

УДК 622.53.004

В.Б. Малеев, д-р техн. наук, проф.,
Н.И. Скорынин, канд. техн. наук, проф.,
А.А. Кудрявцев, ассист.,
Донецкий национальный технический университет

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАСОСАХ ВОДООТЛИВА ПРИ КАВИТАЦИИ

Слой твердых включений перед входом во всасывающую трубу насоса и нарастающая угловая скорость рабочего колеса вносят возмущение в гидравлическую систему. Возникшие при этом переходные процессы могут привести к опасным колебаниям давления.

шахта, водоотлив, центробежный насос, кавитация, переходные процессы

Проблема и её связь с научными или практическими задачами. При пуске насоса водоотливной установки в работу вследствие погружения всасывающего трубопровода под уровень шлама, возрастает вакуум во всасывающем тракте и при большом погружении будет происходить разрыв сплошности потока из-за кавитации. Рассмотрим некоторые случаи протекания переходных процессов в насосных установках при кавитации. При неработающем насосе водоотливной установки в приемном колодце оседает шлам, что приводит к заиливанию всасывающего тракта и увеличению его сопротивления при пуске. Возникшие при этом переходные процессы могут привести к опасным колебаниям давления.

Анализ исследований и публикаций. Исследованиям пуска насосов посвящено много работ [1-5]. Однако в этих работах не изучено влияние зашламления приемного колодца на пусковой режим насоса и работа последнего на неосветленной шахтной воде при дискретном поступлении твердых включений к всасу.

Постановка задачи. Рассмотреть переходной процесс при запуске насоса в работу, подача которого устанавливается с запаздыванием из-за кавитации во всасывающей линии.

Изложение материала и результаты. При рассмотрении переходного процесса считаем, что при отсутствии кавитации давление насоса не зависит от времени и является функцией только подачи и скорости вращения вала. Насос и его всасывающая линия до пуска предварительно заполнены водой и отсутствуют подсосы воздуха. Возмущение в гидравлическую систему вносит слой твердых вклю-

чений перед входом во всасывающую трубу насоса и нарастающая угловая скорость рабочего колеса. В работе [5] показано, что давление и подача насоса при работе на воде в переходном процессе с учетом кавитации существенно отличаются от полученных для случая, когда ее влиянием пренебрегают. Переходный процесс характеризуется критической подачей:

$$Q_K = \sqrt{\frac{P_a - P_{\text{нп}} - H_e}{\rho g \cdot (a_{\text{вс}} + a_K)}},$$

где P_a – атмосферное давление;

$P_{\text{нп}}$ – давление насыщенных паров жидкости при данной температуре;

H_e – напор во всасывающей линии;

$a_{\text{вс}}$ – сопротивление всасывающего трубопровода.

Второй параметр – скорость изменения подачи для случая, когда до возмущения расход жидкости во всасывающем трубопроводе $Q_1=0$ запишется так:

$$\left[\frac{dQ}{dt} \right]_{\text{max}} = \frac{gS_e}{L_e} \left(\frac{P_a - P_{\text{нп}}}{\rho g} - H_e \right),$$

где S_e – площадь поперечного сечения всасывающего трубопровода.

Тогда, время для достижения данной подачи, согласно [5]:

$$t = \frac{Q_K}{\left[\frac{dQ}{dt} \right]_{\text{max}}} \cdot \text{arth} \left(\frac{Q}{Q_K} \right).$$

Если же возмущение внесла пробка твердого во всасывающем трубопроводе, то время, необходимое для достижения данной подачи:

$$t = \frac{Q_K}{\left[\frac{dQ}{dt} \right]_{\text{max}}} \cdot \left[\text{arth} \left(\frac{Q}{Q_K} \right) - \text{arth} \left(\frac{Q_1}{Q_K} \right) \right]. \quad (1)$$

Из последнего выражения видно, что время переходного процесса от работы на воде до работы на смеси и наоборот, будет определяться по уравнению:

$$t = \frac{Q_K}{2 \cdot \left[\frac{dQ}{dt} \right]_{\text{max}}} \cdot \ln \left[\frac{\left(1 + \frac{Q_2}{Q_1} \right) \left(1 - \frac{Q_1}{Q_K} \right)}{\left(1 - \frac{Q_2}{Q_K} \right) \left(1 + \frac{Q_1}{Q_K} \right)} \right]. \quad (2)$$

Как показали исследования Г.М. Тимошенко [5], вне рабочей зоны насоса протекание переходного процесса, обусловленного кавитацией существенно отличается от расчетного. Это объясняется тем, что для таких режимов динамическое падение напора на входе в колесо определяется по общепринятому уравнению, отличному от выражения. Если бы в течение всего переходного процесса $\frac{dQ}{dt} = \left[\frac{dQ}{dt} \right]_{max}$, то насос развил бы критическую подачу за время, значительно зависящую от постоянной:

$$T = \frac{\left(\frac{Q_K}{S_\epsilon} \right) \cdot L_\epsilon}{g \left[\frac{P_a - P_{\text{НП}}}{\rho g} - H_\epsilon \right]}, \quad (3)$$

где L_ϵ - длина поперечного сечения всасывающего трубопровода.

