

УДК 629.035.4

А.Ю. Бауков

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ
СООРУЖЕНИЙ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИИ ИХ РЕМОНТА НА ОСНОВЕ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Устойчивое состояние любого подземного сооружения напрямую зависит от поведения окружающих его грунтов. Малейшие изменения в их свойствах могут в значительной степени повлиять на целостность и эксплуатационную надежность сооружения.

Одним из основных видов изменений естественного состояния грунтового массива, влияющих на устойчивость подземного сооружения, можно назвать нарушение равномерного распределения давления на контакте грунт-обделка вследствие образования зон разуплотнения, полостей и др. дефектов в грунтовом массиве. Такое нарушение может приводить к возникновению опасных деформаций в сооружении, и как следствие, дефектов внутри его конструктивных элементов.

Отдельно стоит отметить, что большинство подземных строительных конструкций являются многослойными, особенно это относится к днищам сооружений. В таких конструкциях может наблюдаться от трех до пяти слоев различной толщины. Причем сами отдельные слои, как правило, выполнены из различных материалов или же из бетона различного состава. При возникновении в этих конструкциях деформаций существует большая

вероятность образования дефектов связи между их отдельными слоями.

Для полного восстановления устойчивости подземного сооружения (в случае нарушения естественного состояния окружающих его грунтов) необходимо проведение мероприятий, направленных на ликвидацию дефектных участков как в самих грунтах (разуплотнения, полости, вымывы и т.д.), так и внутри конструкций сооружения (расслоения, трещины и т.д.).

В современной практике ремонтных работ наибольшее распространение при восстановлении эксплуатационной надежности и устойчивости подземных сооружений (в частности плоских многослойных конструкций подземных сооружений) получили методы инъектирования.

При инъектировании раствор под действием значительных давлений нагнетания проникает на некоторое расстояние в восстанавливаемую конструкцию либо в грунты основания по системе сообщающихся пустот, трещин, расслоений, каверн и т.д. При достижении равенства статических напряжений сдвига в инъектирующем материале, с одной стороны, и между этим материалом и стенками внутренних слоев конструкций, либо поверхностями конструкции и грунта, с другой стороны, дальнейшее проникание инъектирующего раствора в пустоты

прекращается. Радиус распространения раствора в конструкции или в грунте зависит от его вязкости, давления нагнетания, размеров и формы пустот и расслоений, а также вида заполняющего их материала. В состоянии покоя инъецирующий раствор постепенно схватывается и затвердевает. Качество инъецирования зависит от степени заполнения пустот инъецирующим раствором и его свойств.

Ремонтные работы плоских многослойных конструкций в подземных сооружениях подразделяются на:

- работы по ликвидации нарушения контактных условий между плоской конструкцией (днища, стены и т.д.) и грунтом основания;

- работы, направленные на восстановление эксплуатационной надежности путем ликвидации дефектов внутри самой плоской многослойной конструкции;

- работы по укреплению разуплотненных и нарушенных грунтов основания.

Основным недостатком всех вышеуказанных методов восстановления дефектов плоских многослойных конструкций подземных сооружений является опасность возникновения в самих конструкциях сильных деформаций, проявляющихся в виде вспучивания, трещинообразования и разрывов. Это связано с невозможностью в достаточной мере оценки фактических размеров и характера дефектов. Отсутствие полной информации о дефектном состоянии конструкций приводит к неоправданно большим затратам материала в одних случаях, и наоборот к недостаточно качественному инъецированию - в других. Все это связано с отсутствием информативных и в тоже время оперативных неразрушающих методов контроля плоских многослойных конструкций.

Существенной особенностью неразрушающего контроля в данных условиях является односторонний доступ к объекту со стороны упругого слоя, который, как правило, является экраняющим элементом, препятствующим проникновению энергии источника к нижней границе с основанием. Решение указанных задач при значительной толщине упругого слоя (40 см и более) наиболее эффективно, а иногда и единственно возможно с применением виброакустического метода [1].

