

080202143)
Л 985

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Челябинский политехнический институт имени Ленинского
комсомола

На правах рукописи

ЛЯХОВЕЦКИЙ Владимир Мошкович

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
(На примере деталей и узлов карьерных
экскаваторов)

Специальность 05.02.02
"Машиноведение и детали машин"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Работа выполнена на кафедре "Детали машин и ПТМ" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
профессор Кармадонов А.Ф.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Михлин В.М. (ГОСНИТИ), г.Москва,
кандидат технических наук Шаламов А.А.
(Челябинский филиал НАТИ)

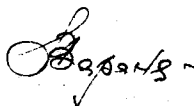
Ведущее предприятие - НИИТяжмаш производственного объединения "Уралмаш".

Защита состоится "29" ноября 1978 года в 14 часов,
в аудитории 244 на заседании специализированного совета
К 053.13.02 Челябинского политехнического института имени Ленин-
ского комсомола, г.Челябинск, проспект им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан "23" октября 1978 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просим направлять в специализированный совет К 053.13.02 по адресу:
454044, г.Челябинск, 44, проспект им. В.И.Ленина, 76, ЧПИ.

Ученый секретарь
специализированного совета
канд. техн. наук, доцент



Варанкин А.И.

Актуальность работы. Необходимым условием обеспечения высоких темпов повышения эффективности общественного производства, ускорения научно-технического прогресса и роста производительности труда - главных составляющих экономической стратегии партии в текущей пятилетке - является высокоэффективное использование машин и технологического оборудования во всех отраслях народного хозяйства. В связи с этим проблемы повышения надежности машин и их элементов в эксплуатации, в частности, создание предпосылок для определения оптимальных (с экономической точки зрения) показателей качества изделий машиностроения при планировании мероприятий по повышению их работоспособности, являются одними из наиболее актуальных.

Цель работы. I. Разработка методики определения оптимальных величин единичных показателей надежности элементов, потребных для достижения планового уровня комплексных показателей надежности машин, в частности, карьерных экскаваторов.

2. Исследование в реальных условиях эксплуатации на карьерных экскаваторах возможности повышения эксплуатационной надежности тяжело нагруженных подшипников скольжения при использовании в них деталей из нового полимерного материала - полиамида КПС-30 Г5.

Задачи исследования. I. Выбрав машины для исследования, установить влияние нагрузочных режимов и качества изготовления на закономерности распределения отказов их элементов.

2. Вывести зависимости для определения оптимальных показателей надежности исследуемых деталей и сборочных единиц.

3. Разработать рекомендации по практическому достижению этих показателей в рассматриваемых условиях эксплуатации.

Научная новизна. I. Предложен способ определения оптимальных величин средних наработок до отказа деталей и сборочных единиц, при которых достигается заданный уровень коэффициентов готовности и технического использования машины (парка машин).

2. Систематизирована динамика распределений наработки до отказа и их параметров от условия эксплуатации и качества изготовления изделий. Для распределений Вейбулла-Гнеденко, логарифмически нормального, гамма и Пуассона предложены номограммы зависимости параметров формы от среднего значения и среднего квадратического отклонения, по которым удобно при инженерных расчетах определять параметры оптимальных распределений наработок до отказа составных частей машин.

3. Установлена область применения для анализа надежности изделий машиностроения Длей-образных распределений Пирсона типа I. Предложена методика вычисления выравнивающих частот и показателей надежности для этих распределений при некоторых значениях их параметров.

4. Доказано, что эффективным способом повышения эксплуатационной надежности подшипников скольжения, работающих с пластичной смазкой при нагрузках до 5 МН/м^2 и скорости скольжения до $0,4 \text{ м/с}$, является применение в них деталей из полиамида КПС-30 Г5, изготовленных способом центробежного литья и армированных стальной арматурой.

Практическая ценность. Производственные испытания деталей из полиамида КПС-30 Г5 в тяжело нагруженных подшипниках скольжения экскаваторов доказали более высокую работоспособность полиамидных деталей по сравнению с аналогичными деталями из сплавов цветных металлов. Установлено увеличение долговечности стальных канатов, изготовленных с использованием твердой смазки-дисульфида молибдена - при эксплуатации их в подъемном и напорном механизмах карьерных экскаваторов.

Предложенная методика определения оптимальных показателей надежности составных частей машин позволяет планировать мероприятия по достижению требуемого уровня надежности в эксплуатации при минимальных затратах.

Реализация работы в промышленности. Организован участок для серийного производства полиамидных деталей на Соколовско-Сарбайском горно-обогатительном комбинате. Некоторые из них являются экспонатами ВДНХ СССР. Экономическая эффективность от внедрения полиамида КПС-30 Г5 для изготовления вкладышей седловых подшипников карьерных экскаваторов составила на предприятиях ССГОК 46,9 тысяч рублей в год; в масштабе предприятий Министерства черной металлургии СССР может достичь 400 тыс. рублей в год.

По материалам диссертации в НИИтяжмаш производственного объединения "Уралмаш" для предприятий Минтяжмаша разработан РТМ "Определение единичных показателей надежности деталей и сборочных единиц, необходимых для достижения планового уровня качества экскаваторов", от внедрения которого ожидается значительный экономический эффект.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены: I. На XXV, XXVI и XXIX научно-технических конференциях ЧПИ. Челябинск, 1972, 1975, 1976.

