

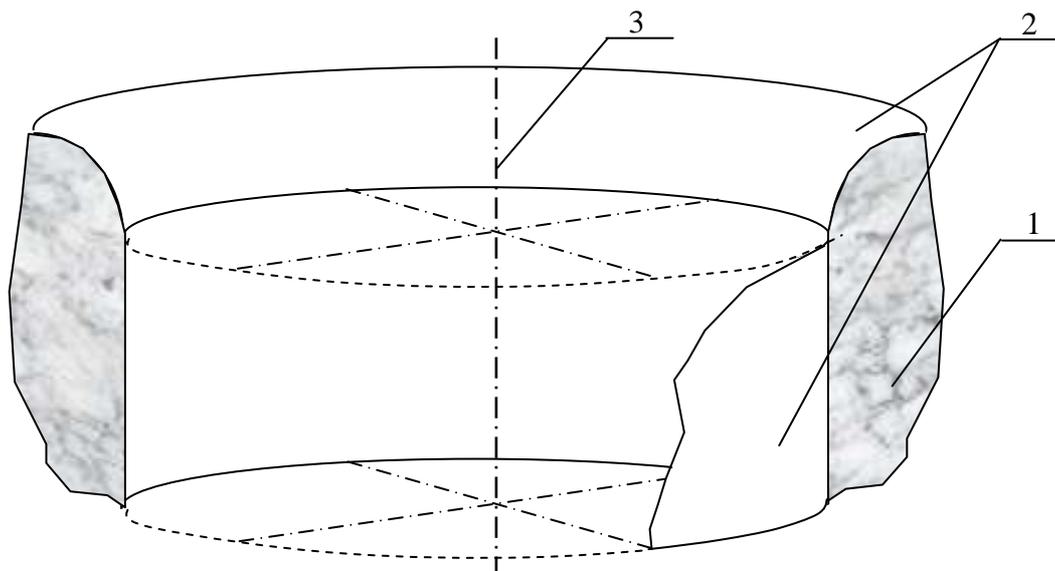
## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «МЕТАЛЛ – БЕТОН»

Викладено методику оцінки стану захисного покриття робочих камер гідравлічних турбін з використанням віброакустичного методу. Наведено приклади виявлення дефектів покриття.

## USING OF THE VIBRATING-ACOUSTIC METHOD FOR STATE VALUATION OF SYSTEM "METAL – CONCRETE"

The methodology of an estimation of a condition of a sheeting of working chambers of hydraulic turbines with use vibrating-acoustic method is recounted. The examples of coating defects identification are given.

Гидроэнергетика является одной из важнейших отраслей народного хозяйства Украины. Несмотря на постепенное увеличение производства электроэнергии атомными станциями, значение гидроэлектростанций для утверждения энергетической независимости государства как сейчас, так и в обозримом будущем очень велико. Следует, однако, учитывать, что срок эксплуатации основных сооружений на многих гидроэлектростанциях исчисляется десятками лет. Наиболее уязвимыми элементами являются бетонные и железобетонные конструкции, служащие для подачи воды на рабочие агрегаты. На них постоянно воздействует вибрация от работающей турбины, балансировка которой никогда не является идеальной. Контактующие с движущимся водным потоком поверхности подвергаются кавитации. Особенно интенсивно указанные процессы проявляются в камерах рабочих колес гидроагрегатов (рис. 1).



1 – железобетонная конструкция, 2 – защитное стальное покрытие, 3 – ось гидроагрегата

Рис.1 – Схематическая конструкция камеры рабочего колеса гидроагрегата

Характерная величина диаметра камеры составляет порядка 7 м. С учетом значительных динамических нагрузок на поверхность камеры, в районе расположения лопастей турбины она обшивается стальным листом толщиной порядка 20 мм. Высота обшитого участка составляет около 4 м. Технология установки защитного металлического слоя предусматривает сварку отдельных листов с тщательной проваркой и шлифовкой стыковочных швов. Тем не менее, идеальной герметичности швов получить не удастся. Постоянное гидродинамическое воздействие приводит к расширению возникающего отверстия в металле и разрушению бетона в его окрестности. Постепенно под металлической обшивкой образуются полости, глубина которых достигает 0,3 м, а площадь может составлять несколько квадратных метров. Циклические динамические воздействия на металлическую обшивку, не имеющую уже жесткого контакта с бетоном, приводят к появлению в ней усталостных трещин.

