

Отечественный метод прогнозирования кавитационной эрозии лопастных насосов с применением легко разрушающихся от кавитации материалов и характеристик их относительной стойкости

08, август 2015

Луначи Э. Д.^{1,*}

УДК: 621.671.532.528

¹Россия, ООО «Насосы и уплотнения»

^{*}info@t2100.ru

Введение

Кавитационная эрозия (КЭ) обнаруживается чаще всего на элементах крупных машин, работающих с высокими скоростями обтекания. Каждый раз – это неожиданность. Реже ее обнаруживают при заводских испытаниях опытного образца и тоже неожиданно. Возникают споры о природе разрушений, о качестве материала изделия, о нарушениях проектной геометрии или согласованного режима работы.

Материал, подверженный КЭ, имеет вид губчатых участков с явным выносом материала. Кроме того, возможны следы в виде одиночных язвин и вмятин, участков на которых заметно изменение цвета, но без выноса материала. В тяжелых случаях выкрашиваются целые куски деталей (рис.1). Чаще всего повреждаются лопасти и диски рабочих колес, реже языки отводов, иногда пояски щелевых уплотнений. У осевых и диагональных машин бывают зоны КЭ на камерах и втулках рабочих колес, а также на лопатках выправляющих аппаратов.

КЭ крупных машин ликвидируют, пытаются наплавить поврежденные места нержавеющими электродами. Установлено, что нержавеющие стали меньше подвержены КЭ, чем углеродистые.

При обнаружении КЭ у опытных машин на заводе или в лаборатории пытаются изменить профиль лопаток или подыскать более кавитационно стойкий материал. Иногда помогает изменение режима работы по подаче, реже - увеличение кавитационного запаса. На практике допустимый кавитационный запас выбирается так, что в нем всегда имеется развитая кавитация, которая обнаруживается и акустическими методами, и визуально. Ликвидация кавитации как явления не удается, т.к. для этого нужно многократно увеличи-

вать кавитационный запас. Прогнозирование КЭ на стадии разработки позволяет выбрать эффективный способ продления ресурса и даёт материал для планирования ремонта.

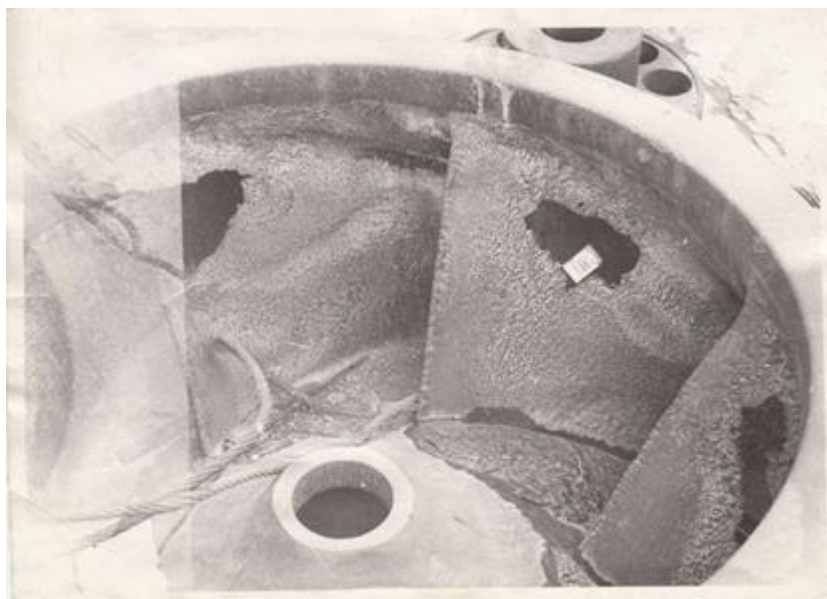


Рис.1. Кавитационные разрушения лопаток насоса 56 В17 за 18000 мотоочасов. $Q=7.8 \text{ м}^3/\text{с}$, $H=73 \text{ м}$, $n=375 \text{ об/мин}$, $\Delta h=16 \text{ м}$, Сталь 35Л, $D_0 \approx 1.5 \text{ м}$
Канал «Днепр-Кривой Рог» (сфотографировано В.Г. Моревым)

Особые лаковые покрытия как средство диагностики разрушающего воздействия кавитации

Во ВНИИГидромаше В. Э. Волин предложил рассматривать отдельно разрушающее воздействие кавитации и разрушение от этого воздействия. Все дальнейшие работы производились под его руководством и при непосредственном участии.

