

УДК.671.791

Нечаев Г.И., д.т.н.<sup>1</sup>, Яковлева А.Г., аспирант<sup>2</sup>, Камель Г.И., д.т.н.<sup>2</sup>

1 — ВНУ им. В. Даля, г. Луганск, 2 — ЗНТУ, г. Запорожье

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРОКА СЛУЖБЫ РОТОРНЫХ ПИТАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНО-ЗАГРУЗОЧНОЙ СИСТЕМЫ

*Приводится математическая модель рабочей, вращающейся поверхности конической трибосистемы после износа. Установлены параметры, влияющие на формирование рельефа износа ротора.*

Конические трибосистемы (КТС) используются при автоматизации технологических процессов в химической, целлюлозно-бумажной, металлургической и других отраслях. Это вызвано тем, что с помощью КТС можно компенсировать износ в процессе работы без остановок технологической линии. В литературных источниках [1, 2] приводятся данные по эксплуатации конических трибосистем на примере роторных питателей высокого давления (ПВД) шведской фирмы Камюр, успешно работающих в России, Украине, Швеции и США.

Анализ литературных источников показал, что на данный момент не изучено влияние на формирование рельефа износа сопрягаемых поверхностей роторных ПВД таких параметров как: а) износостойкость используемых материалов; б) концентрации твердых частиц в щелочи; в) величина зазора между ротором и корпусом при эксплуатации; г) режущие углы в ПВД.

**Целью исследований** является создание математической модели рельефа износа рабочей поверхности ротора и установление факторов, влияющих на формирование рельефа износа и срок службы роторных питателей.

Объектом исследования были выбраны роторные ПВД фирмы Камюр, работающие на Соломбальском и Архангельском целлюлозно-бумажных комбинатах (ЦБК) и Братском и Усть-Илимском лесопромышленных комплексах.

Анализ факторов, оказывающих влияние на формирование износа деталей ПВД КТС показал, что среди них можно выделить такие, которыми можно целенаправленно управлять. К таким факторам относятся:

1) износостойкость материалов, используемых для изготовления деталей и их восстановительной наплавки;

2) засоренности щелочи и древесной щепы твердыми частицами, от которых зависит концентрация твердых частиц в щелочи, а, следовательно, и интенсивность износа;

3) величина зазора в роторном ПВД;

4) величина режущих углов в роторном ПВД.

Для создания математической модели использовались математическая статистика и планирование экспериментов [3].

Интервалы варьирования переменных, их верхние, основные и нижние уровни представлены в таблице 1. Исследования проводились на двух уровнях, с планом полного факторного эксперимента  $2^4$  [3]. В качестве параметров оптимизации выбран срок службы роторного ПВД.

В качестве факторов математической модели были выбраны:

1) относительная износостойкость рабочей поверхности ротора ( $x_1 = \varepsilon$ );

2) концентрация твердых частиц в щелочи ( $x_2 = 3, мг / л$ );

3) величина зазора в роторном ПВД.

Перечисленные факторы варьировали на двух уровнях. Выбор нижнего и верхнего уровней обусловлены условиями эксплуатации роторных ПВД на разных предприятиях отрасли. Факторы, которые учитывались с достаточной точностью. Рассмотрим эти факторы подробно.

Интервалы варьирования переменных

Наименование факторов	Уровень варьирования			Интервалы варьирования
	Верхний «+1»	Основной «0»	Нижний «-1»	
Относительная износостойкость используемых материалов $X_1$ ( $\varepsilon$ )	4	2,5	1	1,5
Концентрация абразивных частиц в щелочи, мг/л ( $X_2$ ), ( $\xi_{млг/литр}$ , мг/литр)	90	50	10	40
Величина зазора мкм ( $X_3$ ) ( $\delta_0$ , мкм)	250	150	50	100
Величина режущих углов, град. ( $X_4$ )	100	80	60	20

1. Относительная износостойкость используемых материалов ( $X_1 = \varepsilon$ ).

