

УДК 531.43/46

## ПРОЕКТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ УЗЛОВ

**Анцупов В.П., Анцупов А-р.В., Анцупов А-й.В., Русанов В.А., Губин А.С.**

*Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова,  
Магнитогорск, e-mail: volody-74mgn@mail.ru*

Предложена методика постановки и алгоритм решения краевых задач теории надежности герметизирующих узлов по критерию износостойкости уплотняющих элементов. В основу ее построения положен общий методологический подход к прогнозированию надежности технических объектов и термодинамическая теория прочности твердых тел. В данной работе краевая задача в виде замкнутой системы определяющих уравнений сформулирована для схемы нагружения и условий однозначности стандартных пар трения, моделирующих процесс деградации подвижных герметизирующих узлов. С использованием полученной модели проведены теоретические исследования долговечности металл-полимерных пар трения «ролик – колодка» по критерию износостойкости колодок, изготовленных из различных материалов уплотнений и истираемых в различных условиях трения. По результатам компьютерного эксперимента установлен ряд способов повышения долговечности герметизирующих устройств на основе применения более износостойких полимерных материалов и однослойных или двухслойных антифрикционных покрытий. Наиболее эффективные способы прошли экспериментальную проверку и внедрены в промышленную эксплуатацию.

**Ключевые слова:** герметизирующий узел, модель отказов, уплотняющие элементы, износостойкость, полимерные материалы, покрытия, ресурс

## RESEARCH PROJECT LIFE SEALING KNOTS

**Antsupov V.P., Antsupov A-r.V., Antsupov A-y.V., Rusanov V.A., Gubin A.S.**

*Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, e-mail: volody-74mgn@mail.ru*

A method of setting and an algorithm for solving boundary value problems of the theory of reliability germetizing units on the criterion of wear resistance sealing elements. The basis of its construction put common methodological approach to forecasting the reliability of technical objects and thermodynamic-cal theory of strength of solids. In this paper, the boundary value problem in the form of a closed-system defined by the equation formulated for the circuit loading conditions and the uniqueness of the standard friction pairs, simulating the degradation of moving sealing knots. Using the resulting model theoretical research of durability of metal-polymer pairs tre-of «video – block» for the criteria wear shoes made of various materials and abradable seals in different conditions of friction. According to the results of computer experiment established a number of ways to improve the durability of the sealing device on the basis of a more wear-resistant polymer materials and single or dual anti-friction coatings in. The most effective methods have been pilot-tested and implemented in the industrial hef-operation.

**Keywords:** sealing assembly, model failures, sealing elements, wear, polymeric materials, coatings, resource

Практика эксплуатации многообразных гидравлических систем, обеспечивающих высокую скорость перемещения и точное позиционирование рабочих элементов различных машин и агрегатов, показывает, что их долговечность определяется уровнем работоспособности управляющих (исполнительных) гидроустройств. Согласно ГОСТ 17752-81 к ним относят гидроаппараты и гидродвигатели различных модификаций, длительность работы которых в первую очередь определяется износостойкостью уплотняющих элементов [7]. При этом момент их отказа четко не определен, оценивается ориентировочно из опыта работы или по моменту появления утечек рабочей жидкости из-за нарушения герметичности уплотнительного узла по причине возникновения абразивного износа. Кроме того, ресурс уплотнений крайне мал, в 8–10 раз меньше ресурса других изнашиваемых элементов гидроустройств. В то же время по-

стоянно возрастающие требования к увеличению производительности предприятий, повышению качества продукции и снижению ремонтных и аварийных простоев вызывают необходимость существенного повышения долговечности уплотняющих узлов и в целом гидроустройств.

Поэтому уже на стадии проектно-конструкторской разработки гидравлических систем и компоновки механического агрегата актуальной становится проблема оптимального выбора конструкции подвижных герметизирующих узлов: анализа геометрических и микрогеометрических характеристик, износостойкости материалов уплотняющих элементов, условий трения на контакте и др. для обеспечения требуемого в техническом задании срока службы.