Основные успехи в изучении воздействия получены после разработки лаковых покрытий, чувствительных к кавитации. Эти покрытия не повреждаются при длительном пребывании в холодной воде испытательных стендов. Они оказались намного чувствительнее к воздействию кавитации, чем любые стандартные лакокрасочные материалы [1]. Их легко наносить и удалять.

За 5-50 минут испытаний в заданном режиме выявлялись следы этого воздействия и места с бóльшим и меньшим воздействием. Затем удалось научиться управлять этим воздействием путем изменения частоты вращения вала при заданных безразмерных подаче $\bar{q}$ и кавитационном запасе $\Delta \bar{h}$:

$$\bar{q} = \frac{K_0 \times Q}{n \times D_0^3} ; \Delta \bar{h} = \frac{K_1 \times \Delta h}{n^2 \times D_0^2} ,$$

здесь Q – подача насоса, n – частота вращения вала, D_0 – диаметр входа в рабочее колесо, Δh – кавитационный запас при испытаниях, K_0 и K_1 размерные коэффициенты.

Это позволило провести массовые испытания, которые показали [3]:

- за счет подбора n и длительности экспозиции объекта в режиме кавитации можно получить отчетливые зоны воздействия, состоящие из одиночных округлых язвин повреждения лака диаметром в доли миллиметра, которые с течением времени образуются все чаще и сливаются друг с другом в зоны сплошных повреждений;
- с увеличением частоты вращения и соблюдении заданных $\bar{q}$ и $\Delta \bar{h}$ повреждения лака во всех зонах усиливаются. Зоны расширяются по площади, т.к. к зонам, обнаруженным при низкой частоте вращения, с увеличением n часто добавляются новые зоны;
- хотя повреждения лака на различных лопатках располагаются на похожих местах, но повреждения на разных лопатках различаются как по интенсивности, так и по площади повреждений. Видимо, это результат неодинаковости очертаний каналов. Это наблюдается и у эксплуатирующихся насосов (рис. 1);
- легче всего оказалось сравнивать воздействие кавитации по слабому повреждению лака за заданный промежуток времени выдержки испытаний машины в заданных условиях по $\bar{q}$, $\Delta \bar{h}$ и $n_{\text{исп}}$. Такое повреждение названо эталонным [5];
- с изменением $\bar{q}$ и $\Delta \bar{h}$ подбиралось $n_{\text{исп}}$, которое обеспечивало получение эталонных повреждений хотя бы в одном месте проточной части. Это $n_{\text{исп}}$ было названо $n_{\text{эт}}$. Это место и есть участок, в котором в дальнейшем при заданных $\bar{q}$ и $\Delta \bar{h}$ и n в реальных условиях раньше всего проявится (если проявится) повреждение материала детали;
- в результате опытов было обнаружено большое разнообразие $n_{\text{эт}}$ при различных сочетаниях $\bar{q}$ и $\Delta \bar{h}$ и геометрии объектов;
- было показано, что существует соответствие соотношения повреждений различных мест лопаток рабочего колеса в модели и в натурной машине. Если повреждения лака на модели, например, у корня лопатки было больше, чем у ведомого диска, то и у подобной натурной машины в подобном режиме корень лопатки повреждается больше. Т.е. оказалось возможным по опытам на модели предсказывать кое-что о разрушении натурной машины;
- было показано, что режимы недогрузки по подаче существенно опаснее в отношении КЭ, чем близкие к оптимальному режимы с малыми углами атаки;
- не обязательно в одинаковых по $\Delta \bar{h}$ режимах машина с меньшим

$$C_{кр} = \frac{5,62 \times n \times \sqrt{Q}}{\Delta h_{кр}^{3/4}} \text{ окажется опаснее по КЭ, чем машина с намного большим } C_{кр}.$$

Для методики испытаний и понимания физических процессов при кавитации и эрозии важно, что в одних и тех же кавитационных условиях лак, нанесённый на металл, разрушается быстрее, чем на стеклопластике и резине.

Методам испытаний с помощью лаковых покрытий были обучены специалисты большинства отечественных насосных, турбинных и арматурных заводов, а также лабораторий, интересующихся гидродинамикой их изделий.

