

Б.М. Усаченко, Н.М. Герасимович, С.В. Цушко,
Ю.А. Бисовецкий, В.Н. Сергиенко

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Розглянуто загальні методичні принципи віброакустичного контролю стандартних бетонних конструкцій гідротехнічних споруд. Подано відомості про обробку даних контролю.

THE VIBRATING-ACOUSTIC CONTROL OF CONCRETE CONSTRUCTIONS OF HYDRAULIC ENGINEERING STRUCTURE'S

The general methodical principles of the vibrating-acoustic control of standard concrete constructions of hydraulic engineering structures are considered. The information's on data processing of the control are given.

Середина прошлого века характеризовалась интенсивным строительством гидротехнических сооружений на территории Украины. В настоящее время срок эксплуатации многих из них составляет 40 – 50 лет. Отрицательные тенденции в экономике Украине в течение последних двух десятков лет не позволяли осуществлять в полном объеме комплекс ремонтно-восстановительных мероприятий. В результате этого техническое состояние многих объектов не соответствует требованиям их эффективной и безопасной эксплуатации, поэтому остро ставится задача повышения их эксплуатационной надежности [1, 2].

Основой гидротехнических сооружений являются бетонные и железобетонные конструкции. Размеры отдельных неделимых элементов могут исчисляться десятками метров. Длительное взаимодействие с окружающей средой, а также статические и динамические нагрузки приводят к постепенному снижению их эксплуатационной надежности. Действующие рекомендации ориентированы преимущественно на визуальные наблюдения [3, 4]. Однако, лишь некоторые из видов нарушенности могут быть обнаружены визуальным путем. Не выявленные вовремя скрытые дефекты могут стать причиной возникновения аварийных ситуаций. В свете сказанного, проблема оперативного контроля состояния внутренней структуры бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических объектов является весьма актуальной.

Известен метод оценки состояния элементов гидротехнических сооружений по измерению параметров их вибрации, возникающей вследствие работы мощных механизмов [5]. Однако указанный метод неприменим при отсутствии постоянного источника возбуждения вибрации.

Более широкие возможности открывает использование виброакустического метода с ударным возбуждением контролируемого элемента. Первоначальное применение данный метод получил в горной промышленности при диагностике состояния закрепленных и незакрепленных подземных сооружений [6, 7].

Виброакустический метод является одной из разновидностей неразрушающего низкочастотного акустического контроля. Он основан на анализе параметров пакета затухающих колебаний конструкции, возбужденной одиночным ударом.

Для оценки состояния конструкции используются следующие параметры:

- начальная и средняя за интервал анализа сигнала амплитуда;
- частота максимума спектральной плотности;
- продолжительность пакета свободных затухающих колебаний.

Основными категориями дефектов конструкций, которые могут быть выявлены с помощью виброакустического метода, являются:

- внутренние нарушения сплошности (трещины, расслоения, каверны);
- полости в прилегающей к данной конструкции податливой среде, как воздушные, так и заполненные флюидами;
- ослабленные стыки между смежными элементами конструкции.

Для ответственных объектов, какими являются доковые части сооружений, водопроводящие галереи под транспортными магистралями, водосбросные сооружения, потерны, контроль осуществляют в пределах всей доступной поверхности.

В некоторых случаях площадь поверхности контролируемых конструкций измеряется десятками тысяч квадратных метров. Примерами может служить: противофильтрационное покрытие на низовом откосе плотин крупных водохранилищ, бетонная обделка откосов магистральных и водоотводящих каналов, аванкамер. В подобных случаях виброакустическую диагностику проводят выборочно, базируясь на результатах предварительно проведенного визуального осмотра. Предпосылками к обследованию участков поверхности виброакустическим методом являются:

- возникновение крупных трещин на поверхности конструкции;
- возникновение «мозаики» по бетону;
- выпучивание или прогиб плоских конструкций;
- появление увлажненных участков в зонах фильтрации;
- «бунение» конструкции при нанесении по ней удара.

Любой обследуемый объект представляет собой иерархическую систему, в которой состояние звена более высокого уровня определяется степенью нарушения входящих в его структуру элементов. Виброакустический метод, как и другие методы неразрушающего контроля, ориентирован на определенный конструктивный уровень, признаками которого являются:

- монолитность исследуемой конструкции (проектная);
- соизмеримость размеров объекта, хотя бы в одном измерении, с длиной волны звукового диапазона в его материале;
- возможность идеализации в виде сравнительно простой механической модели;
- минимальное количество внешних связей.