При решении этих задач на этапе конструирования изделий (особенно вновь разрабатываемых, не имеющих аналогов) обычно проводят длительные испытания

лабораторных или натуральных образцов, что существенно удорожает этапы создания машины. Для снижения временных, материальных и финансовых затрат на стадиях проектно-конструкторской разработки, на наш взгляд, эти задачи можно решать аналитически, без проведения модельных или натуральных экспериментов, на основе математического моделирования процесса формирования отказов гидроустройств по критерию износостойкости герметизирующих элементов. Поэтому уже на стадии разработки актуальной становится научная проблема создания адекватных математических моделей износостойкости подвижных герметизирующих узлов для проведения аналитических исследований их ресурса с целью обеспечения требуемого уровня долговечности проектируемого гидропривода.

#### Цель исследований:

– разработка физико-математической модели износостойкости стандартных металл-полимерных пар трения, которая адекватно описывает процесс повреждаемости материалов уплотнений гидроустройств в процессе будущей эксплуатации;

– проведение теоретических исследований на модели износостойкости современных материалов уплотняющих элементов и условий трения для проектирования более долговечных конструкций герметизирующих узлов промышленных гидроприводов.

#### Разработка модели отказов стандартных пар трения

На основе общего методологического подхода к прогнозированию надежности технических объектов [2] ниже сформулирована однопараметрическая краевая задача теории надежности стационарных трибосопряжений «ролик 1 – колодка 2» для представленной на рисунке расчетной схемы их фрикционного взаимодействия.

В модели ролик предполагается изготовленным из стали 40Х, колодки – из различных материалов уплотняющих элементов. Условия их фрикционного взаимодействия (исходные данные в задаче см. ниже) назначали соответствующими условиям трения в герметизирующих узлах промышленных гидроприводов.

Система уравнений краевой задачи формируется в соответствии с принципами общей теории прогнозирования надежности объектов [3, 8]. В качестве параметра состояния исследуемых сопряжений принято текущее значение толщины истираемой колодки  $x_t$  (рисунок). В процессе изнашивания колодки со скоростью  $\dot{y}$  ее толщина уменьшается от начальной величины  $x_t = x_0$  до предельного значения  $x_t = x_{np}$ , назначенного из практических соображений. Износостойкостью стального ролика, как показывает практика, можно пренебречь. Для выбранного параметра  $x_t$  система определяющих уравнений для оценки износостойкости колодок и долговечности исследуемых пар трения принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{– уравнение эволюции пары трения} \\ x_t = x_0 - \dot{y} \cdot t; \end{array} \right. \quad (1)$$

– уравнение ее перехода в предельное состояние

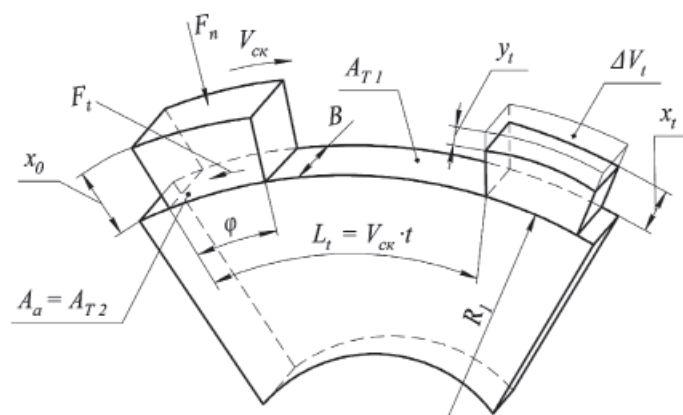
$$x_t = x_0 - \dot{y} \cdot t = x_{np}; \quad (2)$$

– зависимость для оценки износостойкости колодки

$$И = \frac{V_{ck}}{\dot{y}}; \quad (3)$$

– уравнение для оценки ресурса пары трения

$$t_{np} = \frac{x_0 - x_{np}}{\dot{y}}. \quad (4)$$



Расчетная схема нагружения элементов пары трения

Для расчета величины  $\dot{y}$ , входящей во все уравнения краевой задачи (1)–(4), можно использовать базовую зависимость энерго-механической теории изнашивания стационарных трибосопряжений [1, 3], которая выведена на основе совместного решения основополагающих уравнений молекулярно-механической [6] и структурно-энергетической [13, 14] теорий трения:

$$\dot{y} = \frac{\alpha^* \cdot v \cdot f_{\text{мех}}^y \cdot p_a \cdot V_{\text{ск}}}{\Delta u_{e^*}}, \quad (5)$$

где  $\alpha^*$  – коэффициент перекрытия для колодки;  $v$  – коэффициент преобразования внешней энергии в материале ее поверхностного слоя;  $f_{\text{мех}}^y$  – механическая составляющая коэффициента трения в стационарном режиме;  $p_a$  – номинальное давление на контакте;  $V_{\text{ск}}$  – скорость скольжения на контакте;  $\Delta u_{e^*}$  – критическая энергоемкость материала колодки.