Физическая сущность ударной модификации виброакустического метода заключается в возбуждении в слое над основанием изгибных колебаний. Если нарушений связи между слоем и основанием нет, то основание демпфирует изгибные колебания слоя и амплитуда их незначительна. Если под слоем имеется дефект связи достаточной площади, в участке слоя, расположенном над дефектом, будут возбуждаться изгибные моды. Амплитуда этих колебаний, в связи с их резонансной природой, в несколько раз превышает амплитуду колебаний бездефектного объекта контроля. Возбуждение изгибных колебаний в объекте контроля выполняется импульсным способом. В этом случае о наличии дефекта в полупространстве судят по результатам спектрального анализа отклика объекта контроля на ударное воздействие. Основной задачей при этом является выделение спектральных составляющих акустического импульса, соответствующих изгибным колебаниям.

Критическим недостатком виброакустического контроля многослойных конструкций (в случае их ударного возбуждения) возможно возникновение изгибных колебаний не только всего покрытия на участке, расположенном над дефектом основания, но и изгибных колебаний отдельных слоев различной толщины, образующихся

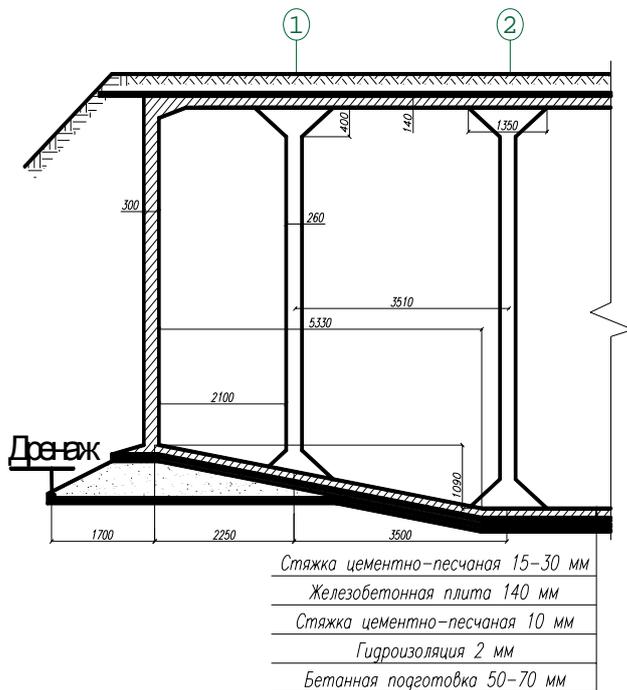


Рис. 1. Конструктивная схема строения резервуара

строения измерительного оборудования и обработки данных в условиях контроля многослойных конструкций.

Результаты этих исследований были также использованы при проведении ремонтно-восстановительных мероприятий на ряде объектов городского подземного строительства.

В качестве одного из примеров использования оптимизированного виброакустического контроля можно привести результаты исследований конструкций резервуара чистой воды №4-2 Северной водо-

внутри покрытия вследствие возникновения в нем внутренних дефектов. В этом случае спектр виброакустического импульса имеет весьма сложную структуру и идентификация соответствующих спектральных выбросов в общем спектре представляет значительную проблему [2]. Для возможности оптимизации метода, направленной на использование его при контроле многослойных железобетонных конструкций, были проведены компьютерные, модельные и экспериментальные исследования колебательных процессов в многослойных конструкциях при их ударном возбуждении. По результатам этих работ, отраженных в ряде публикаций ([2, 3, 7-9]), был разработан новый подход к системе возбуждения конструкции, оптимизирована методика проведения измерений на производственном объекте, выявлены принципы по-

проводной станции (г. Москва) на предварительном этапе работ по восстановлению его устойчивости.