2. Основные закономерности развития кавитационных повреждений материалов. Относительная кавитационная стойкость

Параллельно с изучением разрушений лаков в насосах, проводили сравнение разрушений конструкционных материалов. Была создана оригинальная магнитострикционная установка (20 кГц), в которой испытуемый образец рабочим торцом устанавливался с некоторым зазором напротив торца колеблющегося т. н. полуволнового концентратора [6,8,15].

В зависимости от зазора, амплитуды колебаний концентратора, давления в камере с протоком жидкости рабочий торец образца подвергался различной интенсивности воздействия кавитации, которое вызывало различные скорости кавитационного разрушения материала в глубину образца. Этому условию отвечало постоянство

$$\lambda = \frac{p - p_{\text{пар}}}{\rho \cdot (A\omega)^2} = \text{const},$$

где p – давление в рабочей камере, $p_{\text{пар}}$ – давление паров жидкости в камере, ρ – плотность жидкости, A – амплитуда колебаний рабочего торца концентратора, ω – частота колебаний торца концентратора.

По структуре эта формула аналогична числу кавитации, обеспечивающему кавитационное подобие при обтекании тел. Постоянство начального зазора между торцом концентратора и образца – аналог геометрического подобия обтекаемых тел.

При найденных значениях λ кавитационное разрушение образцов было равномерным и происходило по всей площади рабочих торцов образцов. Результат воздействия определялся по потере веса образца за заданный промежуток времени.

Характерные зависимости потерь от кавитации по глубине от продолжительности экспозиции показаны на рис. 2. Обычно их можно аппроксимировать лучами, которые характеризуются инкубационным периодом T и углом α наклона, соответствующим максимальной скорости эрозии. На отрицательной части оси ординат имеется точка A , в которую сходятся аппроксимирующие лучи [2,3].

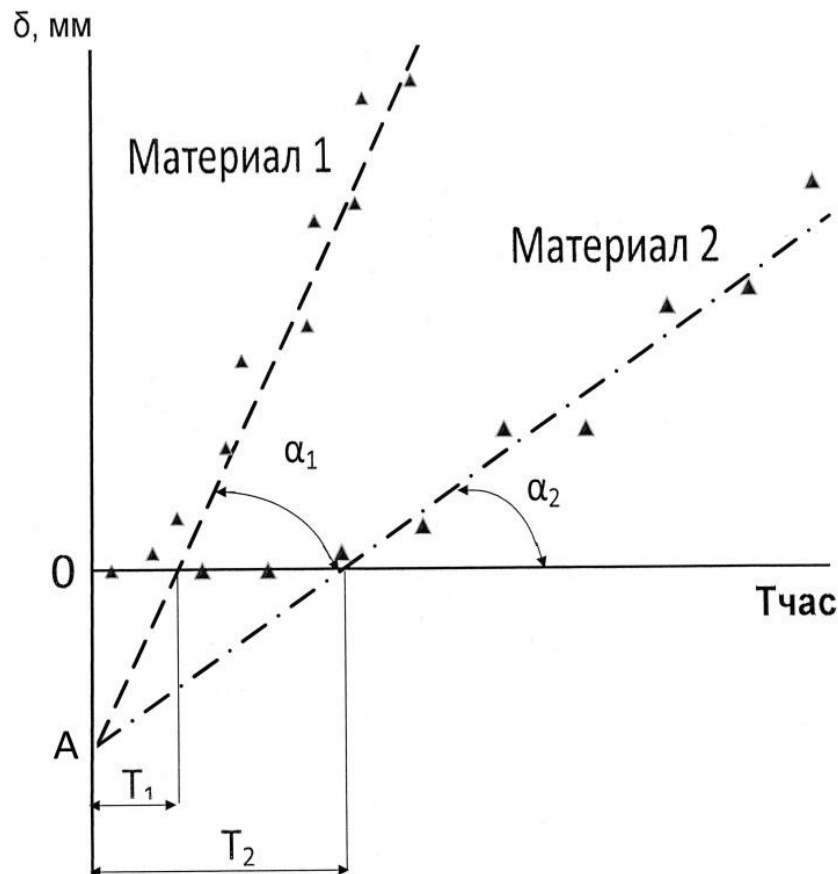


Рис. 2. Зависимость кавитационной эрозии от времени для двух материалов. T_1 и T_2 – инкубационные периоды.

Коэффициент относительной кавитационной стойкости материалов.

$$K = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2}$$

Таким способом был испытан целый ряд конструкционных материалов, у которых в одинаковых условиях обнаружены различные $V_{\text{эп}}$ [3,4,6,7,10,22].