Алгоритм решения поставленной задачи для начальных и граничных условий, характеризующих исходное состояние герметизирующего узла в начальный момент времени  $t = 0$  и взаимодействие элементов сопряжения на границах с окружающей средой, состоит из следующих основных блоков.

Блок 1. Исходные данные (рисунок).

1 группа. Параметры внешнего нагружения (трения):  $F_n$ ,  $V_{\text{ск}}$  – нормальная сила и скорость скольжения на контакте.

2 группа. Геометрические характеристики элементов:  $R_1$ ,  $B$ ,  $\phi$  – радиус ролика (радиус контакта), его ширина и угол охвата ролика колодкой;  $x_0$  – толщина колодки в исходном состоянии;  $x_{\text{пр}}$  – предельное значение параметра  $x$  (толщины колодки).

3 группа. Микрогеометрические характеристики трущихся поверхностей:  $R_{a1}$  и  $R_{a2}$ ,  $\Delta_1$  – среднеарифметическое отклонение профиля ролика и колодки, комплексный параметр шероховатости поверхности ролика.

4 группа. Физико-механические характеристики материалов ролика и колодки в исходном состоянии:  $\mu_{1,2}$ ;  $E_{1,2}$ ;  $\sigma_{\text{пл}1,2}$ ;  $\sigma_{T1,2}$ ;  $\sigma_{B1,2}$ ;  $HB_{1,2}$ ;  $HV_{1,2}$ ;  $\alpha_{\text{эф}1,2}$ ;  $\rho_{1,2}$  – коэффициент Пуассона, модуль упругости, предел пропорциональности, текучести и прочности, твердость по Бринеллю и Виккерсу, коэффициент гистерезисных потерь и плотность материалов.

5 группа. Теплофизические характеристики материалов ролика и колодки:  $\Delta H_{S1,2}$ ;  $\lambda_{1,2}$ ;  $\alpha_{1,2}$  – энтальпия плавления, коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи соответственно.

6 группа. Фрикционные характеристики сопряжения:  $\tau_0$ ,  $\beta$  – удельная сдвиговая прочность поверхностей и коэффициент упрочнения молекулярной связи.

Блок 2. Параметры контакта и свойства материалов [15].

2.1. Площади контакта, трения и коэффициент перекрытия (рисунок):

$$A_a = A_{T2} = R_1 \cdot \phi \cdot B; \quad A_{T1} = 2\pi \cdot R_1 \cdot B;$$

$$\alpha_1^* = \frac{A_a}{A_{T1}}; \quad \alpha_2^* = \frac{A_a}{A_{T2}}.$$

2.2. Периметры площадей трения:

$$u_1 = 2 \cdot (2\pi \cdot R_1 + B);$$

$$u_2 = 2 \cdot (R_1 \cdot \phi + B).$$

2.3. Номинальное давление на контакте:

$$p_a = \frac{F_n}{A_a}.$$

2.4. Предел пропорциональности и модуль сдвига материалов:

$$\sigma_{\text{пл}1,2} = (0,9 \dots 0,97) \cdot \sigma_{T1,2};$$

$$G_{1,2} = \frac{E_{1,2}}{2 \cdot (1 + \mu_{1,2})}.$$

2.5. Упругие постоянные материала ролика и колодки:

$$\theta_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1}; \quad \theta_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}.$$

Блок 3. Распределение внешней энергии [12].

3.1. Коэффициент поглощения внешней энергии материалом ролика:

$$v_1 = 1 - (K_\epsilon \cdot R_{a1}^{1/3} + 1)^{-1};$$

$$K_\epsilon = \frac{\theta_1^{2/3}}{\theta_2^{2/3} \cdot R_{a2}^{1/3}}.$$

3.2. Коэффициент поглощения внешней энергии материалом колодки:

$$v_2 = 1 - v_1.$$

Блок 4. Коэффициент трения [6].