В этом уравнении $\frac{Q_K}{S_\epsilon} = V_\epsilon$ - скорость во всасывающем трубопроводе, соответствующая критической подаче (кавитационному режиму). При проектировании насосных установок диаметр всасывающего трубопровода обычно выбирают таким, чтобы $V_\epsilon = (0,8 \dots 1,3)$ м/с. Поэтому, для того, чтобы T не изменялась при переходе на работу на неосветленной шахтной воде, следует брать меньшее значение V_ϵ . На продолжительность переходного процесса при пуске насоса в работу влияет момент сопротивления на валу в установившемся режиме M_{CO} , величина которого зависит от характеристики сети [3]:

- при $(M_K - M_\Pi - M_{CO}) > 0$

$$t = \frac{T_a}{\sqrt{M_\Pi (M_\Pi + M_{CO} + M_K)}} \arctg \omega \sqrt{\frac{M_K - M_\Pi - M_{CO}}{M_\Pi}},$$

- при $(M_K - M_\Pi - M_{CO}) < 0$

$$t = \frac{T_a}{\sqrt{M_\Pi (M_\Pi + M_{CO} - M_K)}} \arctg \omega \sqrt{\frac{M_\Pi + M_{CO} - M_K}{M_\Pi}}, \quad (4)$$

где $T_a = I \frac{d\omega_o}{M_o}$ - время разворота вала двигателя до номинальной скорости при постоянном избыточном моменте $M_{изб}$, равном моменту на валу M_o ;

M_K - максимальный момент двигателя;

M_{Π} – момент двигателя при $\omega_1 = 0$;

ω_1 – угловая скорость вала;

M_O, ω_o – момент на валу и угловая скорость вала насоса в установившемся режиме;

M_{CO} – момент сопротивления на валу насоса в установившемся режиме,

$$M_{CO} = \rho \cdot g \cdot \frac{H_o \cdot Q_o}{\eta_o \cdot \omega_o},$$

Здесь H_o, Q_o, η_o - напор, подача и КПД насоса в установившемся режиме.

Из этого выражения видно, что момент сопротивления в установившемся режиме при работе на осветленной шахтной воде будет меньше, чем при работе водоотливного насоса на загрязненной твердыми включениями.

При отсутствии кавитации в пусковом режиме из выражения (4) при $(M_K - M_{\Pi} - M_{CO}) > 0$ можно установить закон изменения мгновенной подачи насоса

$$Q = Q_o \sqrt{\frac{M_{\Pi}}{M_K - M_{\Pi} - M_{CO}}} \cdot \operatorname{tg} \frac{t}{T_a} \sqrt{M_{\Pi} (M_K - M_{\Pi} - M_{CO})}. \quad (5)$$

Кавитация не возникает, если

$$\frac{dQ}{dt} < \frac{gS_{\epsilon}}{L_{\epsilon}} \left[\frac{P_a - P_{\text{нп}}}{\rho g} - H_{\epsilon} - (a_{\text{вс}} + a_K) Q^2 \right]. \quad (6)$$

Тогда, из уравнения (5) скорость изменения подачи равна:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{M_{\Pi} \cdot Q_o \cdot S_{\epsilon} \cdot t \cdot c^2}{T_a} \cdot \sqrt{M_{\Pi} (M_K - M_{\Pi} - M_{CO})}. \quad (7)$$

Из анализа последнего выражения видно, что с течением времени, по мере увеличения подачи Q_n насоса dQ/dt повышается, с одной стороны, а с другой, критическое значение dQ/dt (см. выражение 6) с ростом расхода во всасывающем трубопроводе уменьшается. Поэтому, пока dQ/dt не достигнет критического значения, скорость вращения ротора насосного агрегата будет соответствовать вычисленной по уравнению (4). Если dQ/dt превысит критический предел, то переходный процесс следует рассчитывать по уравнению:

$$t = \frac{L_{\epsilon}}{gS_{\epsilon}} \cdot \frac{\operatorname{arth} \sqrt{\frac{(a_{\text{вс}} + a_{\text{к}})Q^2}{P_a - P_{\text{п см}} - H_{\epsilon}} \rho g}}{\sqrt{\left(\frac{P_a - P_{\text{п см}}}{\rho g} - H_{\epsilon}\right)(a_{\text{вс}} + a_{\text{к}})}}} . \quad (8)$$

При отсутствии кавитации изменение подачи насоса четко соответствует изменению частоты вращения, при возникновении кавитации дальнейшее изменение подачи уже не объясняется изменением частоты вращения и определяется законом, выраженным уравнением:

$$Q(t) = Q_{\text{к}} \cdot \operatorname{th} \left[\operatorname{arth} \left(\frac{Q}{Q_{\text{к}}} \right) \right] .$$

Зависимость $P(t)$ в этом случае можно найти исходя из того, что связь между давлением и расходом в переходном процессе определяется уравнением $P = \rho g a_{\text{вс}2} Q^2$. При этом процесс протекает от точки с параметрами (Q_1, P_1) до точки с параметрами (Q_2, P_2) . Значит, граничными параметрами для него будут $Q = Q_2$ и $P = P_2$.