В пределах указанного уровня контролируемые конструкции можно классифицировать по различным признакам: по геометрическим размерам, по материалу, по выполняемым функциям и т. п. Наиболее приемлемой для обоснования методики контроля и интерпретации полученных результатов служит классификация, в основу которой положена геометрическая форма исследуемых

конструкций. При этом первичным признаком служит соотношение размеров объекта в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Размерность объекта определяется количеством направлений, в которых его размеры на порядок и более превышают соответствующие значения для оставшихся направлений. Предполагается, что объекты в общем случае имеют форму прямоугольного параллелепипеда, имеющего длину, ширину и высоту. К основным объектам определенной размерности примыкают топологически подобные им, полученные трансформацией плоских поверхностей в криволинейные, при условии, что радиус кривизны линии в заданном сечении намного больше размеров конструкции в направлении радиус-вектора. Указанная классификация представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Классификация объектов виброакустической диагностики по геометрической форме

Размерность конструкции	Базовые объекты	Топологически подобные объекты
одномерные	колонны, балки, ленточные фундаменты	арки
двумерные	плоские плиты	цилиндрические и сферические оболочки
трехмерные	прямоугольные объемные фундаменты, массивные наземные бетонные конструкции	опоры с закруглениями на углах

Для каждого из базовых объектов существуют свои особенности возникновения упругих колебаний, а также присущие им типы дефектов, которые можно выявить при анализе пакета колебаний.

Наиболее типичными одномерными конструкциями на гидротехнических сооружениях являются колонны. К основным дефектам колонн относятся:

- уменьшение жесткости, вызванное снижением прочностных и упругих свойств бетона и частичной потерей поперечного сечения;
- нарушение целостности конструкции за счет появления в ней видимых и скрытых макротрещин;
- ухудшение жесткости соединения с основанием (перекрытием).

Наиболее простой математической моделью одномерного объекта типа колонны является упругий стержень, защемленный на концах. При нанесении удара в направлении, перпендикулярном оси колонны, возникают изгибные колебания. Основная частота колебаний данного типа при указанных граничных условиях определяется согласно [8] из выражения

$$f_1 = \frac{22.4}{l^2} \sqrt{\frac{Ej}{\mu}}, \quad (1)$$

где E – приведенный модуль упругости материала колонны; j – момент инерции поперечного сечения колонны, относительно ее нейтральной оси, перпендикулярной к плоскости колебаний; μ – масса единицы длины колонны.

Основным варьируемым параметром в выражении (1) является приведенный модуль упругости E материала. Ухудшение свойств материала колонны связано с уменьшением значения указанного параметра и, соответственно, с уменьшением основной частоты колебаний.

Изменение граничных условий также приводит к изменению основной частоты. В частности, уменьшение жесткости закрепления колонны на одном или на обоих концах приводит к снижению основной частоты.

Наличие макротрещин в материале создает в монолитной ранее колонне отдельности, имеющие свои резонансные частоты, как правило, существенно выше основной.

Проведенный анализ идеализированной одномерной модели показал, что эффективным вариантом виброакустического контроля колонн может быть спектральный анализ пакета затухающих колебаний. Использование указанного варианта эффективно лишь при наличии большого числа однотипных конструкций. В предположении, что большинство колонн имеет нормальное состояние при их диагностике получают усредненный спектр, который в дальнейшем принимается в качестве эталонного. Существенные отклонения в спектральном составе от эталона свидетельствуют о наличии дефектов, суть которых определяется по рассмотренным ранее критериям.

Для локализации дефектных участков колонны нанесение удара осуществляют с шагом, равным 2-3 толщины колонны. Приемник вибрации можно расположить в одной точке на поверхности колонны. Исследования показали, что механический прижим к поверхности исследуемой конструкции не всегда обеспечивает приемлемое качество диагностики. Наилучшие результаты получают при закреплении приемника на колонне быстротвердеющей смесью, например водным раствором алебаstra.

Из двумерных конструкций наибольшее распространение получили прямоугольные плиты, толщина h , которых значительно меньше линейных размеров a и b в плане. В практике гидротехнического строительства жесткость материала температурных швов между плитами значительно ниже жесткости самого материала плит. В этом случае контур плиты можно считать незащемленным. Без учета демпфирующих свойств подстилающей толщи основная частота свободных колебаний плиты, определяется суперпозицией двух независимых серий изгибных колебаний и согласно [8] составляет

$$f_{11} = \frac{\pi^2(a^2 + b^2)h}{a^2b^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала плиты, ν – динамический коэффициент Пуассона.