4.1. Внутреннее напряжение (контурное давление) в поверхностном слое колодки:

$$\sigma_{a2} = \sigma_{T2} \cdot \left( \frac{p_a}{\sigma_{T2}} \right)^{p_a/\sigma_{T2}}.$$

4.2. Вид напряженного состояния поверхностного слоя колодки:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{упругое состояние,} & \text{если } \sigma_{a2} < \sigma_{\text{пл}2}; \\ \text{упруго-пластическое,} & \text{если } \sigma_{y2} < \sigma_{a2} < \sigma_{T2} \\ \text{пластическое,} & \text{если } \sigma_{T2} < \sigma_{a2} < HB_2. \end{array} \right.$$

Коэффициент трения при установленном виде напряженного состояния:

– при упругом напряженном состоянии

$$f = 2,4 \cdot \tau_0 \cdot \left( \frac{\theta_2^4}{p_a \cdot \Delta_1^2} \right)^{0,2} + \beta + 0,2 \cdot \alpha_{\text{эф2}} \cdot (p_a \cdot \Delta_1^2 \cdot \theta_2)^{0,2};$$

– при упруго-пластическом напряженном состоянии

$$f = 1,25 \cdot \tau_0 \cdot \left( \frac{\theta_2^2}{p_a \cdot \Delta_1} \right)^{1/3} + \beta + 0,4 \cdot \alpha_{\text{эф2}} \cdot (p_a \cdot \Delta_1 \cdot \theta_2)^{1/3};$$

– при пластическом напряженном состоянии

$$f = \frac{\tau_0}{HB_2} + \beta + 0,9 \cdot \left( \frac{p_a}{HB_2} \cdot \Delta_1 \right)^{0,5}.$$

Блок 5. Температура [15].

5.1. Параметры ролика и колодки:

$$m_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1 \cdot u_1}{\lambda_1 \cdot A_{T1}}};$$

$$m_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2 \cdot u_2}{\lambda_2 \cdot A_{T2}}}.$$

5.2. Температура поверхностных слоев ролика и колодки:

$$T_{1,2} = \frac{f \cdot F_n \cdot V_{\text{ск}}}{A_{T1,2} \cdot (\lambda_2 \cdot m_2 + \lambda_1 \cdot m_1)} + T_0.$$

Блок 6. Упругие постоянные материалов ролика и колодки:

$$\theta_{1,2}(T_{1,2}) = \frac{1 - \mu_{1,2}^2(T_{1,2})}{E_{1,2}(T_{1,2})}.$$

Блок 7. Коэффициент трения в стационарном режиме [6].

7.1. Полный коэффициент трения:

$$f^y = 1,25 \cdot (\tau_0 \cdot \theta_2(T_2) \cdot \alpha_{\text{эф2}})^{0,5} + \beta.$$

7.2. Механическая составляющая:

$$f_{\text{мех}}^y = \frac{1,25 \cdot (\tau_0 \cdot \theta_2(T_2) \cdot \alpha_{\text{эф2}}) + \beta \cdot (\tau_0 \cdot \theta_2(T_2) \cdot \alpha_{\text{эф2}})^{0,5}}{3 \cdot (\tau_0 \cdot \theta_2(T_2) \cdot \alpha_{\text{эф2}})^{0,5} + \beta}.$$

Блок 8. Критическая энергоемкость [1, 3].

8.1. Плотность потенциальной составляющей внутренней энергии материала колодки в исходном состоянии – для эластомеров  $u_{e02} = 0$ .

8.2. Изменение плотности тепловой составляющей внутренней энергии материала

колодки при температуре  $T_2$  установившегося режима:

$$\Delta u_{T*2} = \rho_2(T_2) \cdot c_2(T_2) \cdot T_2.$$

8.3. Критическая плотность скрытой энергии материала поверхностного слоя колодки (критическая энергоемкость материала):

$$\Delta u_{e*2} = \Delta H_{S2} - u_{e02} - \Delta u_{T*2}.$$

Блок 9. Повреждаемость [3, 8].

Скорость линейного изнашивания колодки (5):

$$\dot{y} = \dot{y}_2 = \frac{\alpha_2^* \cdot v_2 \cdot f_{\text{мех}}^y \cdot p_a \cdot V_{\text{ск}}}{\Delta u_{e*2}}.$$

Износостойкость материала колодок (3):

$$И = \frac{V_{\text{ск}}}{\dot{y}_2}.$$

Блок 10. Долговечность [3].

