

ИЗНОС ЛОПАТОК РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ТВЕРДЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Малеев В.Б., доц., канд. техн. наук,
Донецкий национальный технический университет

Указано влияние твердых частиц на абразивный износ лопаток рабочего колеса центробежного насоса и определены пути его снижения.

В результате изучения состояния 1473 шахтных центробежных насосов, поступивших на централизованный ремонт в течение 5 лет, Махинин А.И. [1] путем анализа характерных износов деталей показал, что сроки службы насосов, в основном, зависят от состояния рабочего колеса и вала. При разработке физико-математической модели гидроабразивного изнашивания лопаток рабочего колеса за основу взяты работы Гочиташвили Т.Ш. [2] и Финкельштейна З.Л. [3], которые исследовали гидроабразивный износ трубопроводов в турбулентных потоках, но при этом учтена кинематика движения твердых частиц в межлопаточном пространстве. Допустим A_1 – работа, затраченная на разрушение единичной массы материал. Тогда количество работы, затрачиваемое на разрушение микрообъема поверхности вследствие единичного соударения твердой частицы, будет:

$$A = A_1 I, \quad (1)$$

где I – масса изношенного материала.

Разложим силу удара частицы P при угле α между направлением силы и поверхностью износа на две составляющие: нормальную $P \sin \alpha$ и тангенциальную $P \cos \alpha$. Если учесть, что срез может производиться только тангенциальной составляющей от силы соударения, то часть работы A , затраченная на срезание микрообъемов поверхности (A_0), представится в виде

$$A_0 = I \cdot P (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha), \quad (2)$$

Другая часть работы A , т. е. работа $A_{до}$, расходуется на ударный (деформационный) износ:

$$A_{до} = h_v P \sin \alpha, \quad (3)$$

где h_v – глубина внедрения частицы в поверхностный слой изнашиваемого материала.

В выражениях (2) и (3) произведения $IP = f_o \varepsilon$ и $h_v P = f_{до} \varepsilon$, представляют собой некоторую долю теряемой твердой частицей кинети-

ческой энергии ε в процессе ее соударения о поверхность изнашиваемого материала (f_0 и $f_{Д0}$ – коэффициенты пропорциональности).

Согласно теории Карно-Остроградского кинетическая энергия, теряемая частицей в процессе удара может быть найдена по формуле:

$$\varepsilon = \frac{mV_T^2}{2}(1 - \kappa_B^2), \quad (4)$$

где m – масса твердой частицы шарообразной формы; V_T – скорость соударения твердой частицы с изнашиваемой поверхностью; κ_B – коэффициент упругопластического восстановления. Из формул (1 - 4) можно получить:

$$I = \frac{\pi d^3}{12} \rho_T V_T^2 [f_{0_1} (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) + f_{Д0_1} \sin \alpha], \quad (5)$$

где d – диаметр твердых частиц; $f_{0_1} = f_0 \frac{1 - \kappa_B^2}{A_1}$ и $f_{Д0_1} = f_{Д0} \frac{1 - \kappa_B^2}{A_1}$ – коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств изнашиваемого материала и абразивных частиц.

Общее число частиц, которые за время t могут участвовать в износе, если вектор скорости V_T направлен относительно поверхности площадью F под углом α , равно

$$n_\Sigma = \frac{6V_T S F t \sin \alpha}{\pi d^3}, \quad (6)$$

Однако не все частицы входят в соприкосновение с ограничивающей поверхностью. С ней одновременно может соударяться только определенное число частиц, вызывающих износ материала, так как при достаточно высокой концентрации гидросмеси частицы будут сталкиваться друг с другом и уноситься потоком без соприкосновения с поверхностью. Вероятный анализ процесса контактирования твердых частиц с ограничивающей поверхностью с учетом некоторых допущений схематизирующих изучаемый процесс и влияние крупности частиц на износ поверхности (рис. 1), позволяет при достаточно большом содержании твердого в гидросмеси (при $n_\Sigma \rightarrow \infty$) определить наивероятнейшее число частиц, способных участвовать в процессе изнашивания [2]:

$$n_t = \frac{6V_T (1 - S) F t \sin \alpha}{\pi d^3}, \quad (7)$$

Если потеря массы изнашиваемого материала в результате одного удара одной частицей представляется выражением (5), то интенсивность износа поверхности, т. е. потеря масса металла единицей