Плотный контакт плиты с основанием, которым в большинстве случаев является грунтовая толща, эквивалентен повышению толщины плиты, поскольку

в колебательном процессе участвует и присоединенная масса слоя грунта, непосредственно контактирующего с плитой. Исходя из выражения (2), при плотном контакте плиты с грунтовым массивом основная частота будет выше, чем для участков с пустотами под плитой. Кроме этого, вследствие улучшения условий переноса механической энергии в прилегающую среду амплитуда колебаний плиты будет меньше, чем при наличии зазора.

Таким образом, спектральный анализ пакета свободных колебаний плиты позволяет выделить полости за ней по двум критериальным признакам: понижению частоты максимума спектральной плотности колебаний и повышению их амплитуды. Необходимым условием эффективного использования данного варианта является постоянство размеров плит на всем участке контроля или, в крайнем случае, их толщины h .

При практическом контроле точки удара располагают на поверхности плиты по квадратной сетке. Шаг сетки определяет детальность контроля и может колебаться от 1 до 5 м. При выявлении участка с существенными отклонениями значений параметров свободных колебаний сетку сгущают для более точного оконтуривания аномальной зоны (рис. 1).

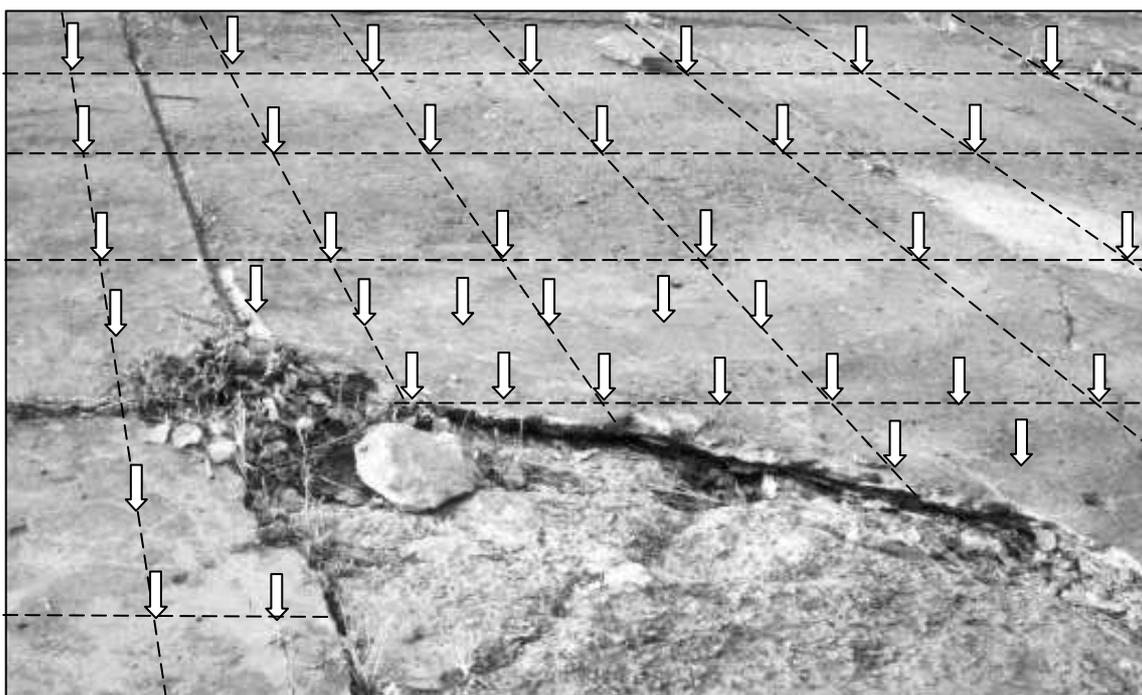


Рис. 1 – Схема расположения точек удара для оконтуривания полостей под горизонтальными плитами

Базу s между точкой возбуждения колебаний и точкой их приема выбирают в 3 - 5 раз больше толщины h плиты.

При выполнении обзорного контроля протяженных участков большой площади с целью поиска крупных пустот под бетонным покрытием измерения целесообразно выполнять по серии параллельных профилей. Расположение профилей и расстояние между ними определяют в соответствии со схемой укладки

плит. Вдоль каждого из профилей выполняют разбивку с постоянным шагом, составляющим от 2 до 5 м. Удар наносят в указанных точках разбивки, а прием осуществляют в соседних с ними точках. При этом точки удара и приема должны находиться в пределах одной плиты. Выполнение контроля по указанной схеме иллюстрируется рис. 2.