Оказалось удобным $V_{\text{эп}}$ всех материалов сравнивать со скоростью эрозии отожженного алюминия. Коэффициент относительной стойкости i -ого материала выражается формулой:

$$K_i = \frac{V_{\text{эп AL}}}{V_{\text{эп } i}}$$

Таким образом были получены коэффициенты K_i для группы материалов, применяемых в гидромашиностроении (см. таблицу 1).

Таблица 1. Кавитационная стойкость группы материалов

	Материал	Плавка	$V_{\max}$ мм/ч	$K = \frac{V_2}{V_{\max}}$	Среда
1	Сталь ЭП-987		0,0154	310	вода водопроводная
	---/---	с термообработкой	0,0073	650	---/---
2	14X17H2		0,0307	155	---/---
3	O7X16H6ш		0,01387	350	---/---
4	1X14HДЛ		0,0238	200	---/---
3	X18H9T		0,0256	186	---/---
4	4X13		0,0559	85	---/---
5	X17H13M3T		0,0205	230	---/---
6	2X13		0,05	95	---/---
7	Ст. 35		0,031	150	---/---
8	Ст. 20Л		0,1	48	---/---
9	Титан ОТ-4	8-41-714	0,019	250	---/---
	---/---	8-34-503	0,0236	200	---/---
	---/---	8-4-275	0,0211	225	---/---
10	Титан ТЛ-3		0,0191	248	---/---
11	ТЛ-7		0,0222	214	---/---
12	ТН ₁	703	0,0046	1060	---/---
13	ТНМ	505	0,004	1190	---/---
14	Чугун СЧ18-36		0,132	35	---/---
15	Бронза ОЦН-3-7-5		0,1767	27	---/---
16	АЖНМц-9-4-4-1	734 серт. 172	0,0197	240	вода морская
17	Бронза Новостон		0,0222	214	---/---
18	Бронза ОЦ-8-4	850	0,1126	42	вода морская
	---/---	862	0,0862	55	вода водопроводная
	---/---	438	0,0807	59	вода дегазированная
	---/---	421	0,0699	68	---/---
	---/---	579	0,0977	49	вода водопроводная
	---/---	439	0,1383	34	---/---
	---/---	420	0,0643	74	вода морская
	---/---	405	0,0746	64	вода водопроводная
	---/---	464	0,0581	81	---/---
19	Фторопласт Ф-4		0,187	25	---/---
20	Стеклопластик АГ-4с		2,821	1,7	---/---
21	АМИП		0,521	9	---/---

Важно, что отрезки 0А на рис. 2 оказались одинаковыми для разных материалов, причем, в условиях различной интенсивности воздействия ультразвуковой кавитации. Несколько значений коэффициентов K_i были проверены в условиях проточной кавитации за цилиндром в кавитационной гидротрубе, где воздействия кавитации оказалось заметно слабее, но коэффициенты K_i оказались близкими к найденным при ультразвуковой кавитации.

Порядок прогнозирования кавитационной эрозии имеющегося конструкционного материала проточной части насоса (и другого гидродинамического объекта):

- с помощью лаков на водяном стенде определяются зоны воздействия кавитации в интересующем режиме по $\bar{q}$, $\Delta\bar{h}$ и n . Такие опыты придется повторять при разных n с целью уточнить $n_{\text{эт}}$, при котором получают эталонные разрушения лака;
- выбираются места и режимы, которые представляют интерес;
- в эти места вставляются образцы из легкоразрушающегося кавитацией материала (см. далее);
- машина запускается на нужный режим по $\bar{q}$, $\Delta\bar{h}$ и n ;
- после некоторой выдержки на режиме определяются потери веса образцов;
- так повторяется до тех пор, пока не выявляется зависимость глубины разрушения от времени, аналогичная показанной на рис. 2;
- по коэффициенту относительной кавитационной стойкости рассчитывается разрушение в глубину принятого конструкционного материала;
- из тех или иных соображений выбирается допустимая глубина разрушения и по ней рассчитывается ресурс машины.

В практике испытаний разных насосов выяснилось, что при использовании алюминия все же часто требуются десятки, а то и сотни часов экспозиции на режиме. Поэтому были найдены еще менее стойкие в условиях кавитации материалы: чистый индий и сплав свинца с висмутом (9 : 1) [17].