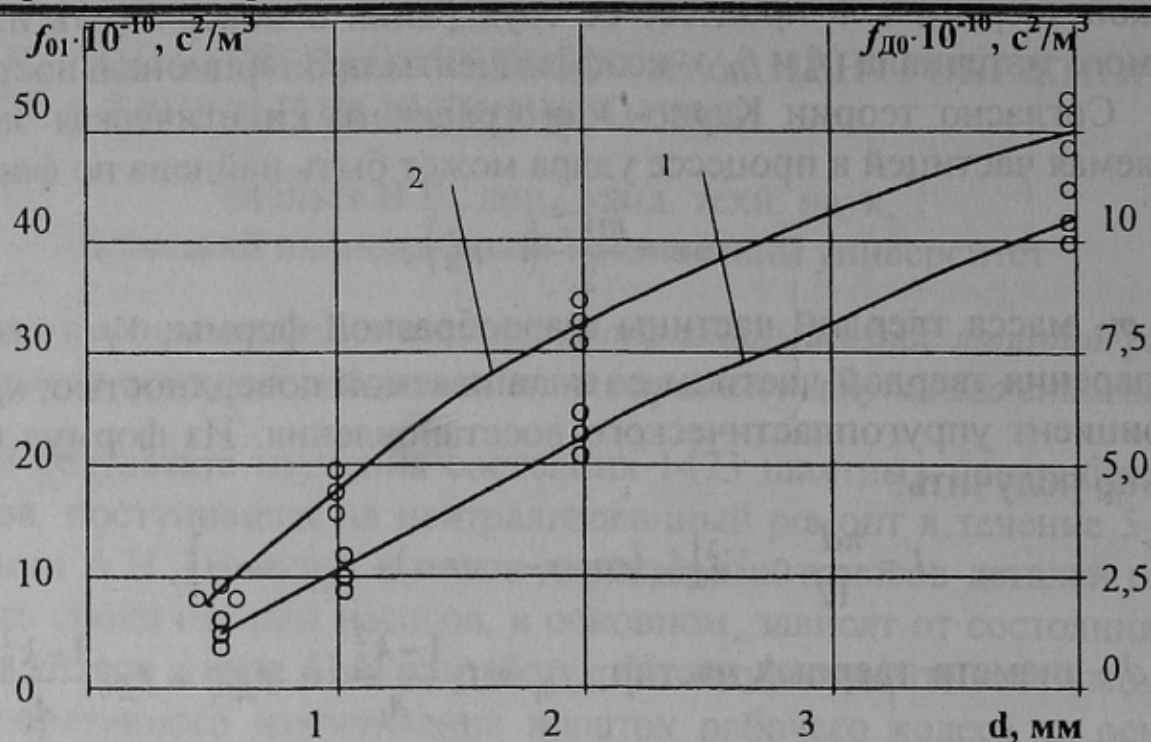


Рис.1 - Зависимости абразивной способности частиц от их крупности: 1 - изнашиваемый материал сталь Ст.3, абразив - кварцевый песок при $V_T=6,5$ м/с; $S=0,06$; $\alpha=12^\circ$; 2 - изнашиваемый материал сталь 40X, абразив - кварцевый песок при $V_T=6,5$ м/с; $S=0,06$; $\alpha=90^\circ$

изнашиваемой поверхности за единицу времени, вызванная соударением n_i -го числа частиц, составит:

$$\Delta = \rho_T v_T^3 S(1-S) [f_1 (\sin 2\alpha - 2\mu \sin^2 \alpha) + f_2 \sin^2 \alpha], \quad (8)$$

где $f_1 = f_{01}/4$ и $f_2 = f_{д01}/2$ - коэффициенты, учитывающие прочностные свойства изнашиваемого материала и абразивные свойства твердых частиц.

Зависимость (8) можно представить в виде:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = [\rho_T V_T^3 S(1-S) df_1 \sin 2\alpha - \rho_T V_T^3 S(1-S) df_1 2\mu \sin^2 \alpha] + [\rho_T V_T^3 S(1-S) df_2 \sin^2 \alpha] \quad (9)$$

где Δ_1 , Δ_2 - доля интенсивности гидроабразивного износа, вызванная соответственно тангенциальной и нормальной составляющими силы косоугольного удара частицы о поверхность износа.

Справедливость полученной зависимости сравнивалась с экспериментальными данными, приведенными в работе [2]. Расхождение между экспериментальными и аналитическими данными составляют от 3% до 15% (рис. 2). При схематизации процесса для теоретического анализа было сделано допущение, что в области, близлежащей к поверхности износа с уменьшением диаметра частиц их инерцион-

ность уменьшается: как в пульсационном, так и в усредненном движении и они практически следуют за несущей жидкостью, траектории их движения все больше совпадают с траекторией движения жидкости и большая часть твердого материала уносится потоком, не соприкасаясь при этом с деталью. Этому способствует наличие, кроме сольватной оболочки, у мелких (легких) частиц так называемых ковалюмов, т. е. объемов несущей среды, соизмеряемых с объемами самих частиц и жестко связанных с ними. При пульсации в относительном движении взвеси мелкие частицы соударяются с ограничивающими поверхностями и между собой лишь своими ковалюмами.