Днище сооружения имеет многослойную структуру: монолитная железобетонная плита, мощностью 140 мм, уложена на бетонную подготовку толщиной 50-70 мм. Между ними выполнена гидроизоляционная мембрана – битумная мастика 5-10 мм (рис. 1). В результате различных процессов (вымывов и уплотнений вследствие намокания), произошедших за длительное время эксплуатации резервуара, в грунтах основания днища сооружения образовались значительные по размерам полости. Данные нарушения контактных условий привели к изменению нормального распределения давления между грунтовым массивом и обделкой сооружения. Это, в свою очередь, привело к возникнове-

нию серьезных деформаций в конструкциях резервуара, и как следствие образованию внутри днища значительных дефектов. Все вышеуказанные факторы явились причиной значительного снижения устойчивости сооружения и привели к необходимости

проведения ремонтно-восстановительных мероприятий. На стадии предварительного обследования, направленного на определение фактического распределения дефектов в конструкциях, наряду с другими видами контроля (визуальный осмотр, контрольное бурение, простукивание, георадиолокационные исследования) были проведены работы по виброакустическому исследованию конструкций резервуара.

Измерения выполнялись по методике виброакустических исследований [1] на площади около 6000 м² по сетке 2x2 м, размеры которой выбирались из требований оперативности проведения измерений. На участках возможного наличия дефекта проводились повторные детальные исследования по значительно более частой сетке (вплоть до 0,5x0,5 м). Измерения проводились с учетом особенностей проведения виброакустического контроля в условиях многослойных объектов с использованием компьютеризованной аппаратуры виброакустического контроля «Vibroset», позволяющей непосредственно на объекте получать в цифровом виде и визуализировать в реальном масштабе времени виброакустический импульс и его спектр, а также обладающей программным обеспечением для интерпретации экспериментальных данных. В комплект аппаратуры «Vibroset»

входит малогабаритный автономный переносной измерительный прибор, позволяющий регистрировать ви-

броакустические импульсы и с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье вычислять их спектр с сохранением результатов измерений и служебной оперативной информации в постоянном запоминающем устройстве. Результаты предварительной оперативной обработки экспериментальных данных визуализируются на световом табло прибора в виде спектра зарегистрированного импульса с указанием частот локальных экстремумов спектральной плотности, что позволяет получать качественные экспериментальные данные в каждой точке измерительной сетки контроля. Результаты измерений, полученные непосредственно на объекте, в дальнейшем подвергаются камеральной обработке и интерпретации по специальным программам, позволяющим детально анализировать виброакустические импульсы и их спектры и измерять их основные характеристики.

Анализ экспериментальных данных, полученных на этом объекте, показал, что в соответствии с внутренним состоянием обследованного объекта наблюдаются различные типы спектрограмм. В основную (по объему реализаций) группу входят спектрограммы (рис. 2, а) с ярко выраженным достаточно узким спектральным выбросом в высокочастотной области спектра (порядка 900-1100 Гц), соответствующие бездефектным участкам конструкции. Там, где отсутствует связь между бетонной конструкцией днища и песчаным основанием, в спектре имеет место локальный максимум в низкочастотной области в диапазоне 200-350 Гц и практически нет равноценных спектральных экстремумов выше этого диапазона (рис. 2, б). При наличии дефектов связи между внутренними слоями конструк-