Для этих материалов при ультразвуковой и проточной кавитации были найдены коэффициенты кавитационной стойкости.

$k_{In} = 0,022$ – для индия.

$k_{pb-Bi} = 0,11$ – для сплава свинца с висмутом.

Это позволило получать зависимости развития КЭ от времени за вполне обозримые сроки с тем, чтобы составить требуемый прогноз.

Найдено возможным также изучить скорости КЭ в условиях с постоянными $\bar{q}$ и $\Delta\bar{h}$, но при различных окружных скоростях обтекания. Оказалось, что скорость КЭ пропорциональна степени 4,3 – 4,5 от скорости обтекания [18,19]. Давними исследованиями других авторов получались степенные зависимости кавитационной эрозии с показателями степени 5÷6 от скорости обтекания. Мы объяснили расхождение с нашими результатами

обычно наблюдающимся расширением площади повреждения образцов с увеличением скорости обтекания. В наших же опытах размеры образцов выбирались так, что разрушения на их рабочих торцах происходило равномерно по всей площади образца, вмонтированного в проточную часть.

Модель удара микроструи, образующейся при несимметричном захлопывании одиночного кавитационного пузырька около твёрдой стенки даёт результат интенсивности воздействия, пропорциональный 4-й степени скорости обтекания [14,16].

3. Влияние на кавитационную эрозию свойств рабочей среды

Специальные опыты были поставлены на магнитострикционной установке с целью выявления взаимного влияния на КЭ электрохимических процессов при механическом воздействии жидкости на материалы при кавитации. Для материалов, подверженных коррозии, разупрочняющая роль электрохимических процессов оказалась значительной. Пример показан на рисунке 3 [8,12].

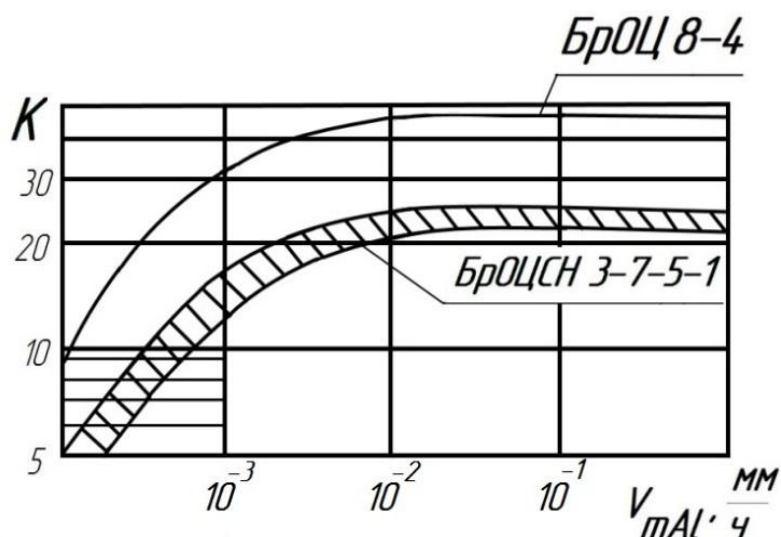


Рис. 3. Зависимость разупрочняющего действия коррозии в морской воде от интенсивности кавитационных нагрузок на бронзы ОЦСН 3-7-5-1 и ОЦ 8-4

Насосы перекачивают жидкости, отличающиеся многими свойствами и, в частности, плотностью.

Концентрированная серная кислота имеет плотность $1,8 \text{ г/см}^3$. Жидкие металлы ещё более плотны и при кавитации разрушают проточную часть. На рисунке 4 показано, как развивается во времени КЭ алюминиевых образцов под действием кавитации в различных жидкостях при работе магнитострикционной установки. Жидкости заметно различаются по плотности, не опасны для испытателей и установки. В условиях интенсивного воздействия коррозия алюминия пренебрежима. Жидкости отличались не только плотностью ρ , но и скоростью распространения звука c .