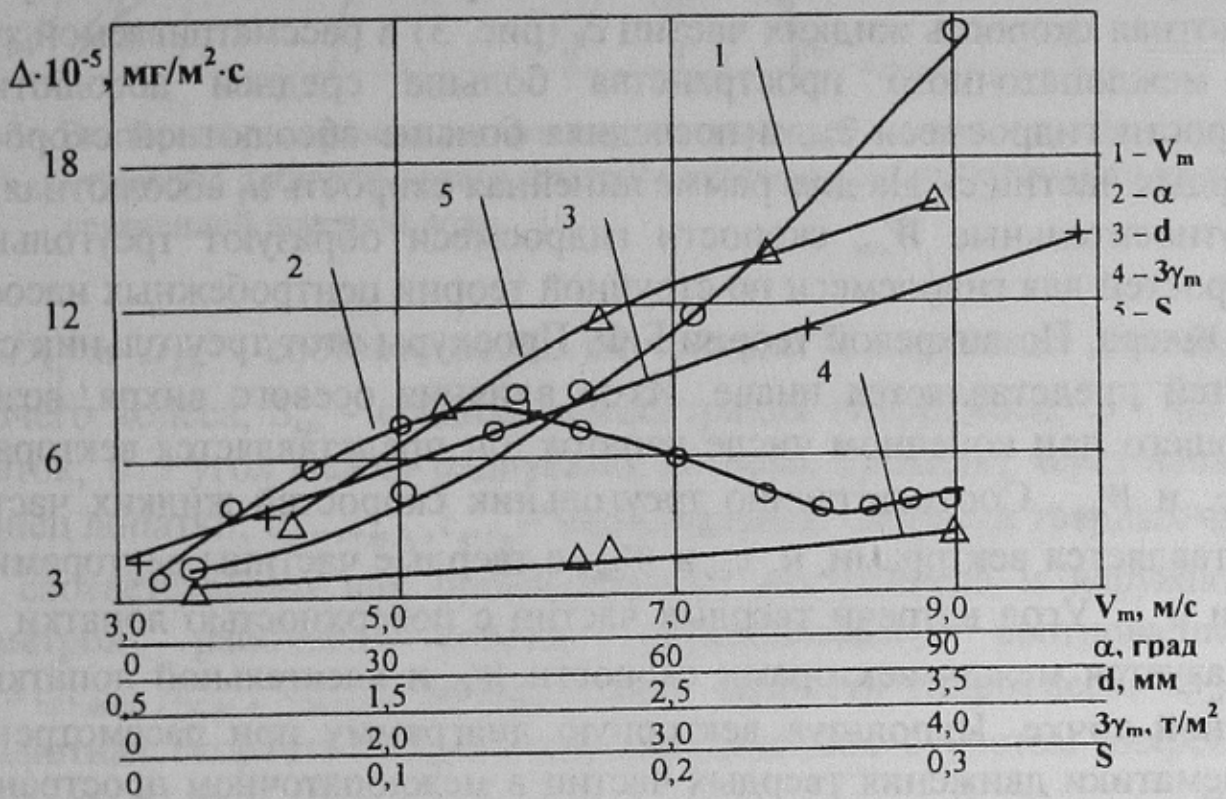


Рис.2 - Зависимости интенсивности гидроабразивного износа соответственно от скорости, угла натекания, крупности, плотности твердых частиц и концентрации гидросмеси

Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что основной причиной гидроабразивного износа лопаток рабочего колеса центробежного насоса является разрушение поверхностного слоя путем среза, происходящего за счет тангенциальной составляющей напряжения, возникающего в теле лопатки при соударении с нею твердых частиц. Тогда, убыль материала изнашиваемой лопатки:

$$I = \frac{\pi \cdot d^3}{12} \cdot \rho_T \cdot W_T^2 \cdot f_1 \cdot n \cdot \cos \alpha, \quad (10)$$

В работе [2] доказано, что случайная величина n , имеет закон распределения Пуассона и определяется формулой:

$$n = \frac{6 \cdot S \cdot F \cdot t \cdot W_T \cdot \sin \alpha}{\pi \cdot d^3} \cdot e^{-4S}, \quad (11)$$