Анализ характера повреждений и поломок деталей шахтных центробежных насосов показал, что не все они могут быть объяснены только действием гидроабразивного износа. Существенное влияние оказывают также повышенные вибрации, зависящие от многих факторов (первоначальный небаланс, число рабочих колес, режим работы и др.) [6]. Установлено, что чем интенсивнее кавитация, тем выше уровни вибрации. В большинстве случаев на режиме малых подач амплитуды вибраций больше, чем при кавитации. В оптимальных зонах и близких к ним, которым соответствуют максимальные значения КПД, уровни вибраций минимальные. Вибрация насосов занимает широкий спектр частот, от самых низких, равных частоте вращения вала, и до частот порядка 40000 Гц. Запись спектрограмм вибрационного смещения показала, что определяющей в спектре вибраций является первая гармоника, высокочастотные составляющие по амплитуде при нормальной работе насоса незначительны. Развитие же кавитации в насосе приводит преимущественно к увеличению высокочастотных составляющих в спектре вибрации.

Выводы и направление дальнейших исследований. На каждый из компонентов гидросмеси действуют одни и те же силы, но разной величины в зависимости от физических свойств компонента. При из-

менении энергии одного из компонентов соответственно меняется энергия не только гидросмеси, но и другого компонента.

При работе на загрязненной шахтной воде частота собственных колебаний жидкости в насосах находится в диапазоне (3...8) Гц, практически совпадающей собственной частотой колебаний ротора приводного асинхронного двигателя. Следовательно, при неустановившемся режиме работы насоса возможно появление параметрического резонанса. Для избежания резонанса у существующих типов насосов подача их должна отличаться от резонансной не менее, чем на (30...50)%. Осветление шахтной воды от твердых частиц и поддержание ее плотности постоянной способствует уменьшению колебаний подачи.

Список литературы

1. Покровская В.Н. Механизация очистки шахтных водосборников / В.Н. Покровская. - М.: Углетехиздат, 1957. - 111 с.
2. Распопов Н. А. К вопросу автоматического выражения характеристик центробежных насосов / Н. А. Распопов // Сб. трудов ИГМТК им М. М. Федорова. - 1964. - №35.
3. Тимошенко Г. М. Уравнения переходных режимов в системе насосный агрегат – трубопровод – потребители энергии / Г. М. Тимошенко // Разработка месторождений полезных ископаемых. - 1968. - Вып. 13. - С. 30-37.
4. Тимошенко Г. М. Научные основы проектирования и эксплуатации насосных установок в переходных режимах / Г. М. Тимошенко. - К.; Донецк: Вища шк., 1986. - 127 с.
5. Тимошенко Г. М. Область применения теории жесткого удара при исследовании переходных процессов в шахтных насосных установках / Г. М. Тимошенко, В. Г. Кравец // Разработка месторождений подземных ископаемых. - К. - 1977. - Вып. 48. - С. 35-42.
6. Махинин А. И. Пути увеличения надежности, долговечности и экономичности шахтных центробежных насосов / А. И.Махинин // Горные машины и автоматика. - М.: Недра, 1967. - №2.

В.Б.Малеев, М.Й.Скоринін, О.О.Кудрявцев. *Перехідні процеси в насосах водовідливу при кавітації. Шар твердих включень перед входом у всмоктуючу трубу насоса і наростаюча кутова швидкість робочого колеса вносять обурення до гідравлічної системи. Виникаючі при цьому перехідні процеси можуть привести до небезпечних коливань тиску.*

шахта, водовідлив, відцентровий насос, кавітація, перехідні процеси

V.B.Maleev, N.I.Skorynin, A.A.Kudrjajtsev. *Transients in Pumps of Pumping-out Systems If Cavitation Exists. The presence of hard particles inclusions at the inlet into the suction pipe of a pump and the increase of running wheel angular velocity produce the disturbance in hydraulic system. In this process the dangerous pressure fluctuations may be brought about by the transients.*

mine, pumping-out, centrifugal pump, cavitation, transients

Стаття надійшла до редколегії 27.10.2010

Рецензент: зав. каф. ВМ ДонНТУ, д-р техн. наук, проф. Г.М.Улітін

© Малеев В.Б., Скоринин Н.И., Кудрявцев А.А., 2010