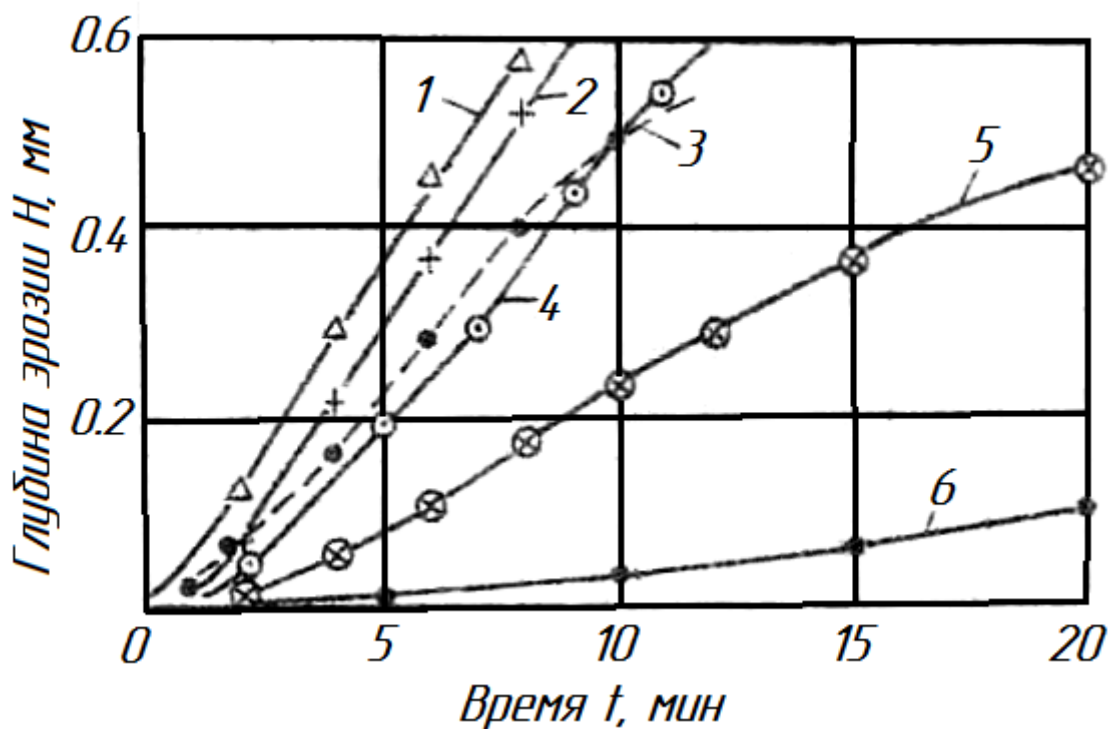


Рис. 4. Разрушение алюминия АД-1 при $\Delta P/\rho = 10,9 \text{ (м/с)}^2 = \text{const}$

1. М45 95% $\rho = 2,83 \text{ г/см}^3$, $c = 1230 \text{ м/с}$
2. М45 75% $\rho = 2,45 \text{ г/см}^3$, $c = 1300 \text{ м/с}$
3. М45 100% $\rho = 3,08 \text{ г/см}^3$, $c = 1230 \text{ м/с}$
4. М45 50% $\rho = 1,96 \text{ г/см}^3$, $c = 1370 \text{ м/с}$
5. H_3PO_4 50% $\rho = 1,43 \text{ г/см}^3$, $c = 1540 \text{ м/с}$
6. Водопроводная вода с газосодержанием 2% $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, $c = 1420 \text{ м/с}$

Жидкость М45 – это раствор $\text{Ba}(\text{CdI}_4)$ [13].

Видно, что с увеличением плотности жидкости кавитационная эрозия усиливается в разы.

Любопытные корреляции получились при рассмотрении влияния акустической жесткости жидкости ($\rho_0 c$).

На этой же установке определено влияние температуры жидкости, и её газосодержания.

В результате исследований:

- научились управлять воздействием кавитации;
- стало возможным в короткие сроки определять эффективность предложений направленных на ослабление кавитационной эрозии за счет изменения режима эксплуатации, очертаний проточной части и применения материалов с различной кавитационной стойкостью в различных жидкостях

На практическом примере можно показать, как небольшое уменьшение частоты вращения машины, при проектировании на заданные параметры Q , H и Δh , приводит к

серьёзному снижению скорости эрозии и существенному увеличению ресурса. При этом немного увеличиваются габариты и вес изделия.

Заключение

С помощью лаковых покрытий, чувствительных к разрушающему воздействию кавитации, стало возможно после испытаний на насосном стенде, имеющем системы измерения и поддержания постоянным газосодержания воды, сравнивать и определять интенсивность воздействия кавитации на элементы проточной части насоса в разных режимах по подаче и числу кавитации. При этом насос должен иметь привод для работы с переменной частотой вращения.