На всех роторных ПВД использовались следующие материалы. В качестве сопрягаемой неподвижной детали для всей опытной партии использовалась рубашка из кремнистого монель-металла (50% меди, 48% никеля, 2% кремния). В качестве материала вращающейся детали ротора на нижнем уровне использовались роторы из стали 12X18H10T или наплавленный после ремонта ротор проволокой СВ-07X18H10T над слоем плавленного флюса АН-26С. Материал ротора имел твердость НВ=180-220, а относительную износостойкость  $\varepsilon = 1$ . На верхнем уровне использовались роторы, наплавленные присадочной проволокой СВ – 07X25H13 (ГОСТ2246-70) под слоем керамического флюса (основа флюса АН-26с с добавкой во флюс легирующих элементов, карбид кремния и углерода) [1]. Было установлено, что износостойкость материала ротора влияет на рельеф износа.

2. Концентрация твердых частиц в щелочи ( $X_2 = 3, мг/л$ ).

Концентрация абразивных частиц в щелочи определялась по методике [1] на разных предприятиях. Результаты исследований показали, что концентрация абразивных частиц в щелочи зависит от объема привозной щепы. Так, на Соломбальском ЦБК используются 100% привозной щепы и срок службы роторных ПВД не превышает 2-3 месяцев. На Братском и Усть-Илимском ЛПК используется менее 5% привозной щепы, а срок службы аналогичных ПВД превышает 12-16 месяцев. С учетом этого, в качестве нижнего уровня была взята концентрация абразивных частиц в щелочи в роторных ПВД, находящихся в эксплуатации на Братском и Усть-Илимском ЛПК. Концентрация абразивных частиц в щелочах  $x_2 = \varepsilon = 10MP/л$ . На верхнем уровне была взята концентрация абразивных частиц в щелочи в роторных ПВД, находящихся в эксплуатации на Соломбальском ЦБК. Концентрация абразивных частиц в щелочи  $x_2 = 3_{\Delta} = 190.мг/л$ . Концентрация твердых частиц в щелочи влияет на рельеф износа в роторе ПВД.

3. Средняя величина зазора в роторном ПВД ( $X_3 = \delta_{cp, мкм}$ ).

На предприятиях отрасли ранее использовалась компенсация критического зазора (ККЗ). При этом средняя величина зазора в питателе достигала 150 мкм. ККЗ осуществлялось один раз в 5 - 7 дней и сопровождалось возникновением в роторном ПВД явлений заклинивания, схватывания и заедания вращающегося ротора относительно корпуса. При этом срок службы роторных ПВД был ниже допустимого срока. В последнее время [2] разработана принудительная микротолчковая компенсация зазора, которая позволяет эксплуатировать питатель при минимальной величине зазора  $\delta_0 = 50мкм$ . При таком режиме эксплуатации в ПВД были полностью устранены явления заклинивания, схватывания и заедания, и ПВД полностью вырабатывали свой ресурс. С учетом этого на всех опытных роторных ПВД на нижнем уровне использовалась величина зазора  $X_3 = \delta_0 = 50мкм$ , а на верхнем уровне ис-

пользовалась величина зазора  $X_3 = \delta_0 = 150 \text{ мкм}$ . Было замечено, что рельеф износа в роторе меняется при изменении величины зазора в ПВД.

4. Величина режущих углов на роторе и ситах ( $X_3 = \alpha$ , град.).

В процессе работы ротора ПВД в вертикальной плоскости карман ротора загружается щепой, при этом концентрация гидросмеси в кармане ротора возрастает с 30% до 90% и в нижней части корпуса в процессе вращения ротора происходит срезание щепы. При среднем угле  $\alpha_{ca} = 100\%$  (угол кромки ротора  $90^\circ$ , угол кромки сит корпуса  $110^\circ$ ;  $\alpha_{cp} = \frac{90+110}{2} = 100^\circ$ ).