2. На Всесоюзной научно-технической конференции "Пластмассы и твердые смазки в тяжело нагруженных узлах трения машин". Челябинск, 1973.

3. На областной научно-технической конференции "Наука - производству". Рудный, 1973.

4. На 2-ом семинаре по надежности Башкирского филиала АН СССР. Уфа, 1974.

5. На областных семинарах по надежности и семинарах комитета по качеству промышленной продукции. Челябинск, 1972-1974.

6. На XXXII научно-технической конференции Магнитогорского горно-металлургического института им. Г. И. Носова. Магнитогорск, 1975.

7. На областной конференции "Разработка актуальных проблем науки и производства в вузах области". Кустанай, 1975.

8. На Всесоюзной научно-технической конференции "Методы повышения надежности механических систем и их стандартизация". Смоленск, 1976.

9. На заседании секции надежности НТС НАТИ. Москва, октябрь, 1977.

10. На НТС НИИтяжмаш производственного объединения "Уралмаш". Свердловск, ноябрь 1977.

II. На заседании технического совета и совета НТО производственного объединения "Ижорский завод" им. А. А. Жданова. Ленинград, январь 1978.

Публикация. Основное содержание работы опубликовано в 9 статьях.

Объем работы. Диссертация изложена на 110 страницах машинописного текста и содержит пять глав с 32 таблицами в тексте, 31 рисунок, список литературы и приложение.

ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве механических систем при исследовании были выбраны однокорпусные карьерные экскаваторы циклического действия ЭКГ-8, ЭКГ-8и и ЭКГ-6,3 ус, эксплуатировавшиеся в условиях добычи железной руды и разработки скальных пород на предприятиях Соколовско-Сарбайского орденов Октябрьской революции и Трудового Красного Знамени горно-обогатительного комбината им. В. И. Ленина. Повышение эксплуатационной надежности этих машин является актуальной проблемой для народного хозяйства нашей страны. В частности, на предприятиях СТОК экскаваторы указанных моделей являются основными технологическими орудиями труда на операциях по добыче полезных ископаемых, в то же время неплановые простои их по причине отказов различных деталей и сборочных единиц значительны.

Анализ данных об отказах всех механизмов экскаваторов позволил выделить элементы, отказы которых преобладали в общем потоке

отказов, вызывали наибольшее количество unplanned простоев и затрат на восстановление работоспособности машин. Ими явились седловые подшипники экскаваторов ЭКГ-8И и ЭКГ-6,3 ус, канаты подъемного механизма (у всех рассматриваемых моделей экскаваторов) и фрикционные муфты напорного механизма экскаваторов ЭКГ-8, доля отказов которых составила соответственно 28%, 13,56%, 11,97%.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ И ФРИКЦИОННЫХ МУФТ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРАХ

Экскаваторы при исследовании были разделены на две группы сообразно условиям работы (режимам нагружения). В одну из них вошли машины, работавшие на добыче железной руды и разработке скальных пород (разработка пород IV-V категорий трудности), в другую экскаваторы, работавшие на переработке рыхлой вскрыши (разработка пород I-II категорий). Вкладыши седловых подшипников и фрикционные муфты напорного механизма на протяжении всего периода наблюдения (6 лет) с целью сокращения простоев экскаваторов при выполнении ремонтов заменялись обезличенно из оборотного фонда. Поэтому эти объекты при исследовании условно рассматривались как невосстанавливаемые по плану наблюдений $[N, R, T]$. В таблице I представлены виды распределений наработки до отказа названных объектов. Наблюдения показали, что отказы седловых подшипников вызывались низкой износостойкостью вкладышей с накладками из латуни ЛМцС 58-2-2, изготовленными в условиях ремонтного производства. Выяснено, что наработка до отказа каждого вкладыша в отдельности ввиду процесса изнашивания накладки, отвечающего схеме накапливающихся повреждений, описывались гамма-распределением. Поэтому наработка между отказами седловых подшипников при условии замены вкладышей комплектами из 2 и 4 штук поочередно была аппроксимирована распределением Вейбулла-Гнеденко. Таким же распределением описана наработка до отказа канатов подъемного механизма, одной из главных причин разрыва которых явился износ проволок наружного слоя. Анализ процессов, приводящих к отказам фрикционных муфт, в обоих рассматриваемых случаях нагружения показал, что периоды наработки до отказа этих объектов, можно представить состоящими из 4 зон (рис. I): зоны наработки муфт, отказы которых являются внезапными; зоны наработки муфт, отказы которых с одинаковой вероятностью могут проявляться как внезапные и износные; зоны наработки муфт,