Рис. 2 – Выполнение виброакустической диагностики по горизонтальному профилю на береговом откосе водохранилища, укрепленном бетонным покрытием

Наиболее сложной является диагностика объемных объектов. Характерными нарушениями объемной бетонной конструкции являются крупные внутренние трещины, делящие ее на отдельные блоки. Трещины могут выходить на поверхность конструкции, но по их внешнему виду нельзя определить уходят они в глубину или нет и каким образом наклонены к поверхности. Общую оценку трещиноватости объемной конструкции также позволяет дать виброакустический метод.

Теоретический анализ колебательных процессов в объемных моделях даже простой формы весьма сложен и на практике поступают иным образом. На поверхности объемной конструкции выполняют разбивку по сетке с шагом от 2 до 5 м. В удобном месте стационарно закрепляют высокочувствительный приемник колебаний. С помощью мощного возбудителя наносят удары в выделенных точках поверхности конструкции и фиксируют зарегистрированные приемником параметры колебаний.

В качестве примера на рис. 3 представлена фотография диагностированной мостовой бетонной опоры.

Вертикальный шаг сетки для представленной на рис. 3 опоры определяется высотой заходок бетона при его укладке. Горизонтальный шаг получен путем разметки по контуру верхней площадки опоры и составляет 2 м.

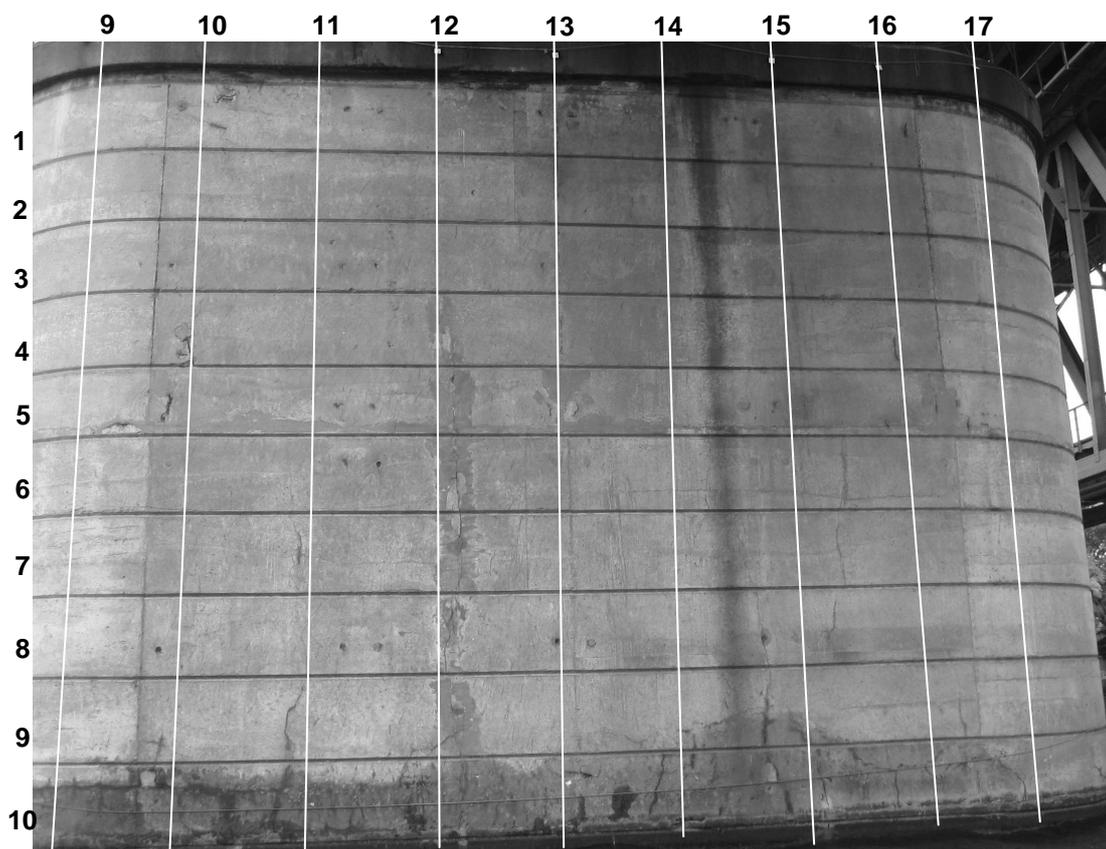
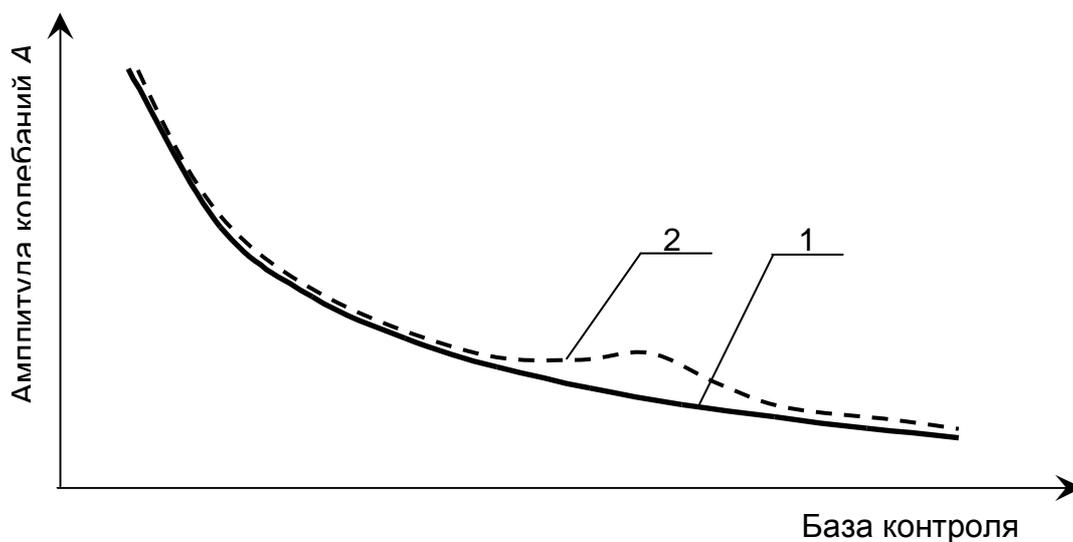