Подставив выражение (11) в (10), получим формулу для определения интенсивности износа лопатки рабочего колеса:

$$\Delta = f_1 \cdot \rho_T \cdot \frac{W_T^3}{4} \cdot S \cdot e^{-4S} \cdot \sin \alpha, \quad (12)$$

Согласно вихревой теории центробежных насосов векторы относительных скоростей частиц жидкости смещены от касательной поверхности лопатки, а при перемещении потока гидросмеси несущей средой является вода, несомой – твердые частицы. Поэтому абсолютная скорость жидких частиц c_B (рис. 3) в рассматриваемой точке межлопаточного пространства больше средней абсолютной скорости гидросмеси $c_{см}$, а последняя больше абсолютной скорости твердых частиц c_T . На диаграмме линейная скорость u , абсолютная $c_{см}$ и относительные $W_{см}$ скорости гидросмеси образуют треугольник скоростей для гидросмеси по струйной теории центробежных насосов Л. Эйлера. По вихревой теории Г.Ф. Проскуры этот треугольник скоростей представляется иначе. Из-за влияния осевого вихря, возникающего при конечном числе лопаток, он представляется векторами u , $c_{см}$ и $W_{см}$. Соответственно треугольник скоростей жидких частиц составляется векторами, u , $c_{см}$ и $W_{см}$, а твердые частицы векторами u , $c_{см}$ и $W_{см}$. Угол встречи твердых частиц с поверхностью лопатки ψ_T образуется между векторами скорости W_T и касательной лопатки в данной точке. Используя векторную диаграмму при рассмотрении кинематики движения твердых частиц в межлопаточном пространстве, значения величин скорости твердых частиц W_T , угла встречи твердых частиц с поверхностью износа ψ_T и концентрации гидросмеси S на любом участке поверхности лопатки:

$$W_T = \sqrt{c_{M.T}^2 - (u - c_{M.T})^2}, \quad (13)$$

$$\psi_T = 180^\circ - \left(\beta + \arcsin \frac{c_{M.T}}{W_T} \right), \quad (14)$$

$$S = \frac{(D_{K_2} - D_{K_1}) \left(D_{K_2} \sqrt{W_{T1}^2 - c_{M.T1}^2} + D_{K1} \sqrt{W_{T2}^2 - c_{M.T2}^2} \right) S_{cp}}{D_{K_2} D_{K_1} \left(\frac{2\pi}{Z} + \phi' \right) (c_{M.T1} + c_{M.T2})}, \quad (15)$$

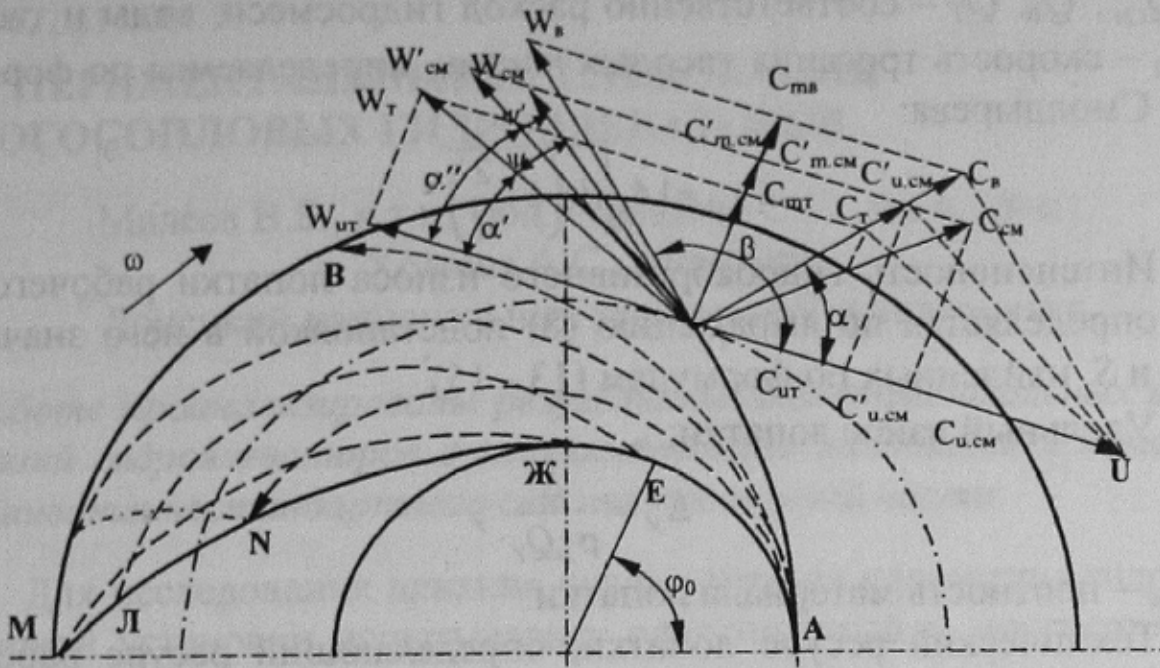


Рис. 3 - Векторная диаграмма распределения скоростей в межлопаточном пространстве рабочего колеса центробежного насоса, работающего на загрязненной шахтной воде