10.1. Ожидаемый ресурс пары трения (4):

$$t_{\text{нр}} = \frac{x_0 - x_{\text{нр}}}{\dot{y}_2}.$$

10.2. Коэффициент повышения долговечности  $i$ -й пары трения:

$$K_{ii} = \frac{t_{\text{нр}i}}{t_{\text{нр}1}},$$

где  $t_{\text{нр}1}$  – ресурс пары № 1, в которой материалом колодки является широко применяемый в настоящее время эластомер СКН 26;  $i$  – номер опыта в компьютерном эксперименте.

Совокупность уравнений (1)–(5) и зависимостей, перечисленных в начальных и граничных условиях изложенного алгоритма, представляет модель износных отказов стандартных пар трения по критерию износостойкости колодок, с помощью которой возможно решать упомянутые выше проектные задачи по повышению износостойкости материалов уплотнений и обеспечению долговечности герметизирующих узлов.

### Описание компьютерного эксперимента и результаты теоретических исследований

Целью компьютерного эксперимента, план которого отражает таблица, являлось исследование проектного ресурса сопряжений при изменении материалов колодок и условий трения на контакте. Для этого колодки проектировались из различных материалов уплотнений, рекомендуемых для использования в промышленных гидросистемах современными отечественными и зарубежными фирмами «Simrit», «Economos» и научно-технической литературой [6, 15].

План и результаты компьютерного эксперимента

Вид полимера	Номер опыта	Материал ролика – Сталь 40X	Износостойкость $I_i \cdot 10^6$	Класс и разряд износостойкости (КИ/ $\rho_i$ )	Ресурс, $t_{пр}$ , с	Коэффициент повышения долговечности $K_{ii}$
		Материал уплотнения				
1 серия – без покрытия ролика						
Эластомеры на основе резины	1	СКН 26	2,04	6/ <sub>2</sub>	2038	1,00
	2	Резина 3826	2,45	6/ <sub>2</sub>	2447	1,20
	3	65NBR B210	2,24	6/ <sub>2</sub>	2242	1,10
	4	80 NBR B246	2,50	6/ <sub>2</sub>	2500	1,23
	5	Ecoruber–H	3,07	6/ <sub>3</sub>	3074	1,51
	6	Ecoruber 2	4,55	6/ <sub>4</sub>	4545	2,23
Термопласты	7	Ф4	2,85	6/ <sub>3</sub>	2852	1,40
	8	Ecoflon 1	2,85	6/ <sub>3</sub>	2852	1,40
	9	Ecoflon 2	2,94	6/ <sub>3</sub>	2935	1,44
	10	Ecoflon 3	3,04	6/ <sub>3</sub>	3036	1,49
	11	PTFE GM201	3,05	6/ <sub>3</sub>	3055	1,50
Полиуретаны	12	94 AU V149	3,69	6/ <sub>3</sub>	3686	1,81
	13	95 AU V149	4,08	6/ <sub>4</sub>	4076	2,00
	14	H-Ecopur	3,62	6/ <sub>3</sub>	3623	1,78
	15	Ecopur	4,73	6/ <sub>4</sub>	4732	2,32
2 серия – покрытие на ролике из Ф4						
Эластомеры на основе резины	16	СКН 26	3,83	6/ <sub>3</sub>	3667	1,80
	17	Резина 3826	3,81	6/ <sub>3</sub>	3827	1,88
	18	65NBR B210	3,88	6/ <sub>3</sub>	3807	1,87
	19	80 NBR B246	5,30	6/ <sub>3</sub>	3876	1,90
	20	Ecoruber–H	7,94	6/ <sub>5</sub>	5300	2,60
	21	Ecoruber 2	4,89	6/ <sub>4</sub>	7937	3,89
Термопласты	22	Ф4	5,19	6/ <sub>4</sub>	4886	2,40
	23	Ecoflon 1	5,21	6/ <sub>4</sub>	5190	2,55
	24	Ecoflon 2	5,26	6/ <sub>4</sub>	5208	2,56
	25	Ecoflon 3	5,28	6/ <sub>4</sub>	5263	2,58
	26	PTFE GM201	5,32	6/ <sub>4</sub>	5282	2,59
Полиуретаны	27	94 AU V149	6,47	6/ <sub>5</sub>	5319	2,61
	28	95 AU V149	5,30	6/ <sub>4</sub>	6466	3,17
	29	H-Ecopur	8,33	6/ <sub>5</sub>	5300	2,60
	30	Ecopur	3,83	6/ <sub>3</sub>	8333	4,09
3 серия – покрытие на ролике из Лб3 + Ф4						
Эластомеры на основе резины	31	СКН 26	5,30	6/ <sub>4</sub>	5300	2,60
	32	Резина 3826	5,91	6/ <sub>4</sub>	5906	2,90
	33	65NBR B210	5,84	6/ <sub>4</sub>	5837	2,86
	34	80 NBR B246	6,12	6/ <sub>4</sub>	6122	3,00
	35	Ecoruber–H	7,85	6/ <sub>5</sub>	7853	3,85
	36	Ecoruber 2	11,81	7/ <sub>1</sub>	11811	5,80
Термопласты	37	Ф4	7,32	6/ <sub>5</sub>	7317	3,59
	38	Ecoflon 1	7,65	6/ <sub>5</sub>	7653	3,76
	39	Ecoflon 2	7,69	6/ <sub>5</sub>	7692	3,77
	40	Ecoflon 3	7,77	6/ <sub>5</sub>	7772	3,81
	41	PTFE GM201	7,77	6/ <sub>5</sub>	7772	3,81
Полиуретаны	42	94 AU V149	8,33	6/ <sub>5</sub>	8333	4,09
	43	95 AU V149	10,14	7/ <sub>1</sub>	10135	4,97
	44	H-Ecopur	7,89	6/ <sub>5</sub>	7895	3,87
	45	Ecopur	12,40	7/ <sub>1</sub>	12397	6,08