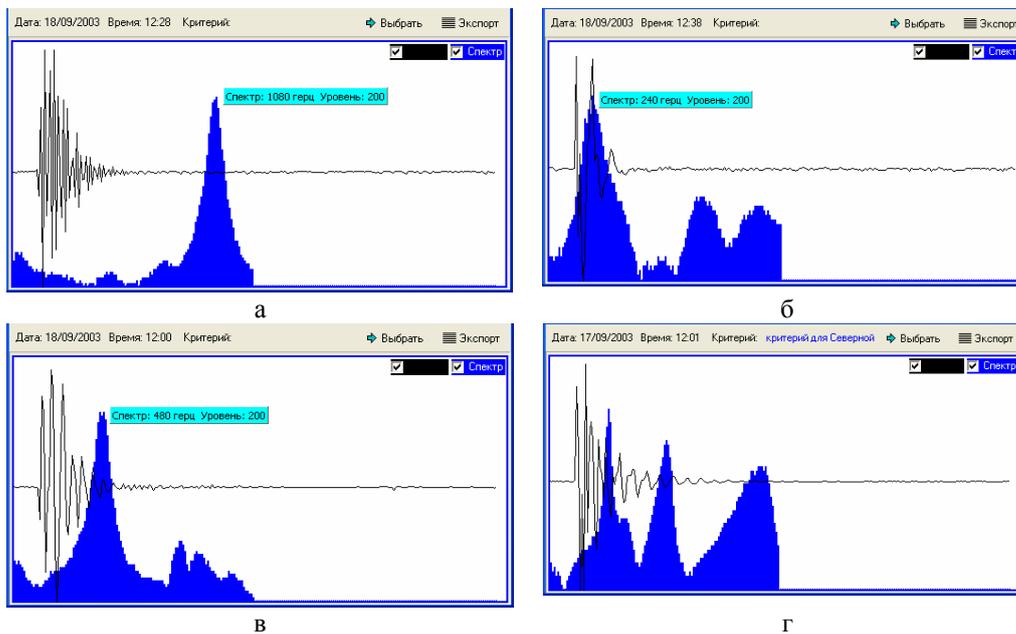


Рис. 2. Примеры данных, полученных на объекте. Виброакустический импульс и его спектр, полученные на бездефектном участке (а), на участке с отсутствием связи плиты и основания (б), при наличии расслоения внутри днишы (в) и на участке с несколькими видами дефектов (г)

ции дниша в спектре виброимпульса наблюдается ярко выраженный экстремум (один или несколько), располагающийся в центральной области частотного диапазона спектрального анализа (рис. 2, в). И, наконец, на участках, в пределах которых имеет место наличие полостей в основании и внутренних дефектов конструкции дниша, в спектре проявляются наряду с низкочастотным максимумом более высокочастотные спектральные выбросы (рис. 2, г).

Кроме того, при наличии в объекте дефектов различного типа наблюдаются ярко выраженные изменения в форме виброакустического импульса. В этом случае осциллограмма импульса имеет более сложную структуру с заполнением из низкочастотных и высокочастотных колебаний, из которых

большой вклад дают низкочастотные составляющие.

Здесь необходимо отметить, что другие виды контроля не позволили выявить все вышеуказанные дефекты, определенные с использованием виброакустического метода. Успешное применение георадиолокационного метода для выявления дефектности в конструкциях было ограничено вследствие достаточно сильного армирования плиты дниша, а также незначительных толщин исследуемых конструкций. Применение метода акустического простукивания не дало результатов по причине невозможности определения на слух наличия дефекта в каком-то конкретном структурном слое конструкции. Также использование этого метода было ограничено вследствие невозможности определения наличия дефектов одновременно

