьировали от 800 К до 2000 К с шагом 25 К. для каждой из систем выполняли серию расчетов при указанных температурах. Затем по найденным значениям равновесных степеней полноты реакций рассчитывали равновесные концентрации веществ, входящих в систему. Однако, сравнивая графические зависимости рис. 2, а и 2, б, видно, что равновесные концентрации x_j существенно меняются от общего количества молей веществ в системе, что затрудняет анализ поведения отдельных веществ в системе. Поэтому нами дополнительно выполнены расчеты равновесных чисел молей N_j и представлены в виде графиков (рис. 3).

С точки зрения практического использования CaCO_3 для очистки от SO_2 наибольший интерес представляет зависимость равновесной мольной доли CO_2 , SO_2 , SO_3 и O_2 от температуры для анализируемых систем показанная на рис. 4.

Поскольку нами была поставлена задача сравнить равновесные степени поглощения оксида серы как известняком, так и оксидом кальция, по предложенной методике были получены данные для системы $\text{CaO} - \text{SO}_2 - \text{O}_2$, представленные на рис. 5.

Сравнивая мольную долю SO_2 в системе $\text{CaCO}_3 - \text{SO}_2 - \text{O}_2$ (кривые 2 на рис. 4) и в системе $\text{CaO} - \text{SO}_2 - \text{O}_2$ (кривые 1 на рис. 5), мы видим, что возможна практически полная очистка топочных газов от серы в интервале температур от 500 до 1300 К при стопроцентном использовании известняка. Кроме того, во второй системе рабочий интервал температур, при которых возможна полная очистка повышается до 1400 – 1600 °С, в зависимости от начального количества оксида кальция CaO в системе.

