

Математическая модель срока службы роторных питателей транспортно-загрузочной системы

Г. И. КАМЕЛЬ, В. Н. МИЛЮТИН, П. С. ИВЧЕНКО

Днепродзержинский государственной технический университет

Приводится математическая модель рабочей, вращающейся поверхности конической трибосистемы после износа. Установлены параметры, влияющие на формирование рельефа износа ротора. Разработаны математические модели для определения характеристик кривых износа в виде парабол 4-го порядка, позволяющие прогнозировать эти показатели.

Приводиться математична модель робочої, обертаючої поверхні конічної трибосистеми після спрацювання. Встановлені параметри, які впливають на формування рельєфу спрацювання ротора. Розроблені математичні моделі для визначення характеристик кривих зношування в вигляді парабол 4-го порядку, які дозволяють прогнозувати ці показники.

A mathematical model of working rotating conical surface tribosystem after wear. The parameters influencing the formation of the relief of the rotor wear. The mathematical models to determine the characteristics curves of wear in the form of parabolas 4th order to predict these figures.

Постановка проблемы и анализ публикаций.

Конические трибосистемы (КТС) используются при автоматизации технологических процессов в химической, целлюлозно-бумажной, металлургической и других отраслях. Это вызвано тем, что с помощью КТС:

1. 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.

2. анализ литературных источников показал, что отсутствие влияния формирования рельефа износа сопрягаемых поверхностей роторных ПВД таких параметров как: а) износостойкости используемых материалов; б) концентрации твердых частиц в щелочи; в) величина зазора между ротором и корпусом при эксплуатации и г) режущих углов 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, успешно работающие на Солонбальском и Архангельском целлюлозно-бумажных комбинатах (ЦБК) и Братском и Усть-Илимском лесопромышленных комплексах.

Изложение материалов исследования.

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 использовалась 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 2^3 [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 ($x_2 = 3, \text{ мг/л}$);

3) величина зазора в роторном ПВД.

Таблица 1. Интервалы варьирования переменных

Наименование факторов	Уровень варьирования			Интервалы варьирования
	Верхний «+1»	Основной «0»	Нижний «-1»	
Относительная износостойкость используемых материалов X_1 (ε)	4	2,5	1	1,5
Концентрация абразивных частиц в щелочи, мг/л (X_2) ($\xi \text{ мг/литр}$, мг/литр)	90	50	10	40
Величина зазора мкм (X_3) (δ_0 , МКМ)	250	150	50	100
Величина режущих углов, град. (X_4) (α , град.)	100	80	60	20

($X_3 = \delta_0$), мкм и среднее значение режущих углов в роторе и ситах корпуса ($X_4 = 2$, град.). 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.

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 ротора, наплавленные присадочной проволокой СВ – 07X25H13 (ГОСТ2246-70) под слоем керамического флюса (основа флюса АН-26с с добавкой во флюс легирующих элементов, углерод, 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 $x_2 = \varepsilon = 10$ МР/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 $\delta_0 = 50$ МКМ. 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 $X_3 = \delta_0 = 50$ МКМ, а на верхнем уровне использовалась величина зазора $X_3 = \delta_0 = 150$ 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 $\alpha_{ca} = 100^\circ$ (угол кромки ротора 90° угол кромки сит корпуса 110° ; $\alpha_{cp} = \frac{90+110}{2} = 100^\circ$). 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 корпус ($\alpha_k = 65^\circ$) средней 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 – 25мм вдоль образующей ротора. На длине участка ротора 470мм с шагом 20мм с помощью индикатора часового типа определялась величина износа через камеры 40мм. Количество замеров на участке достигалось 20, а на 8-ми участках доходило до 150. По этим данным строилось уравнение рельефа износа, которая описывалась 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. Обработку результатов исследований экспериментов (табл. 3) выполнялось в программе Microsoft Excel 2003. Воспроизводимость опытов при одинаковом параллельном числе параллельных опытов (табл. 1) проверялось 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.

Таблица 2. Матрица планирования экспериментов.

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

Таблица 3. Результаты исследований экспериментов.

№	Обозначение факторов							
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁	Y ₂	Y ₃ · 10 ⁻⁸	Y ₄
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

Линейное уравнение (Y) срока службы роторных питателей (месяцы) имеет вид

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

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

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.

Математические модели параметров оптимизации долговечности питателей, в зависимости от износостойкости, концентрации твердых частиц в щелочи, величины зазора в ПВД и величины режущих углов в ПВД имеют вид.

Адекватность модели проверялось 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 (таблица 3), реализованных по матрице планирования показали существенную зависимость характеристик

параболы 4-го порядка и долговечности от износостойкости материалов его деталей, концентрацию абразивных частиц в щелочи, величин зазора в ПВД и режущих углов в питателе. Расчетные значения долговечности в ПВД, выполненных 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: 1) материалы ротора и корпуса обладали максимальной износостойкостью; 2) для уменьшения концентрации твердых частиц в щелочи использовалась очистка щепы от твердых частиц с помощью циклона; 3) эксплуатация питателей осуществлять при минимальном зазоре и 4) использовалось оптимальные режущие углы в конической трибосистеме.

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; максимальная величина износа.

3. Установлено, что с помощью рабочих параметров: 1) износостойкость используемых материалов; 2) концентрации твердых частиц в щелочи; 3) величины зазора в ПВД; 4) режущими углами в роторе и корпусе можно управлять сроком службы роторных питателей конической трибосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

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

пост.25.02.15