При образовании в обшивке двух трещин, имеющих общую точку, создаются условия для изгиба ее фрагмента во внутреннюю часть камеры. При этом он может быть зацеплен лопастями турбины и оторван. Незащищенная металлом поверхность железобетона разрушается очень быстро.

Развития описанной ситуации можно избежать своевременным обнаружением полостей в бетоне под металлическим покрытием с их последующей цементацией.

Одним из эффективных методов неразрушающего контроля для выявления полостей под металлической оболочкой является виброакустический, обоснование которого дано в работе [1]. Принцип виброакустической диагностики заключается в предварительном возбуждении свободных колебаний путем нанесения одиночного удара и одновременной регистрации их параметров. Фактически определяется степень связи контролируемого участка с более глубинным слоем путем оценки его механической подвижности [2].

Для теоретической оценки колебательных процессов в системе «металл - бетон» служит модель, представленная на рис. 2.

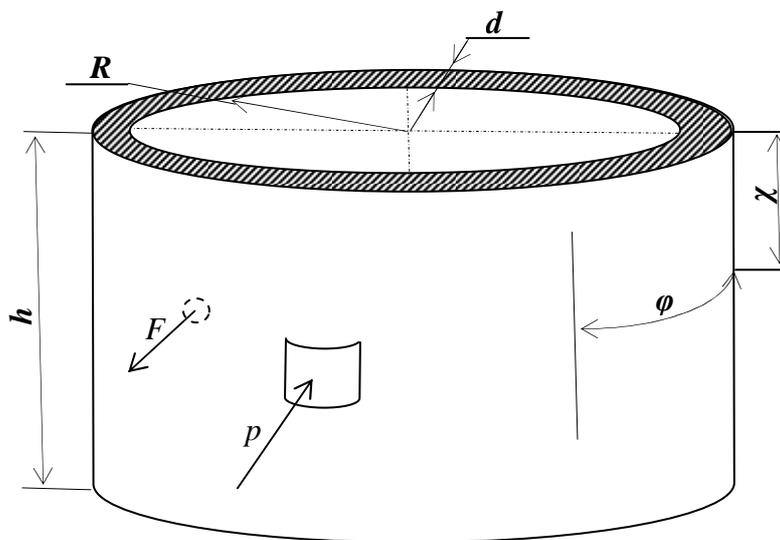


Рис. 2 – Модель цилиндрической оболочки с внешним гидростатическим давлением

Защитное покрытие камеры рабочего колеса моделируется цилиндрической оболочкой конечной высоты  $h$ . Внутренний радиус  $R$  оболочки намного больше толщины  $d$  ее стенок. Материал оболочки считается однородным с плотностью  $\rho$ , имеющим динамические модули: растяжения-сжатия  $E$  и модуль сдвига  $G$ . Внешнее давление  $p$  на оболочку предполагается гидростатическим и одинаковым по всей ее площади. Окружающая трубу среда предполагается оказывающей вязкое сопротивление колебательному процессу. При этом участки с более высокой плотностью  $\rho^*$  среды, соответствующие плотному контакту бетона с оболочкой, естественно характеризуются более высокими значениями параметра вязкости. Разжиженная среда в заоболочечных пустотах менее вязкая и в меньшей степени демпфирует свободные колебания цилиндрической поверхности.