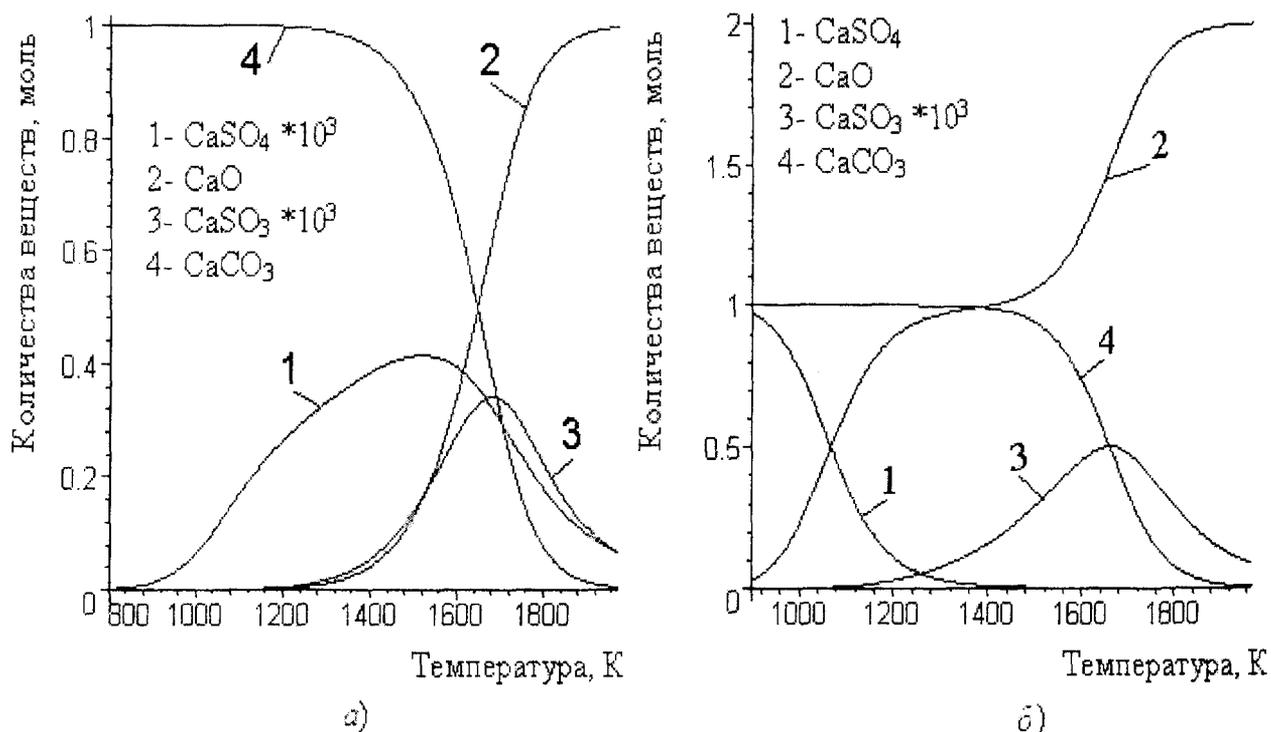


Рис. 3. Зависимость равновесного числа молей N_i в системе $\text{CaCO}_3 - \text{SO}_2 - \text{O}_2$ при мольном отношении: а) $\text{CaCO}_3/\text{SO}_2 = 1$; б) $\text{CaCO}_3/\text{SO}_2 = 2$

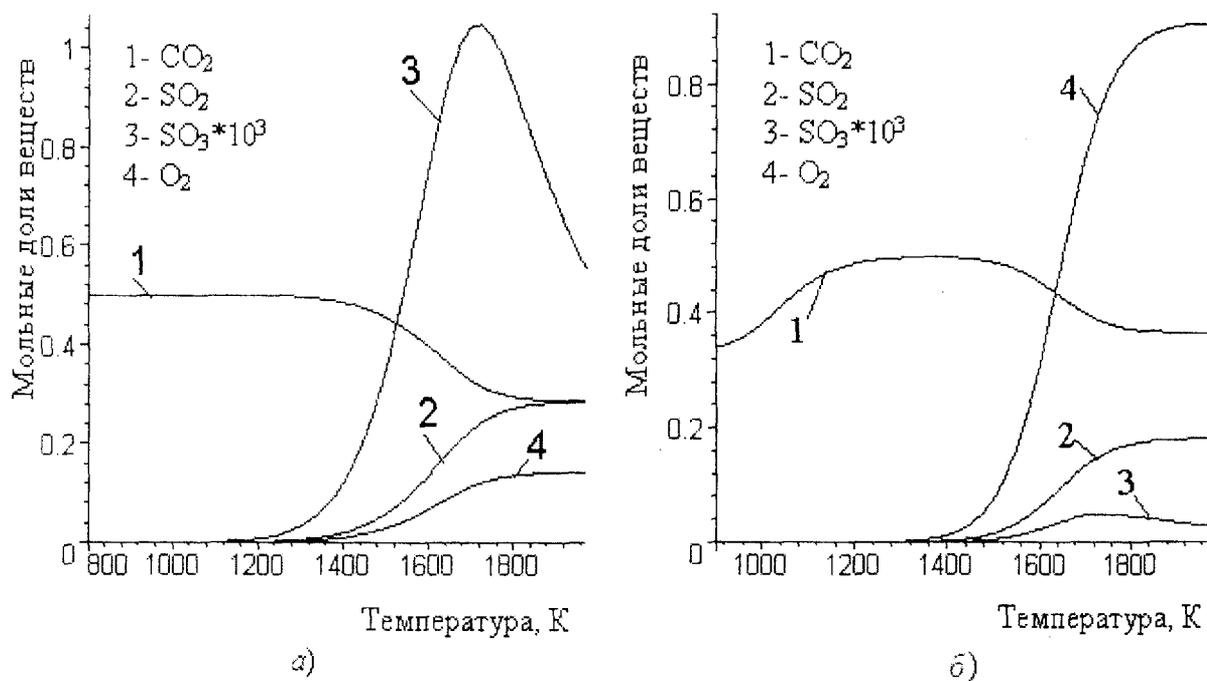


Рис. 4. Зависимость равновесной мольной доли SO_2 от температуры для системы: а) $\text{CaCO}_3 : \text{SO}_2 = 1$; б) $\text{CaCO}_3 : \text{SO}_2 = 2$