где D_{K_1} и D_{K_2} - соответственно внутренний и наружный диаметры рабочего колеса; S_{cp} - средняя концентрация гидросмеси; Z - число лопаток; φ' - угол между радиусами, которые проходят через начало и конец лопатки; $c_{m.T}, c_{m.T_1}, c_{m.T_2}$ - меридиальные скорости твердых частиц соответственно для произвольного, внутреннего и наружного диаметров рабочего колеса, определяемые, соотношением $c_{m.T} = c_T c_{m.CM} / c'_{C.M}$; $c_{m.CM}$ - меридиальная скорость гидросмеси; $c'_{C.M}$ - абсолютная скорость гидросмеси, определяемая с учетом вихревой теории Г. Ф. Проскуры по формуле: $c'_{C.M} = \sqrt{c_{m.CM}^2 + c'_{U.CM}{}^2}$; $c'_{U.CM}$ - скорость закручивания гидросмеси; по той же теории - $c'_{U.CM} = K_H c_{U.CM}$, K_H - коэффициент закручивания потока; $c_{U.CM}$ - скорость закручивания гидросмеси; c_T и c_B - абсолютные скорости твердых и жидких частиц, определяемые по системе уравнений:

$$c_T = c_B - c_0 - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{D_{K_1}} \right)^{1.5} c_B, \tag{16}$$

$$\frac{Q_B}{c_B} + \frac{Q_T}{c_T} = \frac{Q_{CM}}{c'_{CM}}, \tag{17}$$

где Q_{CM} , Q_B , Q_T – соответственно расход гидросмеси, воды и твердого; c_0 – скорость трогания твердых частиц, определяемая по формуле А. Е. Смолдырева:

$$c_0 = 1,4 \sqrt{dg \left(5 + \frac{2}{d} \right)}, \quad (18)$$

Интенсивность гидроабразивного износа лопатки рабочего колеса определяется по выражению (8) подстановкой в него значений V_T , α и S , найденных по формулам (13 - 15).

Удельный износ лопатки:

$$\Delta_y = \frac{\Delta}{\rho_m Q_T}, \quad (19)$$

где ρ_m – плотность материала лопатки.

Технический ресурс лопатки, определяющий ресурс рабочего колеса:

$$T_K = \frac{\delta_l \rho_m}{3600 \Delta}, \quad (20)$$

где δ_l – толщина лопатки.

Наблюдения, проведенные за эксплуатацией насоса в промышленных условиях, показали, что технический ресурс отдельных деталей насоса составляет:

$$T_D = k_{\text{э}} T_K, \quad (21)$$

где $k_{\text{э}}$ – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации насоса.

Из изложенного следует, что интенсивность износа рабочих колес находится в сложной функциональной зависимости от величины подачи центробежного насоса (расход гидросмеси Q_{CM} , воды Q_B и твердого материала Q_T) и предопределена сочетанием других параметров рабочего режима. Износ рабочего колеса в значительной степени зависит от угла выхода лопатки. С его увеличением долговечность лопатки резко возрастает. Это обстоятельство учтено при конструировании рабочих колес шахтного центробежного насоса [4].

Список источников:

1. Махинин А. И. Пути увеличения надежности, долговечности и экономичности шахтных центробежных насосов. «Горные машины и автоматика», №2, М., Недра, 1967.
2. Гочиташвили Т. Ш., Махарадзе Л. И. Вопросы анализа гидроабразивного изнашивания. – Сообщение АН ГССР, 1974, т. 74, №3, с. 637-640.
3. Фадин В.А. Исследование насосов МС в промышленных условиях // Водоотлив глубоких шахт: Тр. Всесоюзного науч.-техн. семинара. М.: Недра, 1967. С. 72 – 77.
4. Гейер В.Г., Малеев В.Б., Боруменский А.Г. и др. Рабочее колесо центробежного насоса. Авт. свидетельство № 1634836. Бюллетень изобретений №10, 1991.