Рис. 3 – Схема сетки виброакустического контроля на поверхности мостовой опоры

При выполнении диагностики с верхней площадки вдоль соответствующей вертикальной линии опускают тяжелый груз сферической формы. С катера, расположенного возле опоры, груз оттягивают веревкой от ее поверхности, а затем веревку резко отпускают, нанося, таким образом, удар. Выполнение ударов в подводной части опоры выполняют водолазы. Приемник колебаний и регистрирующее средство располагают на верхней площадке опоры.

Принцип интерпретации полученных результатов базируется на экспериментально установленном факте, что в однородных ненарушенных конструкциях с плавными формами поверхности по мере возрастания базы между точками возбуждения и приема колебаний наблюдается плавное снижение по нелинейному закону амплитуды пакета колебаний. Наличие аномалии в виде выделенного трещинами объемного участка конструкции приводит к нарушению нормальной картины затухания колебаний (рис. 4).

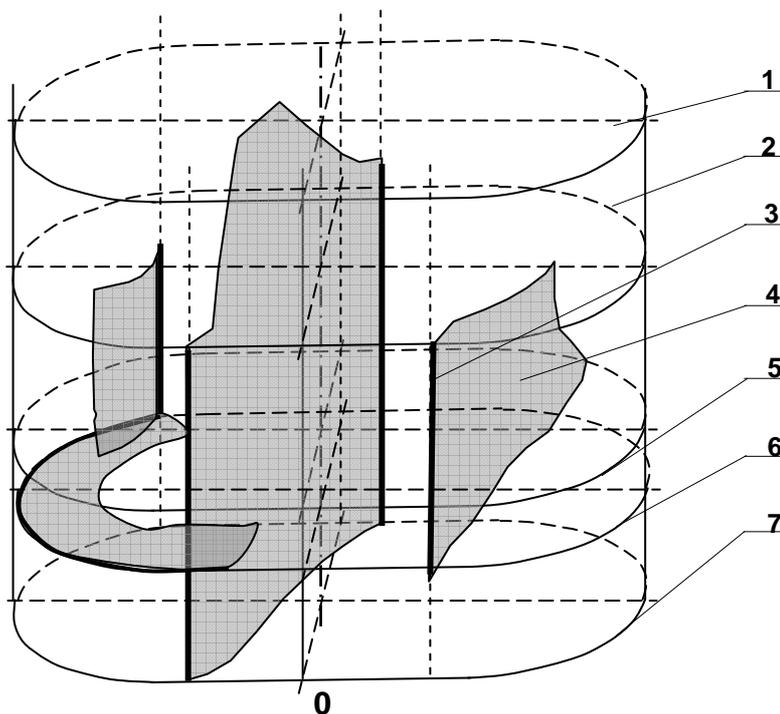
Отслеживать изменение амплитуды проще по вертикальным профилям, последовательно перемещая точку удара сверху вниз. На каждом из профилей выделяют границы линейного аномальных участков. Имея данные по всем профилям, выделяют аномальные зоны на всей обследованной поверхности. С учетом полученных путем виброакустической диагностики результатов и визуально наблюдаемого положения трещин на поверхности объекта выполняют построение наиболее вероятной картины их расположения во внутренней части конструкции.