В общем случае колебательный процесс незадемпфированной кольцеобразной оболочки описывается системой уравнений:

$$\frac{1}{Ed} \nabla^2 \nabla^2 \varphi - \nabla_k^2 \chi = 0; \quad (1)$$

$$\nabla_k^2 + D \nabla^2 \nabla^2 \chi - \rho d \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = 0,$$

где:  $\chi$  – компонента линейного перемещения по нормали к оси галереи;

$\varphi$  – компонента перемещения по дуге цилиндра;

$D = Ed^3/12(1-\nu^2)$  – цилиндрическая жесткость кольца;

$d$  – толщина защитного слоя.

Систему (1) можно привести к одному уравнению путем введения функции  $\Phi$ , определяемой соотношениями

$$\begin{aligned} \varphi &= Ed \nabla_k^2 \Phi. \\ \chi &= \nabla^4 \Phi; \end{aligned} \quad (2)$$

Упомянутое уравнение имеет вид

$$\nabla^2 \Phi = \frac{12}{d^2} (1-\nu^2) \nabla_k^2 (\nabla_k^2 \Phi) - \rho d \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = 0. \quad (3)$$

Для приведения уравнения к виду, адекватному рассматриваемой модели, необходимо принять во внимание следующие внешние силы:

гидростатическое давление  $p_1 = \rho^* gH$ ;

упругое сопротивление со стороны среды вокруг трубы  $p_2 = -k_y \rho^* c^* \partial \chi / \partial t$ ;

вязкое сопротивление окружающей трубу среды  $p_3 = -k_\delta \eta^* \partial \chi / \partial t$ .

Символ «\*» относится к параметрам окружающей трубу среды.  $k_y$  и  $k_\delta$  – коэффициенты пропорциональности.

Таким образом, преобразованное уравнение имеет вид

$$\nabla^2 \Phi = \frac{12}{d^2} (1 - \nu^2) \nabla_k^2 (\nabla_k^2 \Phi) - \rho d \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} - \rho d \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} - \rho^* g H + (k_y \rho^* c^* + k_g \eta^*) \frac{\partial \chi}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) распадается на несколько, описывающих различные типы колебаний. В общем виде каждый из типов колебаний описывается уравнением вида

$$A_{mn}(t) = A_{mn}^0 e^{-\delta_{mn} t} \sin(\omega_{mn} t + \theta_{mn}). \quad (5)$$

Точное определение выражений для амплитуд спектральных составляющих связано со значительными трудностями. В работах [3, 4] показано, что коэффициент затухания возрастает с увеличением вязкости  $\eta^*$  окружающей среды и ее плотности  $\rho^*$ . Следовательно, в зонах с заполненными водой полостями, где значения указанных параметров более низкие, чем для нормальной дренирующей толщи, выполняется условие

$$\int_0^{\tau} |A_a(t)| dt > \int_0^{\tau} |A_n(t)| dt, \quad (6)$$

где:  $A_a(t)$  – функция изменения динамической деформации после нанесения удара в контролируемой точке трубы на аномальном участке;

$A_n(t)$  – та же характеристика для нормального участка.

Определяемый параметр  $A(t)$  имеет размерность деформации. Он является более чувствительной характеристикой к аномалиям, чем частота, так как в нем комплексно учитываются два показателя: начальная деформация прогиба в точке нанесения удара и длительность колебательного процесса. Важным достоинством данного параметра является однозначность характера его изменения – увеличение в аномальных зонах.

В соответствии с результатами теоретических исследований для обнаружения дефектов в системе «металл – бетон» целесообразно использовать средства виброакустического контроля с первичными преобразователями регистрирующими виброремещение и определяющими в процессе аналоговой обработки принятого приемником сигнала усредненную за время продолжительности колебаний амплитудную характеристику сигнала. Наиболее подходящим для решения имеющейся задачи, исходя из перечисленных выше требований, является спектроанализатор параллельного действия с кратковременной аналоговой памятью ИСК-1 [5].