При этом угле затрудняется процесс срезания щепы. Плохо срезанная щепка попадает в зазор, деформируется и интенсивно изнашивает рабочие конические поверхности ротора и корпуса. С целью улучшения регенерирующих свойств деталями роторного ПВД было предложено ввести оптимальные регенерирующие углы на роторе ( $\alpha_p = 55^\circ$ ) и ситах корпуса ( $\alpha_k = 65^\circ$ ), средний режущий угол  $\alpha_{cp} = 68^\circ$ . Использование оптимальных регенерирующих углов на роторе и корпусе ПВД повлияло на рельеф износа ротора, улучшило срезание щепы в областях и привело к увеличению срока службы ПВД. С учетом этого на всех опытных роторных ПВД, работающих на Братском ЛПК и Соломбальском ЛПК на нижнем уровне были использованы режущие углы  $X_3 = \alpha_{cp} = 80^\circ$  ( $\alpha_p = 55^\circ$ ;  $\alpha_k = 65^\circ$ ), а на верхнем уровне использовались режущие углы  $X_3 = \alpha_{cp} = 80^\circ$  ( $\alpha_p = 90^\circ$ ;  $\alpha_k = 110^\circ$ ).

В качестве параметров оптимизации брались значения (характеристики) рельефа износа, которые описываются параболой четвертого порядка, и срок службы опытных ПВД. Методика определения износа ротора и характер рельефа износа роторов после эксплуатации достаточно подробно описаны в литературе [2]. Используя методику [2], снимались результаты износа с 8-ми характерных участков ротора по длине окружности между окном с шагом 20 – 25 мм вдоль образующей ротора. На длине участка ротора 470 мм с шагом 20 мм с помощью индикатора часового типа определялась величина износа через камеры 40 мм. Количество замеров на участке достигалось 20, а на 8-ми участках доходило до 150. По этим данным строился уровень рельефа износа, который описывался параболой 4-го порядка. Подобные замеры осуществляли на всех опытных роторах ПВД, эксплуатирующихся на Братском и Усть-Илимском ЛПК, Соломбальском ЦБК. Соответствующая матрица планирования приведена в таблице 2. Обработка результатов исследований экспериментов (табл. 3) выполнялась в программе Microsoft Excel 2003. Воспроизводимость опытов при одинаковом числе параллельных опытов (табл. 1) проверялась по критерию Кохрена [4]. Результаты подсчета критерия Кохрена показали, что

$$G_{расч} = 0.2358 \leq C_{табл} = 0.3346. \quad (2)$$

Таким образом, процесс считается воспроизводимым. Дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта), согласно работы [4] равна 0.1837, дисперсия адекватности равна 0.3602.

Получив высокую воспроизводимость процесса, определяли коэффициент регрессии математической модели.

Линейные уравнения ( $Y$ ) срока службы роторных питателей (месяцы) имеет вид

$$Y(X_1; X_2; X_3; X_4) = 26,198 + 0,216X_1 - 0,242X_2 - 0,07X_3 - 0,185X_4 + 0,038X_1X_2 + 0,005X_1X_3 + 0,0034X_1X_4 + 0,0012X_2X_3 + 0,0023X_2X_4 + 0,0006X_3X_4 - 0,0002X_1X_2X_3 - 0,003X_1X_2X_4 - 1 \cdot 10^{-5}X_2X_3X_4 + 1 \cdot 10^{-5}X_1X_2X_3X_4;$$

$$\tau(\varepsilon; \xi; \delta; \alpha) = 26,198 + 0,216\varepsilon - 0,242\xi - 0,07\delta - 0,185\alpha + 0,038\varepsilon\xi + 0,005\varepsilon\delta + 0,0034\varepsilon\alpha + 0,0012\xi\delta + 0,0023\xi\alpha + 0,0006\delta\alpha - 0,0002\varepsilon\xi\delta - 0,003\varepsilon\xi\alpha - 1 \cdot 10^{-5}\xi\delta\alpha + 1 \cdot 10^{-5}\varepsilon\xi\delta\alpha, \text{ мес.} \quad (3)$$

Таблица 2

Матрица планирования экспериментов

№ п/п	Обозначение факторов			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