1 – монолитная конструкция, 2 – нарушенная конструкция

Рис. 4 – Зависимость амплитуды вибрации в точке приема от базы контроля:

В качестве иллюстрации на рис. 5 приведена объемная модель уже упоминаемой мостовой опоры, построенная по результатам вибродиагностики.



1 - верхняя плоскость опоры, 2 - усредненная граница верхнего конца вертикальных трещин на поверхности, 3- выход трещин на внешнюю поверхность опоры, 4 - прогнозная поверхность трещин в теле опоры, 5 - граница водной поверхности, 6 - плоскость расположения горизонтальной трещины, 7 – нижняя граница опоры.

Рис. 5 – Объемная модель опоры с наличием внутренних трещин

Обработка и анализ полученных результатов показали, что нижняя часть опоры рассечена крупной вертикальной трещиной практически напополам. Более мелкие вертикальные трещины уходят глубоко в тело опоры, но не пересекают ее целиком. В подводной части выявлена также горизонтальная трещина на границе смежных заходок, соединяющаяся с основной вертикальной. Таким образом, опору уже нельзя считать монолитной конструкцией и созданы предпосылки для формирования в ней крупноблочной структуры.

Обследование гидротехнических объектов предполагает использование комплекса методов. Как правило, выполнению измерений предшествует ознакомление с технической документацией и предварительный визуальный осмотр объекта. На этом этапе определяется перечень конструкций, для оценки состояния которых может быть использован виброакустический метод. В дальнейшем происходит классификация конструкций в соответствии с табл. 1, а затем внутри каждого класса выделяют группы однородных объектов, подбирают под их конкретные характеристики оборудование, а также определяют методические особенности контроля и критерии оценки состояния объектов данной группы.

Использование виброакустического метода позволяет оконтурить границы нарушенных зон в конструкциях, но не может дать количественных показателей, важных для выполнения ремонтных работ (например, глубины полости в грунтовой толще за бетонной стеной подземного сооружения). Поэтому рекомендуется для уточнения результатов виброакустического контроля на участках выявленных аномалий выполнять проверку прямыми методами, например контрольным бурением.

С использованием изложенных методических рекомендаций выполнена диагностика бетонного покрытия водохранилищ Днепродзержинской, Каневской, Кременчугской и Киевской ГЭС, отводящего канала и щитовой стенки Днепро-ГЭС, водовода на Ташлыкской ГАЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассовский В.Л., Бальбін В.Ю., Бісовецький Ю.А. Проблеми та перспективи розвитку автоматизації контролю безпеки гідротехнічних споруд // Гідроенергетика України. – 2004. - № 2. – С. 32-34.
2. Поташник С.Д., Рассовский В.Л. II-й етап реконструкції ГЕС – основа розвитку гідроенергетики України // Гідроенергетика України. – 2005. - № 4. – С. 8-17.
3. Рекомендации по анализу данных и контролю состояния водосбросных сооружений и нижних бьефов гидроузлов П75-2000. - Санкт-Петербург, 2000. – 26 с.
4. Рекомендации по выбору диагностических параметров, контролирующих состояние бетонных плотин П82-2001/ВНИИГ.- Санкт-Петербург, 2001. – 32 с.
5. Рекомендации по натурным исследованиям и постоянным наблюдениям за вибрацией гидротехнических сооружений электростанций П75-2000. - Санкт-Петербург, 2000. – 28 с.
6. Ямщиков В.С., Бауков Ю.Н., Сидоров Е.Е. Горная геофизика. Виброакустический метод. – М.: МГИ. – 126 с.
7. Методическое пособие по комплексной геофизической диагностике породного массива и подземных геотехнических систем. – Днепропетровск: ЧМП «Экономика», 2004. – 75 с.
8. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1988. – 559 с.