Исследованы пятнадцать видов полимеров, объединенных в три группы: эластомеры на основе резины; термические полимеры (термопласты); термические эластомеры (полиуретаны) (таблица). Кроме того, в эксперименте исследованы различные условия трения между роликом и колодкой в трех сериях опытов. В первой серии опытов  $i = 1...15$  – ролик предполагали без покрытия; во второй серии  $i = 16...30$  – ролик с однослойным покрытием из фторопласта Ф4; в третьей серии  $i = 31...45$  – ролик с двухслойным латунь-полимерным покрытием из Л63 + Ф4. Предполагалось также, что покрытия получены методом плакирования гибким инструментом [4], а изменение механических и микрогеометрических характеристик поверхностного слоя материала ролика и коэффициента трения после плакирующей обработки оценивали по изложенной в той же работе методике.

По разработанному алгоритму для постоянных условий внешнего нагружения ( $F_n = 200$  Н и  $V_{ск} = 1,5$  м/с) в трех сериях опытов рассчитаны показатели износостойкости  $I_i$  колодок, их класс и разряд ( $KI/p$ ), ресурс  $t_{пр}$  каждой пары трения и коэффициент повышения долговечности  $K_{ii}$  по сравнению с парой № 1 (таблица). Здесь  $i = 1...45$  – номер опыта.

Анализ полученных результатов позволяет выделить три наиболее эффективных способа повышения долговечности металл-полимерных узлов трения:

– применение более износостойких, чем резина СКН-26, полимеров: эластомера Esoguber 2 и полиуретанов 95 AU V149 и Esorig с показателями износостойкости  $I > 4$ ,  $KI/p = 6/4$  и коэффициентом повышения долговечности  $K_{ii} > 2$  (см. выделенные темным фоном строки № 6, 13, 15 в первой серии опытов (таблица));

– использование более износостойких полимеров с одновременным плакированием поверхности контртела фторопластом Ф4 (см. выделенные темным фоном опыты № 20–30). Очевидно, что наличие фторопластового покрытия значительно повышает показатели износостойкости полимерных материалов ( $I \approx 4...8$ ,  $KI/p = 6/4 - 6/5$ ) и увеличивает ресурс сопряжений ( $K_{ii} \approx 2...4$ ) за счет уменьшения коэффициента трения на контакте [4];

– использование более износостойких полимеров с одновременным плакированием поверхности контртела двухслойным латунь-фторопластовым покрытием (см. выделенные темным фоном опыты № 31–45 в таблице). Покрытие из Л63 + Ф4 более существенно, чем покрытие из Ф4, увеличивает как показатели износостой-

кости ( $I \approx 5...12$ ,  $KI/p = 6/5 - 7/1$ ), так и коэффициент повышения ресурса пар трения ( $K_{ii} \approx 2,5...6$ ) за счет не только снижения коэффициента трения, но и улучшения физико-механических характеристик латунного поверхностного слоя [4].