Таблица 3

Результаты исследований экспериментов

№	Обозначение факторов							
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub> · 10 <sup>-8</sup>	Y <sub>4</sub>
1	1	10	50	60	12	120	3,8	13
2	4	10	50	60	10,5	64	4,2	16
3	1	90	50	60	21	210	6,5	8
4	4	90	50	60	10	100	10	14
5	1	10	250	60	20	200	6,5	8
6	4	10	250	60	14	140	4,5	12
7	1	90	250	60	24	240	7,8	1
8	4	90	250	60	20	20	6,5	9
9	1	10	50	100	22	29	7	8
10	4	10	50	100	18	18	5,5	10
11	1	90	50	100	23	23	7,8	5,5
12	4	90	50	100	16	20	5	11
13	1	10	250	100	30	30	9,8	4
14	4	10	250	100	16	16	5	11
15	1	90	250	100	36	36	11	2
16	4	90	250	100	29	29	9,5	4

Проверка значимости коэффициентов регрессии проводилась по критерию Стюдента. Коэффициенты считаются значимыми, если выполняется равенство

$$|B_i| > \Delta b_i = t(0.05; f_y) \frac{S}{V_n}, \quad (4)$$

где  $t(0.05; f_y)$  – 5%-ная точка распределения Стюдента со степенями свободы.

Из формул (2) и (4) следует, что все коэффициенты регрессии значимы с доверительной вероятностью 0,95.

Адекватность модели проверялась по критерию Фишера:

$$F_{расч} = 1.96 \leq F_{табл} = 2.04. \quad (5)$$

Модели адекватны с доверительной вероятностью 0,95. Математические и экспериментальные данные характеризуются хорошей сходимостью результатов.

Результаты производственных испытаний (табл. 3), реализованных по матрице планирования, показали существенную зависимость характеристик параболы 4-го порядка и долговечности от износостойкости материалов его деталей, концентрации абразивных частиц в щелочи, величин зазора в ПВД и режущих углов в питателе. Расчетные значения долговечности в ПВД, выполненные по уравнению (3) для всех 16 опытов (табл. 3), показали хорошую сходимость их с экспериментальными значениями.

Таким образом, результаты исследований выбранных факторов по матрице планирования и анализ полученных уравнений регрессии показали, что выбранная система факторов и область их значений позволяют получить в зависимости от величины и взаимного сочетания факторов различные значения характеристик рельефа износа параболы 4-го порядка и срока службы питателя. Необходимо стремиться к тому, чтобы материалы ротора и корпуса обладали максимальной износостойкостью, для уменьшения концентрации твердых частиц в щелочи использовалась очищенная от твердых частиц щепы, эксплуатация питателей осуществлялась при минимальном зазоре и использовались оптимальные режущие углы в ПВД.

### **Выводы**

1. Разработаны математические модели для определения характеристик кривых износа в виде парабол 4-го порядка, позволяющие прогнозировать эти показатели.
2. Установлены характеристики кривых износа поверхности ротора:
  - а) уровень параболы;
  - б) площадь параболы;
  - в) максимальная величина износа.
3. Установлено, что с помощью рабочих параметров: износостойкости используемых материалов, концентрации твердых частиц в щелочи, величины зазора в ПВД, режущих углов в роторе и корпусе можно управлять сроком службы роторных питателей.

### **Список литературы**

1. Камель Г.И. Роторные питатели установок непрерывной варки целлюлозы. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 160 с.
2. Нечаев Г.И., Камель Г.И. Повышение надежности и продуктивности загрузочных устройств непрерывной варки целлюлозы и полуцеллюлозы. – Луганск: Изд-во СНУ им. В.Даля, 2005. – 392 с.
3. Налимов В.Р., Чернова Н.А. Статические методы планирования экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
4. Винарский М.С., Люрье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техника, 1975. – 168 с.

Стаття надійшла до редакції 08.06.07  
© Нечаєв Г.І., Яковлева А.Г., Камель Г.І., 2007