Таблица I

Наименование объектов исследования	Объем вы- борочной совокупнос- ти (число наблде- ний)	Вероятность Р то, что ошибка определения параметров не превы- сит величины ϵ		Средняя нара- ботка до от- каза, ч (тис. м ³ горной массы)	Вид распреде- ления пара- метров до отказа	Отношение Рома- новского при про- верке схожести эмпирического и теоретического распределе- ния
		Р	ϵ			
Седловые подшипники экска- ваторов ЭКГ-8и и ЭКГ-6,3ус с вкладышами из латуни ЛМС 58-2-2, изготовленны- ми при ремонте	$\frac{52^x}{158}$	$\frac{0,850}{0,950}$	$\frac{0,10^x}{0,08}$	$\frac{1959,2^x}{1876,5}$ ч	Распределение Вей- булла-Гнеденко с параметрами $b = 1,9$ $b = 1,8$	$\frac{0,57^x}{2,43}$
	46	0,800	0,10	4085,2 ч	Нормальное распре- деление с парамет- ром $G = 4,181$	0,37
Канаты подъемного меха- низма экскаваторов ЭКГ-8и и ЭКГ-6,3 ус (диаметр канатов 45,5 мм, ГОСТ 7669-69)	$\frac{67}{308}$	$\frac{0,500}{0,965}$	$\frac{0,10}{0,06}$	$\frac{526,7^x}{393}$ тыс.м ³	Распределение Вейбулла-Гне- денко с пара- метрами $b = 2,5$ $b = 2,1$	$\frac{2,27}{1,5}$
	86 175	$\frac{0,940}{0,992}$	$\frac{0,10}{0,10}$	$\frac{927,7}{800}$ ч	Распределение Пирсона вида I, с параметра- ми $q_1 = -0,665$ $q_2 = 0,881$ $q_1 = -0,649$ $q_2 = 2,446$	$\frac{0,86}{1,95}$

х) В числителе - на разработке пород I-II категорий, в знаменателе - III-у категории

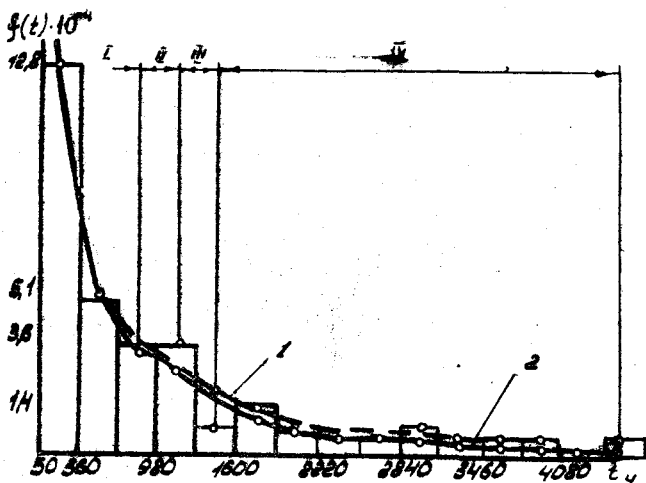


Рис. 1. Распределение наработки до отказа
фрикционных муфт напорного механизма:
1 - при разработке пород IV-V категорий;
2 - при разработке пород I-II категорий

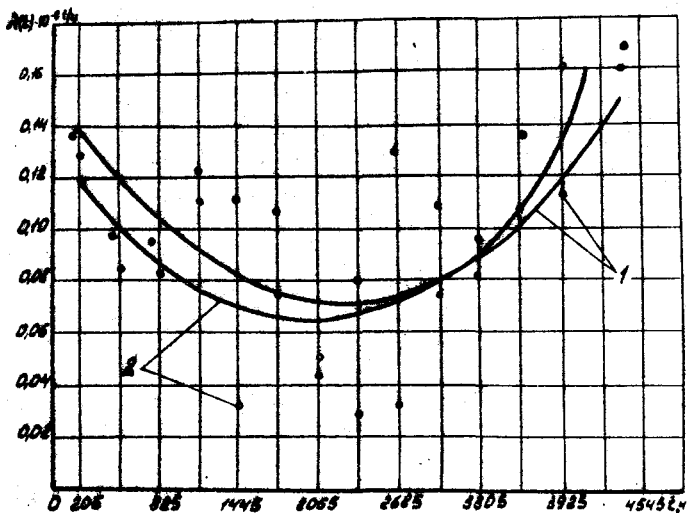


Рис. 2. Интенсивность отказов фрикционных муфт:
1 - при разработке пород IV-V категорий;
2 - при разработке пород I-II категорий

в которых вероятность возникновения износных отказов больше, чем внезапных; зоны наработки муфт, в которых износные отказы являются преобладающими (I, II, III, IV соответственно). Характерной является зона II, где распределение приближается к равномерному. В течение наработки, соответствующей этой зоне, в ряде муфт одинакова вероятность возникновения внезапных отказов, вызванных срывом тормозной ленты с колдочек фрикциона, и износных, вызванных износом латунной втулки подшипника скольжения. Указанное обстоятельство приводит к сохранению постоянного числа отказавших муфт на протяжении разрядных интервалов, соответствующих зоне II. В отдельных муфтах наблюдается совместное проявление внезапных и износных отказов. Эти отказы, постоянно преобладающие в зонах II и III, предложено называть композиционными. В зоне I отказы вызываются срывом тормозной ленты и поломкой пружин, в зоне IV - отказы преимущественно износные, вызванные износом втулки подшипника скольжения и шлицевого соединения. Таким образом, горизонтальный участок на эмпирической кривой распределения в зоне II (рис. 1) вызван не случайной вариацией числа отказов, а отражает объективную закономерность возникновения отказов муфт в этот период. Поэтому для выравнивания эмпирического распределения было выбрано "изогнутое" Джей-образное распределение Пирсона типа I, единственное из теоретических распределений, имеющее участок, соответствующий зоне II. Очевидно, что "изогнутая" кривая вида I_3 наиболее достоверно описывает наработку сложных изделий, природа отказов элементов которых аналогична указанной.

В соответствии с критериями ограничения продолжительности эксплуатации, режимом использования и доминирующим фактором при оценке последствий отказа для анализа эксплуатационной надежности в качестве нормируемых показателей приняты $P(\bar{t}_{cp})$ для фрикционных муфт, T_0 для вкладышей седловых подшипников и канатов подъемного механизма, $K_{ти}$ - для экскаваторов в целом.

Для определения вероятности безотказной работы в случае распределения наработки изделия машиностроения под Джей-образной кривой Пирсона типа I предложена следующая приближенная формула:

$$P(x) = 1 - \alpha \left[\frac{(x-l_1)^{q_1+1}}{q_1+1} - \frac{q_2(x-l_1)^{q_1+2}}{(q_1+2)l} + \frac{q_2(q_2-1)(x-l_1)^{q_1+3}}{(q_1+3)l^2} \right], \quad (1)$$

где

$$\alpha = \frac{\Gamma(q_1 + q_2 + 2)}{\Gamma(q_1 + 1) \Gamma(q_2 + 1)} l^{q_2}; \quad (2)$$

x - отклонение случайной величины от ее наиболее частого значения, выраженное в единицах разряда (в условных единицах);

q_1, q_2 - показатели, вычисленные при помощи статистик вариационного ряда распределения наработки до отказа;

$l = l_1 + l_2$ - размах распределения.

Максимальная ошибка, допущенная при расчетах вероятности безотказной работы муфт по формуле (1), на протяжении первых 1000 ч не превышала 10%. Вычисленные по зависимости (1) значения вероятности безотказной работы, соответствующей средней наработке до отказа, $P(t_{ср})$, составили 0,313 и 0,366 на разработке пород IV-У и I-П категорий соответственно.

Эмпирическая зависимость интенсивности отказов в функции от времени наработки описывается параболой (рис. 2), выражаемой уравнением:

$$\lambda(t) = At^2 - Bt + C. \quad (3)$$

Коэффициенты A, B, C вычислены методом наименьших квадратов на ЭВМ. Таким образом, для определения интенсивности отказов исследуемых фрикционных муфт (и других изделий), распределение наработки до отказа которых описывается кривой Пирсона вида I_j , предложена следующая зависимость:

а) при $q_1 = -0,649$, $q_2 = 2,446$ и других значениях показателей, отличающихся от указанных в пределах $\pm 3\%$,

$$\lambda(t) = 0,184 \cdot 10^{-9} t^2 - 7,785 \cdot 10^{-7} t + 0,155 \cdot 10^{-2} \quad 1/4; \quad (4)$$

б) при $q_1 = -0,665$, $q_2 = 0,881$ и других показателях, отличающихся от указанных в пределах $\pm 3\%$,

$$\lambda(t) = 0,178 \cdot 10^{-9} t^2 - 6,745 \cdot 10^{-7} t + 0,129 \cdot 10^{-2} \quad 1/4. \quad (5)$$

Справедливость аппроксимации графических зависимостей параболой подтверждается тем, что левая ветвь каждой из рассматриваемых кривых (при наработке порядка 2100 ч на разработке пород IV-У и 1900 ч I-П категорий) приближается к суперпозиции экспоненциальных законов распределения, а правая ветвь - суперпозиции экспоненциального и нормального распределений, что соответствует природе отказов фрикционных муфт на протяжении наработки, соответствующей I-IV зонам (рис. 1).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕДИНИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
ЭЛЕМЕНТОВ, ПОТРЕБНЫХ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПЛАНОВОГО
УРОВНЯ КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
СИСТЕМЫ**

**1. Определение оптимальных величин средней наработки
элементов**

Для научно обоснованного планирования мероприятий, направленных на повышение эксплуатационной надежности рассматриваемых механических систем, возникла необходимость выяснить, какими величинам должны соответствовать единичные показатели надежности выделенных слабых элементов, чтобы комплексные показатели надежности системы достигли планового уровня при минимальных затратах. Для ответа на этот вопрос поставлены и решены следующие задачи.

1. В результате испытаний известна наработка на отказ системы по интересующему нас X -му элементу (или элементам X -ой группы), отказавшим за рассматриваемый период эксплуатации, T_{01x} , при этом коэффициенты готовности и технического использования системы с учетом отказов X -го и всех прочих элементов, отказавших за этот период, составили соответственно $K_{г1}$, или $K_{т.и1}$. Требуется определить, при каком минимальном значении средней наработки X -го элемента T_{02x} комплексные показатели стабильно достигнут плановых величин $K_{г2}$ или $K_{т.и2}$ с учетом изменения суммарной наработки и соответственно числа отказов X -го и всех прочих элементов.

2. Требуется определить уровень качества X -го элемента, при котором среднее значение наработки до отказа стабильно достигнет требуемого значения T_{02x} , то есть установить с учетом физической природы отказов вид и параметры того теоретического распределения, которым для рассматриваемых условий эксплуатации должна описываться наработка X -го элемента, чтобы среднее значение ее достигло требуемой величины T_{02x} при заданном G .

Для решения первой задачи в случае, когда комплексным показателем эксплуатационной надежности системы задан коэффициент готовности, выведена зависимость

$$K_{г} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n p_i} \quad (6)$$

где $K_{г}$ - плановый коэффициент готовности системы,

$$\rho_i = \frac{T_{bi}}{T_{oi}} \quad (7)$$

T_{bi} - среднее время восстановления системы с учетом простоев на отыскание и устранение m отказов i -го элемента (или элементов i -й группы).

$$T_{bi} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{bi} \quad ; \quad (8)$$

t_{bi} - время на нахождение и устранение отказов i -го элемента (или элементов i -й группы);

T_{oi} - наработка системы на отказ с учетом отказов только i -го элемента (или элемента i -й группы) при условии независимости отказов рассматриваемых элементов;

Γ - число элементов или их групп, отказавших за рассматриваемый период эксплуатации.

В случае, когда из формулы (I) требуется определить величины средних наработок до отказа одновременно Γ -го числа элементов при условии минимальных затрат на достижение K_Γ , поступим следующим образом. Обозначим C_i - плановую стоимость устранения отказа (или замены) i -го элемента, руб;

x_i - число условных отказов i -го элемента, при котором достигается плановое значение K_Γ и $K_{T,и}$. Тогда в качестве целевой функции выберем выражение минимальных затрат на обеспечение T_{oi} , соответствующее $K_{\Gamma,2}$, то есть

$$\min Z(x_i) = \sum_{i=1}^{\Gamma} C_i x_i \quad , \quad (9)$$

где

$$x_i = \frac{t_c}{T_{oi}}$$

Одно из ограничений на переменные найдем из формулы (6).

$$\sum_{i=1}^{\Gamma} \rho_i = \frac{1}{K_\Gamma} - 1 = D; \quad \sum_{i=1}^{\Gamma} \rho_i = \sum_{i=1}^{\Gamma} \frac{T_{bi}}{t_c} x_i = \frac{1}{t_c} \sum_{i=1}^{\Gamma} T_{bi} x_i \quad , \quad (10-II)$$

где t_c - период, на который планируется K_Γ .

$$\sum_{i=1}^{\Gamma} \rho_i = \frac{1}{t_c} \sum_{i=1}^{\Gamma} T_{bi} x_i = D; \quad \sum_{i=1}^{\Gamma} T_{bi} x_i = t \cdot D = b_0 \quad , \quad (12)$$

где

$$b_0 = t \cdot D = \text{Const} \quad . \quad (13)$$

Остальные ограничения запишутся следующим образом:

$$0 < x_i \leq \frac{t_c}{T_{02i}} \quad (i=1, 2, \dots, r). \quad (14)$$

В общем случае $r = n$, где n - число элементов рассматриваемой системы. Если из n отказавших элементов рассматриваются только r составляющих, то в знаменателе формулы (6) добавится постоянная $C = \sum_{i=1}^{n-r} p_i$ при условии, что отказы $n-r$ элементов крайне незначительно влияют на величину K_r .

Уравнение (9) с ограничениями (12-14) представляет математическую модель задачи линейного программирования со смешанными ограничениями, которая путем известных в математике искусственных преобразований решается симплекс-методом.

В случае, когда нормируемым показателем эксплуатационной надежности системы задан $K_{тн}$, получим

$$K_{тн} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^r p_i + \frac{t_{одсн}}{t_{сум}}}, \quad (15)$$

где $t_{одсн}$ и $t_{сум}$ - соответственно время, затраченное на техническое обслуживание и суммарная наработка системы (или N систем) за рассматриваемый период эксплуатации.

Целевая функция и ограничения на переменные определяются в этом случае аналогично (9-14).

При определении средней наработки одного элемента:

$$K_{тн2} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{r-1} p_i + p_{2x} + \frac{t_{одсн}}{t_{сум} [1 + (p_{1x} - p_{2x})(1 - \sum_{i=1}^{r-1} p_i)]}} \quad (16)$$

Для решения второй задачи следует известное свойство распределений случайных величин изменять форму в зависимости от значения некоторых параметров увязать функционально с изменением средней наработки, выразив эту зависимость для удобства практического пользования графически. В свою очередь для определения уровня качества при конкретных условиях эксплуатации, потребного для достижения величины T_{02i} , необходимо исследовать закономерность изменения видов распределений и их параметров от качества изготовления и условий эксплуатации изделий. В качестве критериев, определяющих уровень качест-

ма или режим эксплуатации, целесообразно принять комплекс показателей – среднюю наработку до отказа и среднее квадратическое отклонение.

2. Деформирование кривых плотности распределения наработки изделий в зависимости от режимов нагружения и качества изготовления

Как видно из таблицы I, с форсированием режима нагружения или ухудшением качества изготовления изделий уменьшается среднее значение наработки до отказа. Мода и медиана наработки смещаются к оси ординат, кривая плотности распределения изменяет свою форму – деформируется.

С физической точки зрения это обстоятельство объясняется увеличением числа отказов наиболее слабых элементов сложного изделия в первоначальный период эксплуатации. Естественно предположение о том, что если при благоприятном режиме нагружения наработка до отказа изделия оптимального для конкретных условий эксплуатации качества будет распределена по нормальному закону или близкому к нему, то при переходе к неблагоприятным условиям работы (увеличении величины или динамичности нагрузки) или ухудшении качества кривая распределения будет деформироваться, постепенно изменяя свою форму от соответствующей нормальному закону к кривым распределений гамма и Вейбулла-Гнеденко и далее к экспоненте, а в наиболее неблагоприятных случаях к Джей-образным кривым Пирсона типа I.

Справедливость предположения о наличии такой закономерности подтверждена данными других исследований.

В качестве математических моделей деформирования рассмотрены распределения Вейбулла-Гнеденко, логарифмически нормальное, гамма-распределение и распределение Пуассона, так как параметры формы этих распределений зависят от среднего значения описываемой ими случайной величины. Это обстоятельство позволяет получить системы кривых плотностей распределения наработки до отказа (между отказами) согласно условиям эксплуатации или показателям качества изделий (рис. 3, 4).

3. Определение параметров оптимальных распределений

Для определения вида и параметров распределения, при котором с учетом физической природы отказов и условий эксплуатации будет обеспечена расчетная величина средней наработки элемента, вычисленной по формулам (9-14) или (15-16), следует на номограмме, отражающей

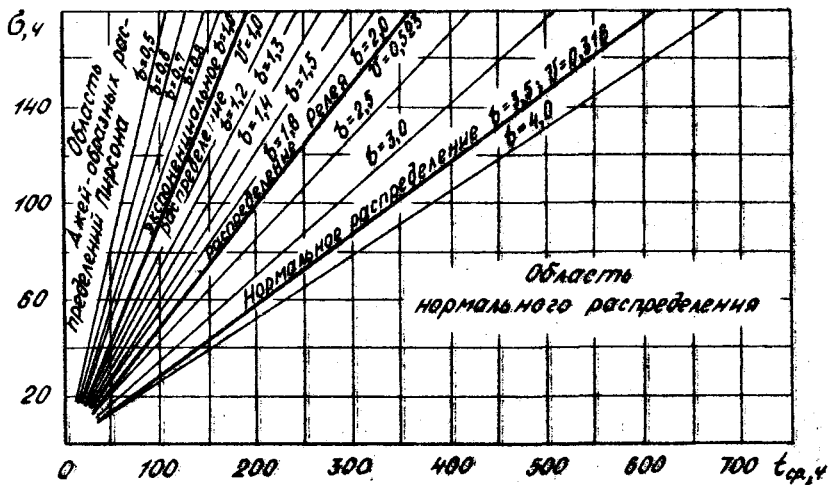


Рис. 3. Номограмма деформирования распределения Вейбулла-Гнеденко

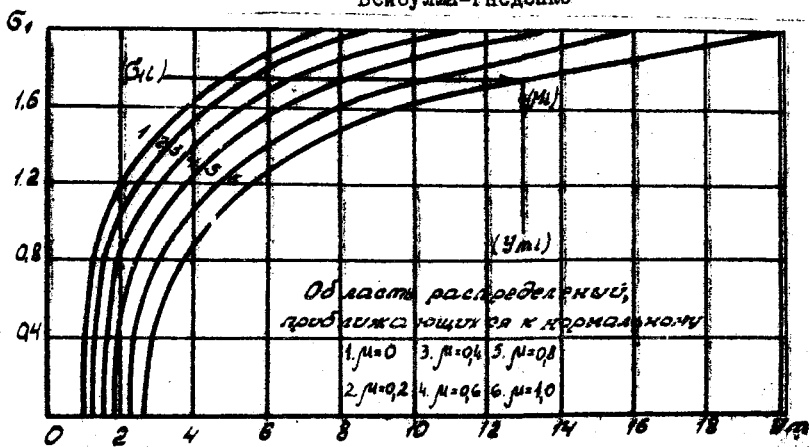


Рис. 4. Номограмма деформирования логарифмически нормального распределения

0329798

щей деформирование распределения конкретного вида, определить зону, в которую с заданной доверительной вероятностью α попадает точка, соответствующая отношению T_{02i} к $t_{ср}$ номограммы равным I при заданном σ . Распределение, отвечающее указанным условиям для исследуемого элемента, будет оптимальным с точки зрения обеспечения плановых значений K_r и $K_{т.и}$ машины (или парка машин) при условии независимости параметров распределений, описывающих наработку остальных элементов, от параметров распределения рассматриваемого элемента.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ

Расчеты, выполненные по зависимости (16) с учетом простоев по технологическим причинам, показали, что для достижения плановых в среднем по всем видам работ (по данным на 1977 год) коэффициентов использования экскаваторов ЭКГ-8 в пределах 0,66 и экскаваторов ЭКГ-8и в пределах 0,68 следует довести среднюю наработку фрикционных муфт и седловых подшипников соответственно до 2700 ч и 2850 ч при условии неизменности средней наработки остальных элементов. Согласно номограммы на рис. 3 для достижения такой величины T_0 и σ , не превышающего ранее наблюдавшегося значения $(2,3-2,9) \cdot 360$ ч, качество этих элементов должно соответствовать уровню, при котором наработка до отказа будет описываться распределением, близким к нормальному. В этом случае интенсивность изнашивания при условии предельного (принятого в эксплуатации) износа втулок 4 мм и вкладышей 6 мм должна соответствовать $(1,4-2,8) \cdot 10^{-9}$ вместо ранее наблюдавшейся 10^{-8} . Поскольку конструкция исследуемых пар трения допускает попадание в них абразивных частиц, предложено в качестве материала для изготовления быстроизнашивающихся втулок подшипников скольжения фрикционных муфт и вкладышей седловых подшипников взамен латуни ЛМцС 58-2-2 использовать новый полимерный материал - полиамид КПС-30 Г5, который по своим механическим характеристикам соответствует условиям работы этих деталей. Указанный материал разработан на предприятиях ССГОК сотрудниками кафедры "Детали машин и ПТМ" Челябинского политехнического института совместно с отделом главного механика комбината и Северодонецким заводом стеклопластиков, и представляет собой композицию поликапролактама - Б первичного, 30% стекловолокна и 5% графита. Экспериментальные втулки и вкладыши были изготовлены способом центробежного литья в специально сконструированные формы.

Как показали производственные испытания, интенсивность из-

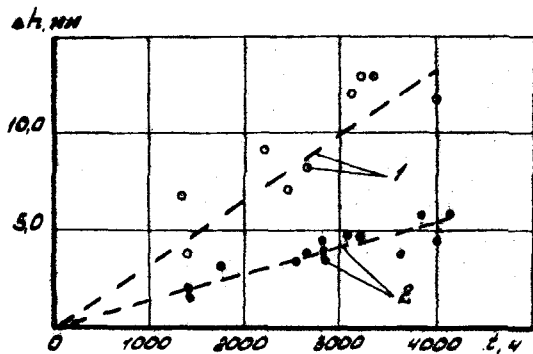


Рис. 5. Износ вкладышей седловых подшипников:

1 - из латуни ЛМц58-2-2;

2 - из полиамида КПС-30 Г5

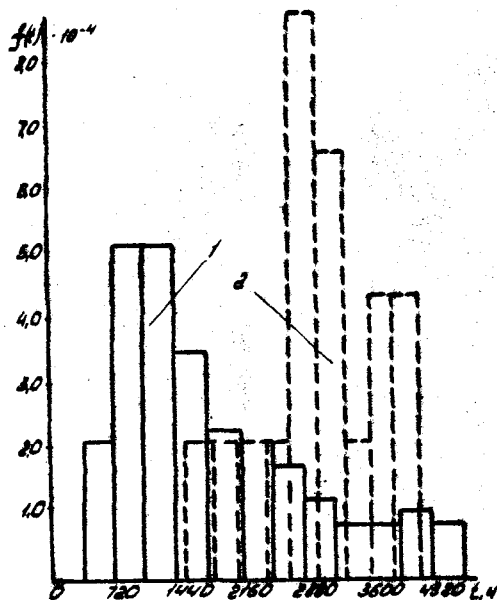


Рис. 6. Распределение наработки между отказами седловых подшипников с вкладышами из латуни ЛМц 58-2-2 и экспериментальными полиамидными (1 и 2 соответственно)

нашивания полиамидных втулок при расчетном удельном давлении $0,89 \text{ МН/м}^2$ и скорости скольжения до $0,147 \text{ м/с}$ оказалась в 3 раза меньше, чем втулок из латуни ЛМцС 58-2-2. Это и ряд других мероприятий позволили практически полностью устранить внезапные отказы в зонах I и II (рис. 1) и принципиально изменить распределение наработки до отказа от Дрей-образного распределения Пирсона типа I на приближающееся к нормальному. Средняя наработка при этом увеличилась более, чем в 3 раза; $P(t)$ оказалась близка к I на протяжении первых 1000 ч эксплуатации. Вкладыши седловых подшипников изготовляли из полиамида совместно с основанием; для увеличения прочности при восприятии ударных нагрузок со стороны рукоятки они были армированы стальной арматурой. Интенсивность изнашивания экспериментальных полиамидных вкладышей при расчетном удельном давлении до 5 МН/м^2 и скорости скольжения $0,41 \text{ м/с}$ оказалась в 2,1-2,4 раза меньше аналогичного показателя вкладышей с накладками из латуни ЛМцС 58-2-2 на стальном основании (рис. 5). По данным эксплуатации наработка на отказ 15 экспериментальных седловых подшипников повысилась в 1,5-1,6 раза по сравнению с наблюдавшейся на 1969-1974 годы. При этом распределение наработки между отказами изменилось от распределения Вейбулла-Гнеденко в близкое к нормальному (рис. 6). Это подтвердило правильность ранее сделанных теоретических предположений. $P(t)$ практически достигнута 1,0 на протяжении первых 1500 ч эксплуатации. Масса вкладышей снизилась с 65 кг до 12 кг.

Увеличением максимальной наработки в 1,15-1,88 раза (по отношению к наработке серийных канатов) характеризовались результаты первых производственных испытаний экспериментальных стальных канатов, изготовленных с применением твердой смазки, при эксплуатации в подъемном и напорном механизмах экскаваторов ЭКГ-Би.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследование позволило выявить наименее надежные элементы рассматриваемых механических систем, установить закономерности возникновения их отказов, динамику распределений наработки от условий эксплуатации и качества изготовления, разработать методику оптимизации показателей надежности составных частей машин и на основе расчетов, выполненных по этой методике, обеспечить заданный уровень качества исследуемых экскаваторов.

2. Предложенная методика определения оптимальных показателей надежности компонентов механических систем позволяет с учетом мини-

мальных затрат планировать мероприятия, направленные на достижение требуемого уровня качества составных частей машин.

3. С помощью этой методики установлено, что для достижения плановых величин коэффициентов использования исследуемых экскаваторов в пределах 0,68-0,66 единичные показатели надежности седловых подшипников должны соответствовать нормальному распределению наработки между отказами со средним значением не менее 2850 ч при среднем времени восстановления 17,7 ч, а фрикционных муфт напорного механизма - нормальному распределению со средним значением не менее 2700 ч при среднем времени восстановления 2,2 ч.

4. Эффективным способом достижения такого уровня качества явилось использование в седловых подшипниках и подшипниках скольжения фрикционных муфт деталей из нового полимерного материала - полиамида КПС-30 Г5, изготовленных способом центробежного литья и армированных стальной арматурой. В частности, средняя наработка экспериментальных полиамидных деталей превысила в 1,5-3,0 раза наработку аналогичных деталей из латуни ЛМцС 58-2-2, изготовленных и эксплуатируемых в одинаковых условиях.

5. Экспериментальные исследования работоспособности полиамидных деталей в условиях рядовой эксплуатации на карьерных экскаваторах позволяют рекомендовать полиамид КПС-30 Г5 для изготовления деталей подшипников скольжения, работающих с пластичной смазкой при удельных нагрузках до 5 МН/м² и скорости скольжения до 0 м/с.

6. Применение деталей из полиамида КПС-30 Г5 привело к такому изменению распределений наработки между отказами исследуемых сборочных единиц, при которых были получены расчетные показатели их надежности. Это подтвердило справедливость теоретических разработок.

7. Установлено, что в отдельных случаях наработка до отказа сборочных единиц машин, исходя из физической природы отказов их элементов, может быть наиболее достоверно описана Джей-образным распределением Пирсона типа I, в частности, "изогнутым" Джей-образным распределением. Предложенные расчетные зависимости позволяют вычислять показатели надежности для некоторых из этих распределений с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах: I. КАРМАДОНОВ А.Ф., ЛЖОВЕЦКИЙ В.М., ХАНТЕМИРОВ С.Д.

О надежности узлов трения горных машин. - В сб. материалов областной научно-технической конференции "Наука-производству", Кустанай, 1973 .

2. КАРМАДОНОВ А.Ф., ЛЯХОВЕЦКИЙ В.М.
Надежность деталей опор скольжения горных машин. - В сб. научных трудов № 142 "Машиноведение", Челябинск, ЧПИ, 1974.
3. ЛЯХОВЕЦКИЙ В.М., ЯШКОВ Ю.К., ГОГЕЛЬ И.Б., ПОСТОВАЛОВ Г.Л.
Применение полимерных материалов для повышения надежности опор скольжения экскаваторов. - В сб. "Пластмассы и твердые смазки в тяжелонагруженных узлах трения машин" (материалы Всесоюзной научно-технической конференции), Челябинск, 1974.
4. КАРМАДОНОВ А.Ф., ЛЯХОВЕЦКИЙ В.М., КАНТЕМИРОВ С.Д.
Повышение эксплуатационной надежности узлов трения экскаваторов ЭКГ-8 и ЭКГ-8и. "Бюллетень" ЦНИИ информации и технико-экономических исследований черной металлургии, 1974, №9.
5. ЛЯХОВЕЦКИЙ В.М.
Исследование эксплуатационной надежности фрикционных муфт напорного механизма экскаваторов ЭКГ-8. - "Известия высших учебных заведений. Горный журнал", 1975, №7.
6. КАРМАДОНОВ А.Ф., ЛЯХОВЕЦКИЙ В.М.
Деформирование кривых распределения наработки изделий в зависимости от величины и характера загрузки. - В сб. "Надежность и контроль качества", 1976, №1.
7. КАРМАДОНОВ А.Ф., СТАЦЕНКО В.И., ЛЯХОВЕЦКИЙ В.М.
Анализ эксплуатационных показателей надежности оборудования металлургического производства. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Методы повышения надежности механических систем и их стандартизация", Смоленск, 1976.
8. ЛЯХОВЕЦКИЙ В.М., ЯШКОВ Ю.К., ГОГЕЛЬ И.Б., ПОСТОВАЛОВ Г.Л.
Эксплуатационная надежность седловых подшипников экскаваторов ЭКГ-8и и ЭКГ-6,3 ус. "Горный журнал", 1977, №5.
9. ЛЯХОВЕЦКИЙ В.М.
Применение Джей-образных кривых Пирсона при исследовании надежности изделий машиностроения. - В сб. научных трудов №194 "Машиноведение", Челябинск, ЧПИ, 1977.

Автор является участником ВДНХ СССР по теме: "Стеклонаполненный капрон - материал для тяжелонагруженных подшипников скольжения" (удостоверение № 50770).