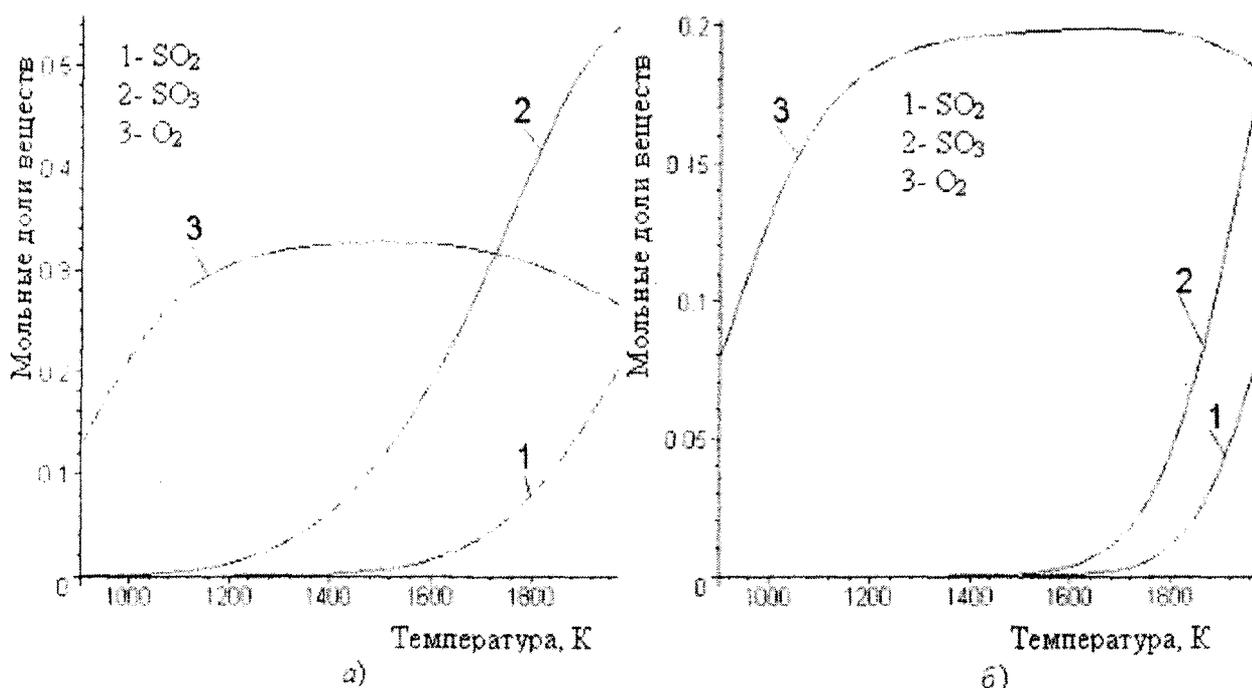


Рис. 5. Зависимость равновесной мольной доли SO_2 от температуры для системы: а – $CaO : SO_2 = 1$; б – $CaO : SO_2 = 2$

Литература:

1 Захаров Г.В. Установка для десульфурации топочных газов // Патент РФ № 2030206, МПК⁷ C1 6B01D 53/34. – Бюл. № 7. – Оpubл. 10.03.95.

2 Беляйкин В.М. Опыт освоения опытно-промышленной установки очистки дымовых газов от диоксида серы на Дорогобужской ТЭЦ / В.М. Беляйкин, Б.В. Некрасов, И.Н. Шмиголь и др. // «Электрические станции». – 1996. – № 7.

3 Куценко С.А. Термодинамические методы моделирования и расчета химических равновесий / С.А. Куценко, Д.В. Цымай // Известия ОрелГТУ. – Серия «Естественные науки». – №1-2. – 2003. – С. 70-75.

4 Цымай Д.В. Анализ равновесий в системе $SnO_2 - SnO - Sn - CO - CO_2$ / Д.В. Цымай, С.А. Куценко // Конденсированные среды и межфазные границы. – Т.5. – №4. – 2003. – С. 397-400.



ИЗВЕСТИЯ

ОРЛОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА СЕРИЯ «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал публикует статьи по широкому спектру проблем в следующих областях: технология машиностроения и приборостроения; упрочняющая, абразивная, лезвийная физико-техническая обработка материалов и изделий, диагностика и контроль качества продукции; информационно-измерительная техника; приборы и системы автоматического управления; прикладная математика и информатика; компьютерные технологии в инженерном деле; техническое регулирование, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции, процессов и услуг.

Журнал открыт для рекламы, *оплата* – на договорной основе (в соответствии с приказом ректора Орел ГТУ).

Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста, напечатанного на листах формата А4. Объем, как правило, не должен превышать: для статьи – семь страниц, для краткого сообщения – двух страниц; для рекламного объявления – одной страницы.

Материал принимается в файловом виде по электронной почте или на дискетах 3,5 дюйма, выполненный в любой версии текстового редактора Microsoft Word без форматирования, с приложением распечатки.

Материалы принимаются в течение всего года и публикуются в текущих номерах

Адрес серии «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»:

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ОрёлГТУ, кафедра «ПМиС»; тел: (4862) 41-98-76; E-mail: pms35@ostu.ru

ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

Размер шрифта 10 пт. (пунктов); *междустрочный интервал* одинарный, *поля*: сверху и снизу – по 25 мм, слева – 30 мм, справа – 15 мм.

Рисунки представляются в черно-белом виде, в форматах .bmp, .jpg, .gif, .wmf. **Основные требования:** толщина и цвет линий должны обеспечивать четкое воспроизведение при черно-белой (с оттенками) печати; линии функциональных зависимостей должны быть на один кегль шире линий осей координат и на три-четыре кегля шире линий сетки; *размеры цифровых и буквенных обозначений* на рисунках должны соответствовать аналогичным элементам текста (за исключением номеров блоков на схемах, которые должны быть указаны цифрами размером, равным удвоенному размеру шифр текста).

Формулы выполняются в редакторе Microsoft Equation; *размеры*: обычный – 10 пт, крупный индекс – 8 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 14 пт, мелкий символ – 10 пт; *стиль* всех символов наклонный.

В редакцию представляются: текст публикации (шрифт Times New Roman): реферат (5-7 строк) на русском и английском языках; название статьи, фамилии и инициалы авторов – на русском и английском языках; экспертное заключение о возможности опубликования; рецензия; сведения об авторах.

К обязательным элементам оформления статьи относятся: индекс УДК; инициалы и фамилии авторов; полное название высшего учебного заведения (организации); название статьи; аннотация (5-7 строк).

В тексте все сокращения, за исключением общепринятых, расшифровываются. Физический смысл символов в формулах объясняется. Значения физических величин приводятся в единицах СИ или внесистемных единицах, разрешенных к употреблению наравне с ними. Буквенные обозначения, цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Список использованных источников оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003. «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». *Нумерация позиций* – согласно очередности ссылок в тексте.

Реферат оформляется в соответствии с правилами ВИНТИ.

Сведения об авторах должны содержать: фамилию, имя, отчество, должность, название кафедры и вуза (подразделения и организации), ученую степень и ученое звание, номера служебного и домашнего телефонов, а при возможности – E-mail. Датой поступления статьи считается последняя после доработки.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

УДК ????.???.???

Пробел 12 пт

Д-р техн. наук, проф. Иванов А.А., канд. техн. наук Петров В.В.

(Орловский государственный технический университет)

Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

Пробел 12 пт

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ 16 ПТ, ПОЛУЖИРНЫЙ, ВЫРАВНИВАНИЕ ПО ЦЕНТРУ

Пробел 10 пт

Реферат на английском языке 5-7 строк шрифт Times New Roman (курсив), 10 пт, выравнивание по ширине, отступ красной строки 0,5 мм (никаких других отступов не допускается).

Пробел 10 пт

Статья до 7 страниц шрифт Times New Roman, 10 пт, выравнивание по ширине, отступ красной строки 0,5 мм (никаких других отступов не допускается).

Рисунок, выравнивание по центру, положение перед текстом

Рис. 1. Название рисунка (10 пт, курсив, полужирный, форматирование по центру)

Ответственные за выпуск:
Степанов Ю.С., Подмастерьев К.В., Киричек А.В.
Редактор К.В. Подмастерьев
Технический редактор В.В. Марков

Известия ОрелГТУ.
Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии
2007. – № 4-3/268(535). – 153 с.

Зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовой информации.
Свидетельство: **ПИ № 77-15496**

Лицензия № ИД00670 от 05.01.2000
Подписано в печать
Формат 69x90/8. Бумага офсетная. Печать ризографом.
Гарнитура «Таймс» Уч.изд. л. 12. Тираж 500 экз.
Заказ № *198/07*

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ОрелГТУ,
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.