### Практическая реализация полученных результатов

Выявленные в компьютерном эксперименте наиболее эффективные способы повышения ресурса металл-полимерных пар трения предложены для изготовления герметизирующих узлов плунжерных гидродвигателей систем уравнивания прокатных валков [7] и золотниковых распределителей гидроочистки полос от окалины [9] станов горячей листовой прокатки с одновременным плакированием поверхностей плунжеров и золотников. Они прошли производственные испытания и внедрены в промышленную эксплуатацию. Ряд новых конструкций гидростроительств защищены патентами на полезную модель, например [10, 11].

### Заключение

Таким образом, для снижения временных, материальных и финансовых затрат на этапах проектно-конструкторской разработки гидравлических систем можно прогнозировать долговечность подвижных герметизирующих узлов и анализировать возможные способы повышения их ожидаемого ресурса аналитически, без проведения экспериментов.

### Список литературы

1. Анцупов А.В. Обеспечение надежности узлов трения машин на стадии проектирования: монография / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 293 с.
2. Анцупов А.В. (мл.) Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов: монография / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – 308 с.
3. Анцупов А.В. (мл.) Развитие теории прогнозирования надежности деталей машин / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 2. – С. 26–32.
4. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом: монография. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. – 241 с.
5. Выбор износостойких материалов при проектировании узлов трения / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов и др. // Материалы 67-й научно-технической конференции: сб. докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – Т. 1. – С. 197–200.
6. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

7. Методика прогнозирования надежности плунжерных гидроцилиндров по критерию износостойкости уплотнений / А.В. Анцупов, А.С. Губин, В.А. Русанов, И.Ю. Чекалин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: матер. 69-й науч.-техн. конф. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – Т. 2. – С. 141–143.

8. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов / В.П. Анцупов, Л.Т. Дворников, Д.Г. Громаковский, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – № 1. – С. 141–146.

9. Оценка долговечности и повышение срока службы золотниковых распределителей / А.В. Анцупов, В.А. Русанов, В.П. Анцупов и др. // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та, 2012. – С. 44–52.

10. Пат. на ПМ 114890. Гидроцилиндр устройства для регулирования раствора валков прокатной клетки / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.) и др. // БИПМ. – 2012. – № 11. – С. 36.

11. Пат. на ПМ 69593. Гидравлический распределитель / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), С.П. Шинкевич // БИПМ. – 2007. – № 36. – С. 1150.

12. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопрежении и прогнозирование его долговечности. – Саратов: Саратовский ун-т, 1979. – 152 с.

13. Структурно-энергетическая интерпретация взаимосвязи процессов трения и изнашивания / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов и др. // Процессы и оборудование металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. С.И. Платова. – Вып. 8. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – С. 233–240.

14. Структурно-энергетический подход к оценке фрикционной надежности материалов и деталей машин / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.) и др. // Материалы 66-й науч.-техн. конф.: сб. докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – Т. 1. – С. 258–262.

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

## References

1. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jr.), Antsupov V.P. *Obezpechenie nadezhnosti uzlov treniya mashin na stadii proektirovaniya: monografija* [Ensuring the reliability of friction units at the design stage], Magnitogorsk: Publishing centre of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2013. 293 p.

2. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jr.), Antsupov V.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti detalej mashin po kriterijam kineticheskoj prochnosti i iznosostojkosti materialov* [Theory and practice of ensuring the reliability of machine parts according to the criteria of kinetic strength and durability of materials], Magnitogorsk: Publishing centre of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2015. 308 p.

3. Antsupov A.V. (jr.), Antsupov A.V., Antsupov V.P. *Razvitie teorii prognozirovaniya nadezhnosti detaley mashin*, Machine building: network electronic scientific journal, 2014, no. 2. pp. 26–32.