Предварительно перед выполнением диагностики камеры на ее поверхность наносят размерную сетку в виде вертикальных и горизонтальных линий с шагом в 1 м. Верхнюю границу разметки совмещают с вертикальным участком металлического покрытия. Пользуясь размеченной сетью, оболочку делят на отдельные участки площадью порядка 1 м<sup>2</sup>. Места неоднородностей (утолщение оболочки, наличие приваренных элементов, отверстия с диаметром, значительно превышающим толщину оболочки и т. п.) исключают из рассмотрения.

Точку приема колебаний располагают на расстоянии от контролируемого участка, в несколько раз превышающем его размеры (рис. 3).



Рис. 3 – Расположение точек возбуждения и приема колебаний на контролируемой поверхности металлической обшивки

При выполнении виброакустических исследований отсутствуют абсолютные универсальные значения критерия состояния покрытия. Их определяют из следующих соображений:

более высокие значения амплитуды колебаний на частоте максимума спектральной плотности сигнала соответствуют большей интенсивности отслоений; «нормальные», то есть имеющие незначительную степень отслоений обшивки от бетона участки, составляют, как правило, не менее половины общей площади контролируемой поверхности.

Для возбуждения колебаний необходимо применять устройство с массой бойка порядка 0,1 - 0,2 кг. При неизменном положении приемника в пределах выделенного участка следует нанести последовательную серию стабильных ударов с шагом около 0,2 м. Не документируя результатов, но отмечая зону увеличенного значения амплитуды колебаний, примерно определяют ее положение. Уменьшив шаг простукивания до 5-7 см, уточняют границу зоны отслоения обшивки от бетона и ориентировочно обозначают ее мелом, указав при этом, например, с помощью стрелок, в какую сторону от границы находится выявленная полость.

Процедуру по предыдущему пункту выполняют для смежных выделенных участков защитного металлического покрытия обязательно с использованием тех же средств контроля и по той же методике.

После завершения выполнения измерений на отдельных участках поверхности камеры стыкуют границы выделенных зон и оконтуривают полученную полость под обшивкой. Для более четкого выделения аномальной зоны рекомендуется выполнить ее грубую заштриховку мелом или краской. Данный этап работы иллюстрируется рис. 4



Рис.4 – Выделение зон отслоения защитной оболочки от железобетона по результатам виброакустической диагностики

По фактическому расположению выделенных в процессе диагностики участков выполняют их документирование с привязкой к местным ориентирам. Полученный документ является обоснованием объема работ по ликвидации полостей, а место их выполнения уже определено сохранившейся после диагностики разметкой зон.

С использованием указанной методики были диагностированы камеры рабочих колес гидротурбин на ДнепроГЭС-2, а также на Кременчугской ГЭС. Своевременное выполнение ремонтных работ по результатам диагностики обеспечило последующую безаварийную работу гидроагрегатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2133283 Франции, МКВ<sup>5</sup> E21C 39/00. Methode et dispositif de classification à partir de sondages par percussion applicable notamment à la reconnaissance des dalles et blocs dangenz dans les mines; G. de Montille (Фр.); Agence National de valorisation de la rechnerche (Фр.) № 7113320; Заявлено 15.04.71; Оpubл. 24.11.72.
2. ИСО 7626-5-99. Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. Измерения, использующие ударное возбуждение возбудителем, не присоединенным к конструкции.
3. Гонткевич В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек. Справочник. / В.С. Гонткевич – К.: Наукова думка, 1964. – 287 с.
4. Григолюк Э.И. Устойчивость и колебания трехслойных оболочек / Э.И. Григолюк, П.П. Чулков – М.: Машиностроение, 1973. – 172 с.
5. Яланский А.А. Теоретические и аппаратурные разработки виброволнового контроля строительных конструкций и материалов. /А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, В.Н. Сергиенко В.Н., В.Б.Усаченко. // Тезисы докладов IV-ой международной научной конференции «Материалы для строительных конструкций». – Днепропетровск, 1996 – С. 73.