Испытаниями в ультразвуковой магнитострикционной установке найдены коэффициенты относительной стойкости материалов в условиях незначительной роли коррозии в кавитационном разрушении. Впервые испытания материалов при ультразвуковой кавитации выполнялись с постоянным числом кавитации, что обеспечивало равномерность разрушений по рабочему торцу образца материала, и при разных интенсивностях воздействия кавитации.

Подтверждено, что эти коэффициенты остаются теми же и в условиях гидродинамической кавитации с разной интенсивностью.

Впервые публикуется сводная таблица относительной кавитационной стойкости большой группы материалов. В испытаниях использовались образцы из проката и из образцов-свидетелей бронзы ОЦ 8-4 и ОЦСН 3-7-51, отлитых при изготовлении рабочих колёс серийных судовых насосов. Разброс стойкости литья получился существенным. Рекордной кавитационной стойкостью обладает сплав титана с никелем.

Создана методика ускоренного определения кавитационной стойкости материалов, склонных к коррозии в пресной и морской воде. Показано, насколько из-за коррозии снижается относительная кавитационная стойкость таких материалов при ослаблении механического воздействия кавитации.

Оценено влияние плотности, акустической жесткости и газосодержания нескольких жидкостей на интенсивность кавитационной эрозии. Определено и выявлено влияние температуры, причём, в качестве температурного параметра впервые использована шкала разности между температурой кипения и замерзания нескольких жидкостей. Результаты получены из опытов в условиях ультразвуковой кавитации.

Прогноз развития кавитационной эрозии составлялся по результатам испытаний образцов из быстроразрушающихся от кавитации индия и сплава свинца с висмутом, смонтированных в проточную часть центробежного насоса. Указанные материалы для этих целей применялись впервые.

Удовлетворительное совпадение прогноза с результатами разрушения было получено в тех же условиях на образцах из алюминия и бронзы ОЦСН 3-7-5-1.

При определенной процедуре испытаний стало возможным приближенно прогнозировать скорость разрушения материала проточной части по результатам испытаний насоса ТОЛЬКО с помощью лаковых покрытий [18].

Попытки получения аналогичных прогнозов с помощью теоретических методов пока к успеху не привели.

Многие затронутые моменты требуют дальнейшего уточнения. К сожалению, уникальные экспериментальные установки больше не существуют. Однако, полученные результаты до сих пор осмысляются. Для этого используются данные из указанного ниже списка литературы.

Выражаю благодарность А.В. Лебедеву и А.Е. Шеиной за неоценимую помощь в подготовке презентации к докладу и написанию данной статьи.

Список литературы

1. Волин В.Э., Луначи Э.Д. Ускоренное определение кавитационно – эрозионных качеств гидромашин с помощью легко разрушаемых лаковых покрытий // Труды ВНИИГидромаша / Гидромашиностроение. М.: Энергия. 1968. Вып. 37. С. 122 – 131
2. Волин В.Э. Теоретические предпосылки кавитационной долговечности гидромашин // Труды ВНИИГидромаша / Гидромашиностроение. М.: Энергия. 1969. Вып. 39. С. 3 – 18
3. Волин В.Э. О прогнозировании скорости кавитационной эрозии материалов // Труды акустического института. М.: АКИН. 1969. Вып. VII. С. 165 - 170.
4. Волин В.Э., Самохин И.Н., Семенов И.Е. Кавитационная стойкость графитовых материалов // Цветные металлы. М.: ИД "Руда и Металлы". 1970. №3.
5. Луначи Э.Д., Войташевский Д.А. Метод сравнения режимов работы лопастных гидромашин по опасности кавитационной эрозии // Труды ВНИИГидромаша / Гидромашиностроение. М.: Энергия. 1971. Вып. 42. С. 219 – 238
6. Волин В.Э., Герасимов Б.И., Гринберг А.Я. Прогнозирование кавитационно – эрозионной прочности металлических облицовок по результатам ускоренных лабораторных испытаний материалов // Сборник. Тематическое координационное совещание по гидравлике высоконапорных водосбросных сооружений. Л.: Энергия. 1973. С. 56 – 58
7. Волин В.Э., Герасимов Б.И., Гринберг А.Я. Новая методика определения и оценки сравнительной кавитационно – эрозионной прочности материалов с помощью магнитоэрозионной лабораторной установке. // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия. 1974. Вып. 98. С. 65 – 67
8. Волин В.Э., Гринберг А.Я. Влияние электрохимической коррозии на скорость кавитационной эрозии материалов // Труды ВНИИГидромаша / Гидромашиностроение. М.: Энергия. 1975. Вып. 46. С. 44-53