4. Antsupov V.P. *Teoriya i praktika plakirovaniya izdelij gibkim instrumentom* [Theory and practice of cladding products flexible tool], Magnitogorsk: Publishing centre of Nosov Magnitogorsk state technical university, 1999, 241 p.

5. Antsupov V.P., Antsupov A.V. (jr.), Antsupov A.V., Gubin A.S., Rusanov V.A. et al. *Vybor iznosostojkih materialov pri proektirovanii uzlov trenija* (Selection of wear-resistant materials in the design of the friction units) Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 67-i nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Important issues of modern science, engineering and education: reports of the 67th scientific conference]. Magnitogorsk: Publishing centre of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2009. Vol. 1. pp. 197–200.

6. Kragelskiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Fundamentals of friction and wear-out calculations]. M.: Machine building, 1977, 526 p.

7. Antsupov A.V. A.S. Gubin, V.A. Rusanov et al. *Metodika prognozirovaniya nadezhnosti plunzhernykh gidrotsilindrov po kriteriyu iznosostojkosti uplotneniy* (Method of reliability prediction for plunger hydraulic cylinder using wear resistance of sealings) Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 69-i nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Important issues of modern science, engineering and education: reports of the 69th scientific conference]. Magnitogorsk: Publishing centre of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2011. Vol.2. pp. 141–143.

8. Antsupov V.P., Dvornikov L.T., Gromakovskij D.G., Antsupov A.V. (ml), Antsupov A.V. *Osnovy fizicheskoy teorii nadezhnosti detalej mashin po kriteriyam kineticheskoj prochnosti materialov* [Basic physical theory of reliability of machine parts according to the criteria of kinetic strength of materials] Herald Publishing centre of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2014, no. 1, pp. 141–146.

9. Antsupov A.V., Rusanov V.A., Antsupov V.P. et al. *Otsenka dolgovечности i povыshenie sroka sluzhby zolotnikovyykh raspredeliteley* (Service life assessment and improvement of operating life of slide valves), Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov: mezhregion. sb. nauchn. tr. [Mechanical equipment of metallurgical enterprises: interregional collection of scientific articles] under the editorship of Korchnov A.G. Magnitogorsk: Publishing centre of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2012, pp. 44–52.

10. Useful model patent 114890. *Hydraulic cylinder of the unit for control of roller gap in a rolling stand* / V.P. Antsupov, A.V. Antsupov, A.V. Antsupov (jr.) et al. BIPM, 2012, no11, pp. 36.

11. Useful model patent 69593. *Hydraulic distributor* / V.P. Antsupov, A.V. Antsupov, A.V. Antsupov (jr.) et al. BIPM, 2007, no36, pp. 1150.

12. Protasov B.V. *Energeticheskie sootnosheniya v tribosopryazhenii i prognozirovanie ego dolgovечности* [Energy relations in tribocoupling and prediction of its durability]. Saratov.: Saratov university, 1979. 152 p.

13. Antsupov A.V., Rusanov V.A., Antsupov V.P. et al. *Strukturno-jenergeticheskaja interpretaciya vzaimosvjazi processov treniya i iznashivaniya* (Structural-energy interpretation of the relationship of friction and wear), Processy i oborudovanie metallurgicheskogo proizvodstva: mezhregion. sb. nauchn. tr. [Processes and equipment of metallurgical production: interregional collection of scientific articles] under the editorship of Platov S.I. Magnitogorsk: Publishing centre of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2009, pp. 233–240.

14. Antsupov V.P., Antsupov A.V. (jr.), Antsupov A.V. et al. *Strukturno-jenergeticheskij podhod k ocenke frikcionnoj nadezhnosti materialov i de-talej mashin* (Structural-energy approach to the assessment of the reliability of the friction material and de-hoist cars) Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 66-i nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Important issues of modern science, engineering and education: reports of the 66th scientific conference]. Magnitogorsk: Publishing centre of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2008. Vol.1. pp. 258–262.

15. *Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wear-out and lubrication (tribology and triboengineering)] A.V. Chichinadze, E.M. Berlinger, E.D. Brown et al. under the editorship of A.V. Chichinadze. M.: Machine building, 2003. 576 p.

## Рецензенты:

Кутлубаев И.М., д.т.н., профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск;

Точилкин В.В., д.т.н., профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск.