

ВИБРОДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ НАСОСОВ

В.И.АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, профессор, alexvict@spmi.ru,
Санкт-Петербургский горный университет, Россия
ИРЖИ СОБОТА, профессор, jerzy.sobota@up.wroc.pl,
Университет природопользования, Вроцлав, Польша

Анализ работы систем гидротранспорта на горно-обогатительных комбинатах показывает высокую трудоемкость работ при эксплуатации оборудования, высокий гидроабразивный износ грунтовых насосов и трубопроводов, низкий рабочий ресурс насосов, высокую металлоемкость и энергоемкость гидротранспортных систем. Главной причиной недостаточной эффективности гидравлического транспорта является гидроабразивный износ рабочих колес применяемых грунтовых насосов, что вызывает нарастающий уровень вибрации насосов, снижение напорных характеристик, общего технического состояния гидротранспортной системы и как результат – низкий рабочий ресурс насосов, не превышающий 500 ч непрерывной работы. В статье показано, что в качестве критерия периода нормальной эксплуатации грунтовых насосов можно использовать коэффициент технического состояния, значение которого пропорционально относительному напору, развиваемому насосом, степени гидроабразивного износа рабочего колеса и общему времени непрерывной работы. Коэффициент технического состояния грунтового насоса может быть выражен в виде функции текущего расхода системы среднеквадратичного значения скорости вибрации, вызванной неравномерным износом рабочего колеса насоса. Результаты теоретических и экспериментальных исследований были использованы для разработки алгоритма и оборудования метода экспресс-диагностики и мониторинга грунтовых насосов гидротранспортных систем, по данным которых принимается решение о необходимости ремонта насосного оборудования.

Ключевые слова: гидротранспорт, грунтовый насос, техническое состояние, энергоемкость, гидроабразивный износ, экспресс-диагностика.

Введение. Проблема надежности гидротранспортных систем на горно-обогатительных предприятиях России в настоящее время одна из самых актуальных. Вопросы технического состояния технологического оборудования и повышения надежности являются предметом многих научно-исследовательских работ. На сегодняшний день сформированы несколько направлений исследований в области повышения надежности и оценки технического состояния оборудования систем гидротранспорта рудных хвостов. Примером может служить книга Г.Н.Сандлера по теории проектирования сложных систем с заданными показателями надежности [8]. В этом исследовании значительное место уделяется эксплуатации технологического оборудования горно-обогатительных комбинатов и фабрик. Представляет интерес книга И.Базовского, который ввел в практику определения надежности понятие «эффект смешивания» [7], что для гидротранспортных систем имеет весьма важное значение. Методы исследования количественных показателей надежности систем гидротранспорта изложены в работах Н.Н.Волошина и В.И.Гашиева [2]. В работе Т.В.Алексеевой и др. рассматриваются параметры, характеризующие надежность грунтовых насосов и методы оптимизации качества насосных установок [4]. В работе [5] непосредственно рассматриваются вопросы технического состояния грунтовых насосов и методы их диагностики и мониторинга.

Большой интерес представляет исследование параметров, определяемых гидроабразивным износом гидротранспортного оборудования и грунтовых насосов. Методы экспресс-диагностики грунтовых насосов гидротранспортных систем тесно связаны с изменениями технического состояния грунтовых насосов в процессе эксплуатации, что напрямую

зависит от степени и интенсивности гидроабразивного износа элементов насоса, в частности, рабочего колеса. Значительный вклад в изучение вопроса гидроабразивного износа внесли работы С.П.Турчанинова [5], который провел обширные исследования в лабораторных и промышленных условиях. Автор отмечает, что износ стенок трубопроводов и элементов насосов есть результат воздействия твердых частиц на стенки, ограничивающие поток гидросмеси, что приводит к истиранию поверхностей в результате трения и скольжения. Похожие модели гидроабразивного износа рассматривались в работах [1, 3, 6, 9-12].

Коэффициент технического состояния грунтового насоса. Существенным недостатком в работе насосного оборудования является его низкая надежность. По этой причине происходит до 80 % аварий и отказов оборудования, треть из которых приходится на грунтовые насосы. Результаты наблюдений за причинами отказов деталей грунтовых насосов на Алмалыкском ГМК приведены в табл.1.

Таблица 1

Причины отказов грунтовых насосов									
Места отказов	Отказы деталей и узлов грунтового насоса, %								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Износ деталей									
Передние крышки								•	•
Рабочее колесо								•	
Спиральный отвод									•
Задвижки								•	
Несовершенство конструкции узлов									
Слабые опорные узлы			•	•					
Несовершенство крепления рабочих колес		•							
Недостатки эксплуатации и контроля									
Недостаточная смазка подшипников	•								

Из данных табл.1 следует, что наиболее нагруженными элементами грунтового насоса, вероятность выхода из строя которых наиболее велика, являются его внутренние проточные части – рабочее колесо, корпус, передняя крышка, находящиеся в постоянном контакте с перекачиваемой средой. Анализ эксплуатации грунтовых насосов на обогатительных комбинатах и причин отказов позволяет сделать вывод, что из всех факторов, определяющих ресурс грунтовых насосов, наибольшее влияние оказывает гидроабразивный износ рабочего колеса.

Эксперименты и статистические данные показывают, что с увеличением гидроабразивного износа рабочего колеса появляются значительные динамические нагрузки, связанные с дисбалансом приводного вала из-за низкочастотных колебаний, воспринимаемых подшипниковыми узлами. Эти факторы приводят к снижению давления, создаваемого грунтовым насосом. Практика показывает, что при снижении рабочего давления до 0,75 от теоретического значения ($0,75H_{\text{теор}}$) насос требует капитального ремонта или полной замены.

Можно говорить о том, что на насосных станциях гидротранспорта не организована система оценки технического состояния грунтовых насосов. Рабочий ресурс элемента оборудования определяется заданным количеством часов наработки, по истечению которых данная деталь заменяется на аналогичную новую. Например, ресурс рабочих колес для различных условий эксплуатации грунтового насоса не превышает 780-900 ч непрерывной работы. Подобный подход в условиях постоянного изменения режимов работы насосных станций, вариаций объемов, концентрации и физико-механических характеристик транспортируемой среды, существенно влияющих на скорость гидроабразивного износа элементов грунтового насоса, является неточным и неэффективным. При определении режимов работы насосов техническое состояние их элементов не учитывается, в то время как точность

определения параметров работы насосного оборудования является залогом эффективного решения задачи по оптимизации параметров гидротранспорта пульпы и увеличения срока службы грунтовых насосов.

В связи с этим особое значение приобретают усилия, направленные на разработку надежных и достоверных методов определения режимов работы, в первую очередь, диагностирования и оперативного контроля технического состояния насосного оборудования.

Оценку технического состояния насосного оборудования целесообразно проводить методами параметрической диагностики, основанными на измерении гидродинамических параметров рабочего процесса грунтового насоса. Следует отметить, что большинство методов параметрической диагностики опирается на паспортные характеристики соответствующих агрегатов. Важным фактором является то, что характеристики получают при заводских испытаниях насосов на воде. Следовательно, при включении оборудования в работу по перекачке гидросмеси сразу будет получено отклонение основных гидравлических параметров от заводских показателей. В процессе эксплуатации характеристики агрегатов также могут меняться. Это может быть обусловлено многими факторами, основным из которых является гидроабразивный износ оборудования, что связано с особенностями перекачиваемой среды. Поэтому для оценки фактического состояния агрегата удобно ввести такое понятие как коэффициент технического состояния грунтового насоса.

Относительный напор грунтового насоса при его работе на гидросмеси равен H_h/H_w (здесь H_h – напор грунтового насоса при работе на пульпе; H_w – напор грунтового насоса при работе на воде). Согласно [6, 12] данное отношение можно представить в виде эмпирической зависимости

$$\frac{H_h}{H_w} = 1 - \frac{\rho_h - \rho_w}{\rho_h} \beta \alpha, \quad (1)$$

где ρ_w – плотность воды; ρ_h – плотность пульпы; β – коэффициент, учитывающий влияние размеров насоса на величину гидравлических потерь.

С увеличением числа Re отвода гидравлические потери снижаются; следует принимать при $Re > 1200000$ $\beta = 0,6$, при $Re < 1200000$ $\beta = 800/\sqrt{Re}$.

Коэффициент в формуле (1) определяется по формуле:

$$\alpha = 0,4 \frac{g H_w r_1^2}{u^2 r_{cp} D_r} \left[100 \left(\frac{r_2^3}{D_r r_{cp}} \sqrt{0,5} \right)^{-1,4} - 1 \right], \quad (2)$$

где r_1 – радиус рабочего колеса; r_{cp} – средний радиус отвода; D_r – гидравлический диаметр отвода в расчетном сечении; r_2 – внешний радиус отвода в рабочем сечении; u – окружная скорость рабочего колеса.

Фактически относительный напор можно рассматривать как гидромеханический коэффициент технического состояния проточной части грунтового насоса, учитывающий гидромеханические потери в рабочем колесе и отводе

$$k_{тсг} = 1 - \frac{\Delta p}{\rho_h} \beta \alpha, \quad (3)$$

Относительный напор грунтового насоса также можно выразить как:

$$\frac{H_h}{H_w} = \frac{Q_w}{Q_h} \frac{\eta_i}{\eta_w}. \quad (4)$$

Выражение (4) можно рассматривать в качестве механического коэффициента технического состояния грунтового насоса:

$$k_{\text{тсм}} = \frac{Q_w \eta_i}{Q_h \eta_w}. \quad (5)$$

Общая величина коэффициента технического состояния грунтового насоса будет равна произведению гидромеханического коэффициента технического состояния (3) и механического коэффициента технического состояния (5), т.е.

$$K_{\text{тс}} = k_{\text{тсм}} k_{\text{тсг}} = \frac{Q_w \eta_i}{Q_h \eta_w} \left(1 - \frac{\Delta p}{\rho_h} \beta \alpha \right). \quad (6)$$

Величина коэффициента технического состояния изменяется от единицы до некоторого минимального значения по мере наработки грунтового насоса. Максимальная величина $K_{\text{тс}}$ соответствует работе грунтового насоса на номинальных параметрах, соответствующих заводским характеристикам, полученным при испытаниях насоса в заводских условиях и указанных в технической документации на конкретный насос.

Коэффициент технического состояния является обобщенной характеристикой грунтового насоса и может быть принят в качестве критерия периода нормальной эксплуатации гидротранспортной системы. Значительное снижение величины $K_{\text{тс}}$ свидетельствует о механическом износе рабочих элементов грунтового насоса и увеличении гидромеханических потерь в рабочих каналах проточной части. На рис.1 представлена характерная зависимость коэффициента технического состояния $K_{\text{тс}}$ грунтового насоса ГрТ 8000/71 Качканарского ГОКа от времени наработки T с учетом проводимых ремонтов. Предельно допустимым значением коэффициента технического состояния грунтового насоса перед выводом его в ремонт принято 0,8.

Как видно из рис.1, зависимость $K_{\text{тс}}(T)$ явно не монотонная. После проведения очередного ремонта коэффициент технического состояния скачкообразно увеличивается. Однако полного восстановления не происходит.

Экспериментальные результаты. Экспериментальная установка показана на рис.2. Вибрационные характеристики грунтового насоса измерялись с помощью переносной диагностической системы Pruftechnik с использованием автономных датчиков Vibscanners. В табл.2 приведены основные результаты экспериментальных исследований грунтового насоса 5ГрТ-8, на рис.3 приведены графики изменения напора от подачи насоса.

В выражении (6) зависимость коэффициента технического состояния от скорости гидроабразивного изнашивания как основного параметра, влияющего на работоспособность грунтового насоса, определена неявно. Значение коэффициента технического состояния может быть также получено при известном напоре, развиваемом грунтовым насосом в заданный момент времени. В связи с тем, что транспортируемой средой является пульпа, определение напора стандартными приборами (манометрами) затруднено и может содержать недопустимые погрешности. В этом случае текущий напор может быть определен из экспериментально полученной зависимости:

$$H_T = H_0 - (k_{Q_0} + k_{\text{напор}}) T_{\text{раб}}, \quad (7)$$

где H_T – напор для произвольного момента времени; H_0 – напор насоса при нулевой подаче в начале эксплуатации; k_{Q_0} – угловой коэффициент при нулевой подаче насоса; $k_{\text{напор}}$ – коэффициент напора; $T_{\text{раб}}$ – время наработки;

$$k_{\text{напор}} = f(Q_{\text{насос}}) = k_{Q_0} - a Q_{\text{насос}}^m = 0,01 + 0,0369Q - 3,3962Q^2. \quad (8)$$

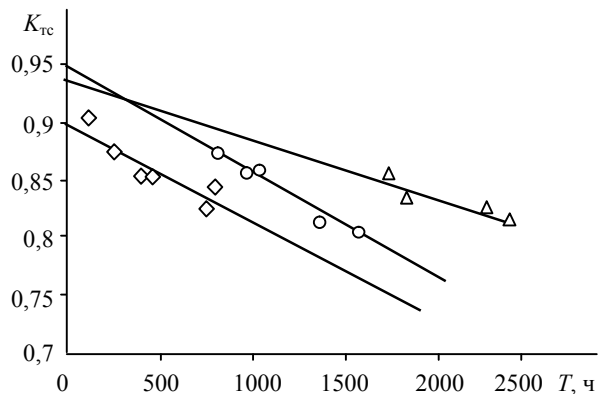


Рис.1. Диаграмма зависимости изменения коэффициента технического состояния $K_{\text{тс}}$ от времени наработки T в межремонтные периоды

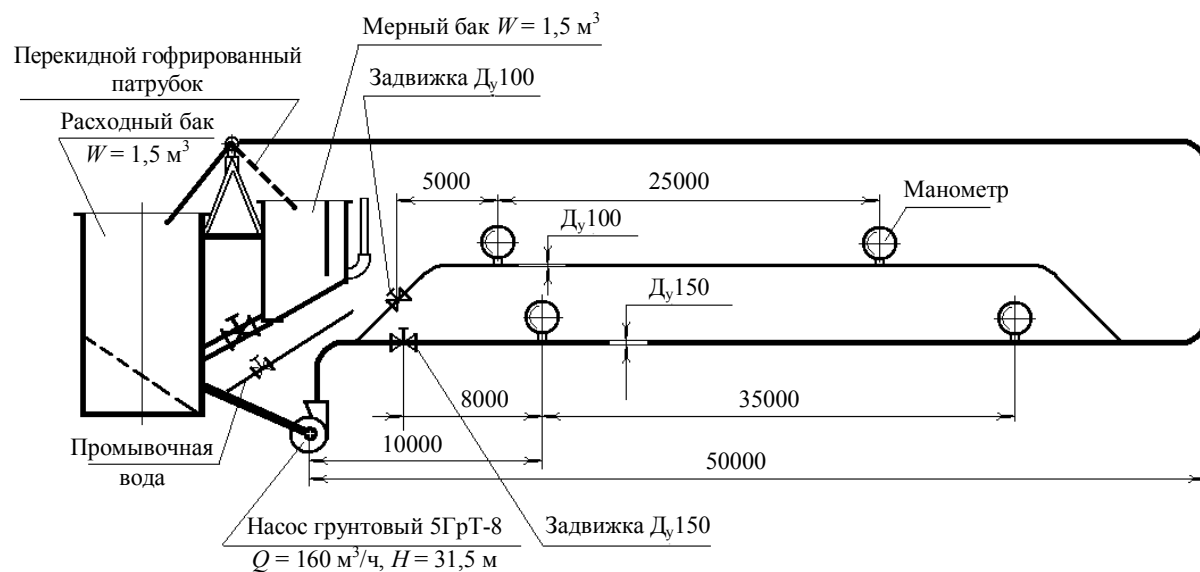


Рис.2. Схема экспериментальной гидротранспортной установки

Таблица 2

Экспериментальные данные

Подача, м³/с	Потери напора, м вод.ст/м	Напор насоса (м) по наработке, ч					Параметры вибрации	
		10	200	400	600	800	Нароботка, ч	Виброскорость, мм/с
0	0	32	30	28	26	24	200	2,29
0,0055	5	31,5	29,5	27,5	25,5	23,6		
0,011	12	30,8	28,7	26,9	24,9	23,1	400	4,3
0,017	21,3	29,6	27,7	25,9	24	22,2		
0,022	32	28,3	26,5	24,8	22,9	21,2	600	6,8
0,028	—	26,5	24,6	23	21,3	19,7		
0,034	—	24,1	22,6	21,1	19,5	18,1	800	9,55
0,039	—	20,8	19,5	18,2	16,8	15,6		
0,044	—	16,4	15,4	14,3	13,3	12,3		

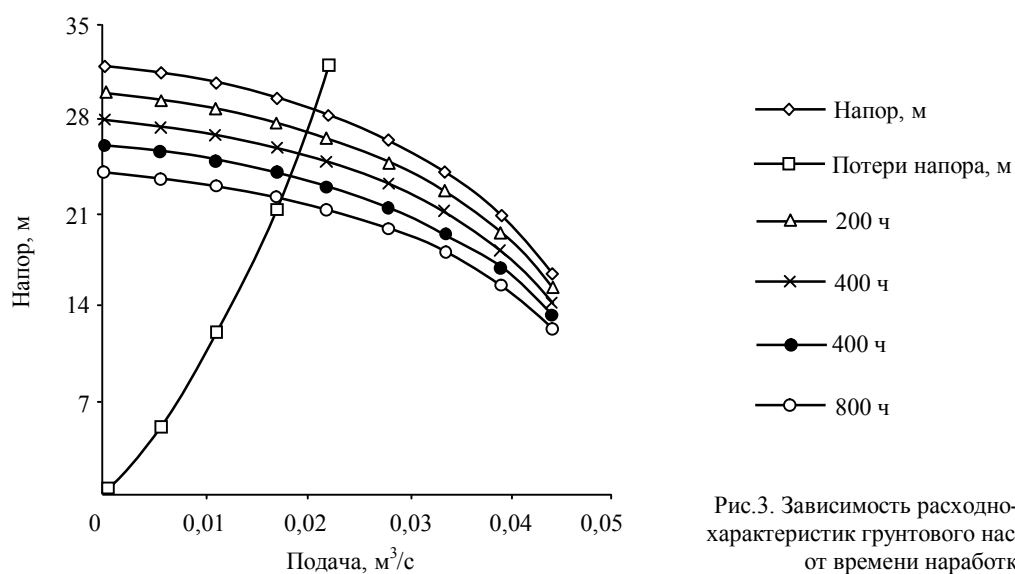


Рис.3. Зависимость расходно-напорных характеристик грунтового насоса 5ГрТ-8 от времени наработки

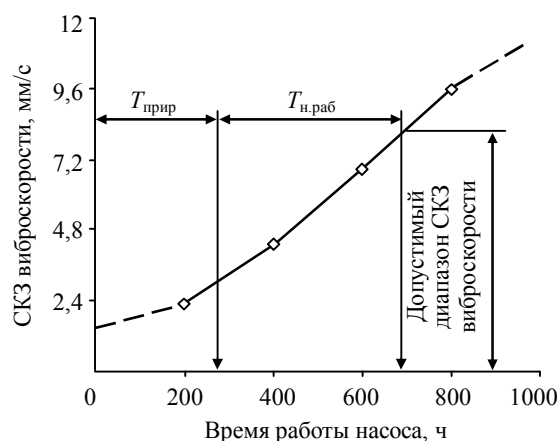


Рис.4. График зависимости СКЗ виброскорости от времени наработки насоса

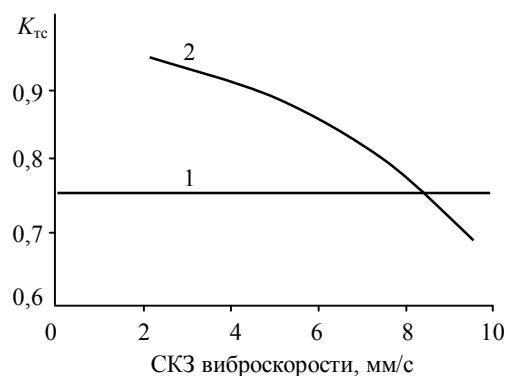


Рис.5. График зависимости коэффициента технического состояния от виброскорости корпуса насоса

1 – предельно допустимое значение; 2 – текущее

Отметим, что для заданных условий эксплуатации абсолютный гидроабразивный износ будет определяться только временем эксплуатации.

С увеличением времени наработки насоса возрастает потеря массы рабочего колеса, что, в свою очередь, приводит к увеличению параметров вибрации. Таким образом, можно считать, что изменение вибрационных характеристик определяется временем эксплуатации грунтового насоса.

Примем изменение среднеквадратичного значения виброскорости грунтового насоса в качестве основного диагностируемого параметра, характеризующего степень гидроабразивного износа агрегата. Удобство принятого решения состоит в том, что на сегодняшний день существует ряд приборов, позволяющих с высокой точностью в режиме реального времени измерять параметры вибрации насосного оборудования.

Для среднеквадратичного значения виброскорости можно написать функцию

$$\bar{V}_{\text{скз}} = f(T_{\text{нар}}). \quad (9)$$

На рис.4 показан график изменения среднеквадратичного значения (СКЗ) виброскорости грунтового насоса 5ГрТ-8 от времени наработки.

По результатам анализа экспериментальных данных получена зависимость

$$T_{\text{нар}} = 74 \cdot \bar{V}_{\text{скз}}^{1,1}. \quad (10)$$

Следовательно, коэффициент технического состояния грунтового насоса можно представить в виде

$$K_{\text{тс}} = \frac{32 - 74 \cdot \bar{V}_{\text{скз}}^{1,1} (-3,3962 Q_{\text{насос}}^2 + 0,0369 Q_{\text{насос}} + 0,02)}{H_{\text{в}}}. \quad (11)$$

В выражении (11) коэффициент технического состояния грунтового насоса выражен через текущее среднеквадратичное значение виброскорости.

По имеющимся данным построим график зависимости коэффициента технического состояния от виброскорости и времени наработки (рис.5).

Следует отметить, что зависимость $K_{\text{тс}}(T)$ может быть получена только на основании постоянного контроля параметров работы (в данном исследовании определяющим параметром принято среднеквадратичное значение виброскорости) конкретного грунтового насоса.

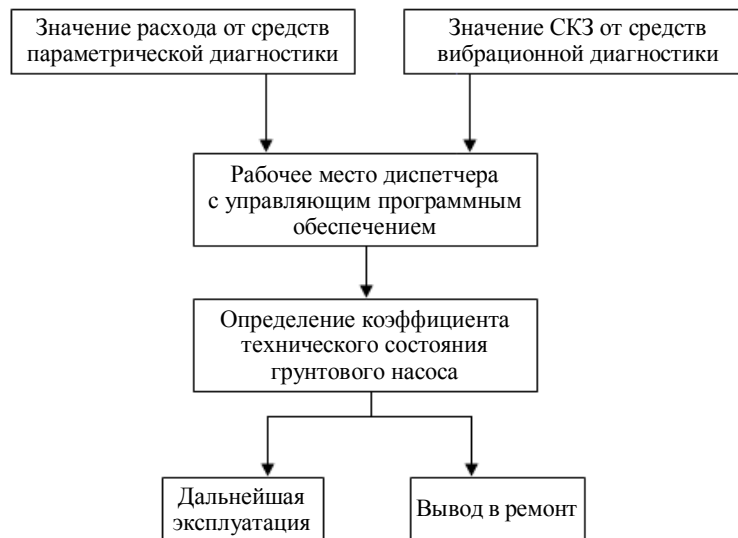


Рис.6. Общая структурная схема экспресс-диагностики насосных агрегатов



Рис.7. Интерфейс системы диагностики грунтовых насосов в режиме работы «Тренд»

В соответствии с формулой (11), полученной по результатам анализа и обработки экспериментальных данных по наработке грунтового насоса 5ГрТ-8, для определения текущего значения коэффициента технического состояния грунтового насоса на автоматизированное рабочее место диспетчера от систем параметрической и вибрационной диагностики должны поступать значения текущего расхода и среднеквадратического значения виброскорости. Встроенное программное обеспечение должно осуществлять обработку получаемых данных, сравнение с допустимыми значениями контролируемых параметров, информировать диспетчера о текущем состоянии насосного оборудования.

Общая структурная схема экспресс-диагностики насосных агрегатов приведена на рис.6.

Вибрационная диагностика и мониторинг грунтового насоса могут быть осуществлены на базе стационарной системы мониторинга оборудования.

Стационарная система вибромониторинга должна включать:

- распределенную систему датчиков, контролирующих основные параметры оборудования;
- распределенную систему выносных модулей, обеспечивающих первичное преобразование сигналов с датчиков и их трансляцию в диагностический контроллер, а также контроль за целостностью самих датчиков и линий связи;
- диагностическую станцию, обеспечивающую сбор, хранение, обработку данных, отображение результатов мониторинга;
- диагностическую сеть предприятия для предоставления на компьютерах пользователей (от персонала цеха до руководства предприятия) полной и своевременной информации о техническом состоянии оборудования.

Интерфейс системы (рис.7) должен предоставлять возможность вывода на монитор диспетчера текущих значений эксплуатационных параметров, полученных от средств диагностики, текущего расчетного значения коэффициента технического состояния грунтового насоса, полученного по формуле (11), заложенного в программный вычислительный комплекс системы, а также тренд изменения указанных параметров.

Выводы

1. Основным фактором, определяющим эффективность и надежность грунтовых насосов, является гидроабразивный износ, что приводит к потере массы рабочего колеса, увеличению параметров вибрации и снижению напора насоса.

2. Теоретически и экспериментально доказана зависимость срока службы грунтового насоса от параметров вибрации и показано, что рабочий ресурс насоса является степенной функцией от заданного значения СКЗ скорости вибрации.

3. Коэффициент технического состояния грунтового насоса (относительный расход) может быть принят в качестве критерия для оценки периода нормальной эксплуатации насоса, величина которого изменяется в пределах от 1 до 0,75.

4. Коэффициент технического состояния грунтового насоса как критерий периода нормальной эксплуатации является функцией СКЗ виброскорости и подачи насоса.

5. Разработан алгоритм диагностирования и экспресс-метод оценки рабочего состояния грунтового насоса в системе гидротранспорта по величине коэффициента технического состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.И. Коэффициент технического состояния грунтового насоса / В.И.Александров, С.С.Меньшиков // Естественные и технические науки. 2014. № 4. С.66-71.
2. Волошин Н.Н. Надежность технологических установок на обогатительных предприятиях / Н.Н.Волошин, В.И.Гашиев. М.: Недра, 1974. 136 с.
3. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. М.: Недра, 1980. 293 с.
4. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т.В.Алексеева, В.Д.Бабанская, Т.М.Башта и др. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
5. Турчанинов С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1971. 240 с.
6. Dube N.B., Hutchings I.M. Influence of particle fracture in the high-stress and low-stress abrasive wear of steel // Wear. 1999. Vol.233-235. P.246-256.
7. Bazovsky I. Reliability theory and practice. New York: Dover Publications Inc, 1961. 377 p.
8. Sandler G.H. Reliability systems engineering. Englewood Cliffs. New York: Prentice-Hall, 1963. 300 p.
9. Suchanek J, Smrkovsky P, Blaskovic N.A. Erosive and hydroabrasive resistance in hardfacing materials // Wear. 1999. Vol.233-235. P.229-236.
10. Sherington I, Hayhurst P. Simultaneous observations of the evolution of debris density and friction coefficient in dry sliding steel contacts / Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Tribology. 2001. Vol.249. Is.3-4. P.182-187.

11. Karimi A, Verdon C, Barbezat G. Microstructure and hydroabrasive wear behavior of high-velocity oxy-fuel thermally sprayed Wc-Co (Cr) coatings // Surface and Coating Technology. 1993. Vol.57(1). P.81-89.
12. Yao M, Page N.W. Friction measurements on Ni-Hard 4 during high pressure crushing of silica // Wear. 2001. Vol.249. P.117-126.

REFERENCE

1. Alexandrov V.I., Menshikov C.C. Koeffitsient tekhnicheskogo sostoyaniya gruntovogo nasosa (*Coefficient of technical state of the slurry pumps*). Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2014. N 4, p.66-71.
2. Voloshin N.N., Gashiyev V.I. Nadezhnost' tekhnologicheskikh ustanovok na obogatitel'nykh predpriyatiyakh (*Reliability of the process units and equipment in dressing plants*). Moscow: Nedra, 1974, p.136.
3. Smoldyrev A.E. Truboprovodnyi transport (*Pipeline transportation*). Moscow: Nedra, 1980, p.293.
4. Alekseyeva T.V., Babanskaya V.D., Bashta T.M. et al. Tekhnicheskaya diagnostika gidravlicheskikh privodov (*Technical diagnostics of hydraulic drives*). Moscow: Mashinostroenie. 1989, p.264.
5. Turchaninov S.P. Gidroabrazivnyi iznos metallov pri kavitatsii (*Hydroabrasive wear of metals at cavitation*). Moscow: Mashinostroyeniye, 1971, p.240.
6. Dube N.B., Hutchings I.M. Influence of particle fracture in the high-stress and low-stress abrasive wear of steel. Wear. 1999. Vol.233-235, p.246-256.
7. Bazovsky I. Reliability theory and practice. New York: Dover Publications Inc, 1961, p.377.
8. Sandler G.H. System reliability engineering. Englewood Cliffs, New York: Prentice-Hall, 1963, p.300.
9. Suchanek J, Smrkovsky J., Blaskovic N.A. Erosive and hydroabrasive resistance in hardfacing materials. Wear. 1999. Vol.233-235, p.229-236.
10. Sherington I, Hayhurst P. Simultaneous observations of the evolution of debris density and friction coefficient in dry sliding steel contacts. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Tribology. Vol.249. Is.3-4, 2001, p.182-187.
11. Karimi A, Verdon C, Barbezat G. Microstructure and hydroabrasive wear behavior of high-velocity oxy-fuel thermally sprayed Wc-Co (Cr) coatings. Surface and Coating Technology. 1993. Vol.57(1), p.81-89.
12. Yao M, Page N.W. Friction measurements on Ni-Hard 4 during high pressure crushing of silica. Wear. 2001. Vol.249, p.117-126.

VIBRODIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL STATE SLURRY PUMPS

V.I.ALEKSANDROV, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, alexvict@spmi.ru*
Saint-Petersburg Mining University, Russia

JERZY SOBOTA, *Professor, jerzy.sobota@up.wroc.pl*
University of Environmental and Life Sciences, Wroclaw, Poland

Analysis of the work hydrotransport systems in processing plants shows that the efficiency of this type transport does not match its technical capabilities: the high laboriousness involved in the operation of the equipment, high hydroabrasive wear of slurry pumps and pipelines, low working life pumps, high metal consumption and energy. The main reason for the lack of effectiveness of hydraulic transport is hydroabrasive wear impellers of slurry pumps, causing rising levels of vibration pumps, reducing the pressure characteristics, general technical state of hydrotransport system and as a result - low pumps life, not exceeding 500 hours of continuous operation. In paper, it is shown that as a criterion of period normal operation slurry pump can be used coefficient of technical state, the value of which is proportional to the relative head, degree of hydroabrasive wear of the impeller and time of continuous operating. The coefficient technical state of slurry pump can be represented as a function of current flow rate and the RMS value of vibration velocity. The results of theoretical and experimental studies used to develop algorithms and techniques express-diagnosis and monitoring of slurry pumps in hydrotransport system, data which indicate the need for routine maintenance of pumping equipment.

Key words: hydrotransport, slurry pump, technical state, energy consumption, hydroabrasive wear, express-diagnosis.