9. Волин В.Э., Луначи Э.Д. Исследование амплитудного спектра разрушающих кавитационных нагрузок // Сборник докладов 8-го симпозиума МАГИ. (6-9 сентября 1976. Секция по гидромашинам, оборудованию и кавитации). Л.: ВНИИГ. 1976.
10. Аношина Л.А., Волин В.Э., Гринберг А.Я., Захарова Н.Н., Окунев Ю.К. Кавитационная стойкость сплавов на основе титана // Труды ВНИИГидромаша / Исследование и расчёт гидромашин. М.: Энергия. 1978. С. 135 – 138
11. Волин В.Э., Луначи Э.Д. Ударные эрозионные нагрузки при гидродинамической и ультразвуковой кавитации // Труды ВНИИГидромаша / Исследование и расчёт гидромашин. М.: Энергия. 1978. С. 48 – 58
12. Красноярский В.В., Гринберг А.Я., Волин В.Э., Шевчук Л.М. Коррозионно – электрохимическое поведение стали 35 в условиях кавитации // Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. 1979. Вып. 1.
13. Гринберг А.Я., Луначи Э.Д., Петрова С.С. Пересчёт кавитационных разрушений материалов с воды на другие жидкости // Сборник научных трудов ВНИИГидромаша / Проблемы насосостроения и их решение. М.: ВНИИГидромаш. 1989. С. 30 - 36
14. Войташевский Д.А. К расчёту сил и давлений удара водяных капель и струи по металлической поверхности // Труды ВНИИГидромаша / Повышение технического уровня центробежных насосов. М.: ВНИИГидромаш. 1980. С. 56 – 76
15. Герасимов Б.И. Использование магнитострикционной установки для получения характеристик сравнительной кавитационной стойкости материалов. // Энергомашиностроение. М.: Машиностроение. 1980. № 11. С. 29-31
16. Войташевский Д.А. Приближенный учёт упругости препятствия при ударе жидких капель и струй. // Труды ВНИИГидромаша. / Совершенствование насосного оборудования. М.: ВНИИГидромаш. 1982. С. 29 – 42
17. Луначи Э.Д., Гринберг А.Я., Барановская Е.Ф., Волин В.Э., Бедев В.Д. Использование легкоразрушающихся материалов при ускоренных испытаниях насосов на кавитационную долговечность. // Труды ВНИИГидромаша. / Совершенствование насосного оборудования. М.: Изд-во ВНИИГидромаша. 1982. С. 58 – 73
18. Барановская Е.Ф., Волин В.Э., Гринберг А.Я., Луначи Э.Д. О связи кавитационного износа в лопастных насосах с разрушением лаковых покрытий // Седьмая научно – техническая конференция, посвященная 112-й годовщине со дня рождения Владимира Ильича Ленина. Калужское областное правление НТО Машпром. Калуга: Калужский филиал МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1982. С. 105 – 107
19. Волин В.Э., Гринберг А.Я., Луначи Э.Д. Прогнозирование кавитационных разрушений в лопастных насосах // Седьмая научно – техническая конференция, посвященная 112-й годовщине со дня рождения Владимира Ильича Ленина. Калужское областное правление НТО Машпром. Калуга: Калужский филиал МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1982. С. 107 – 108

20. РД РТМ 26-06-46-83. Насосы динамические. Метод ускоренных испытаний на кавитационно – эрозионную долговечность (взамен РТМ 26-06-46-79) / Руководящий технический материал. ЗАО НПО Гидромаш. М.: ВНИИГидромаш. 1983.
21. Луначи Э.Д., Гринберг А.Я., Волин В.Э. Определение срока службы оборудования, эксплуатируемого в условиях кавитации // Тезисы докладов / Всесоюзный научный симпозиум «Акустическая кавитация и применение ультразвука в химической технологии». 26 февраля - 1 марта 1985 г. Пос. Славское (Львов. обл.) 1985. С. 121
22. Шалобасов И.А., Гринберг А.Я., Михайлов В.А., Луначи Э.Д., Коломцев Ю.В. Прогнозирование кавитационного изнашивания энергетического оборудования // Теплоэнергетика. М.: Энергоатомиздат. 1986. №5. С. 40-45