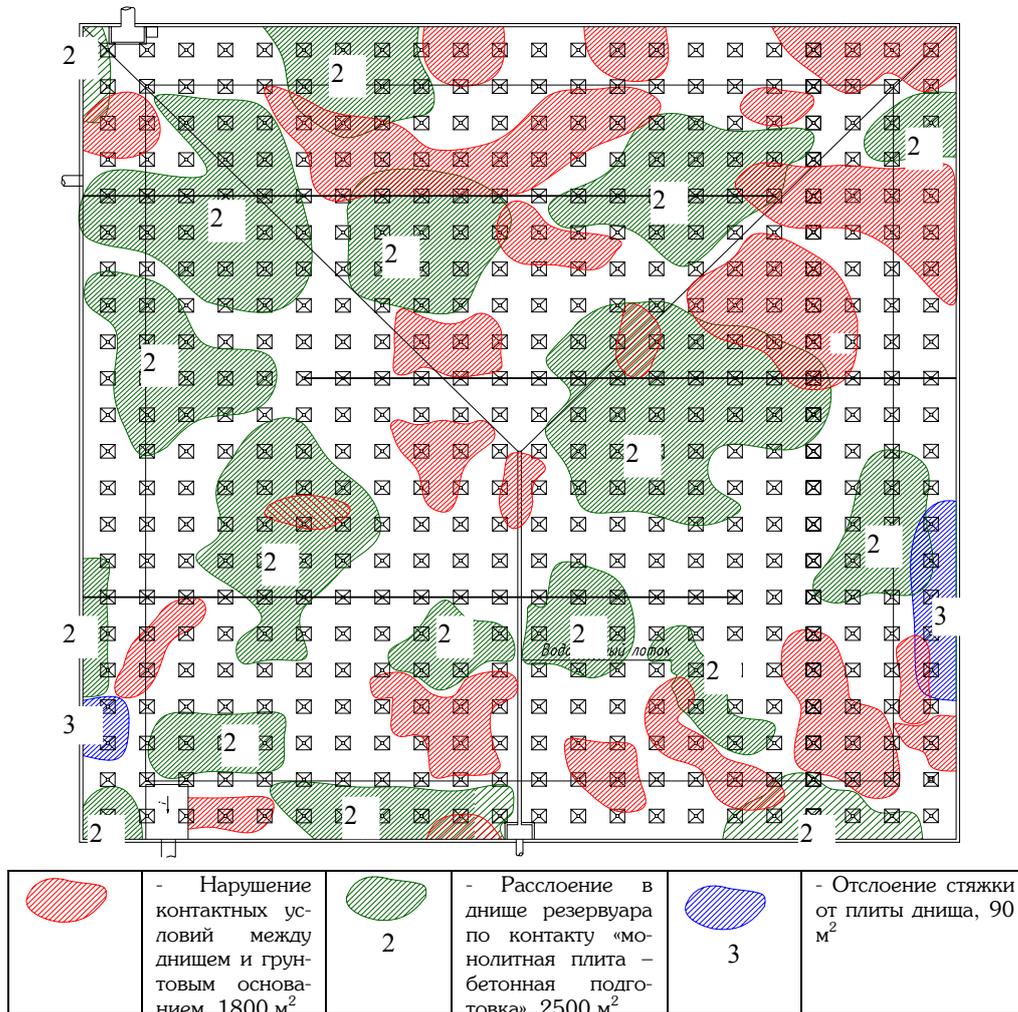


Рис. 3. Схема распределения дефектов в отдельных слоях днища резервуара, построенная по результатам проведения виброакустических исследований

в нескольких слоях на одном участке контроля.

Проведение контрольного бурения позволило подтвердить результаты виброакустических исследований, а также уточнить объемы существующих дефектов.

По результатам проведенного обследования состояния конструкций резервуара были построены схемы распределения дефектов (рис. 3), оп-

ределены оптимальные технологические режимы и параметры ведения ремонтных работ.

В последствии было выполнено восстановление контактных условий между днищем резервуара и грунтовым основанием методом инъектирования комбинированными составами из гидроактивных полиуританов и цемента.

Также были проведены работы по ликвидации расслоений внутри конструкции днища, заключающиеся в инъектировании существующих дефектов связи с использованием низковязких составов эпоксидных смол.

В заключении стоит отметить, что эффективность проведенных мероприятий по восстановлению устойчи-

вости конструкций резервуара в значительной степени зависела от качественно проведенного виброакустического контроля их состояния, что в свою очередь подтверждает необходимость дальнейшего развития и оптимизации этого метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауков Ю.Н. Применение виброакустического метода в практике геоконтроля – Горно-информационный бюллетень – М. МГГУ, 1999, №6.
2. Бауков А.Ю. Виброакустический контроль многослойных структур в горном производстве и строительстве. IX Международная выставка научно-технических проектов «Экспо-Наука - 2003» - Официальный каталог ESI (A156) – М.:2003
3. Бауков Ю.Н., Чумичев А.М., Бауков А.Ю. Особенности применения виброакустического метода при контроле многослойных покрытий, обделок и закрепного пространства в подземных выработках. – ГИАБ, - М.: МГГУ, 2002, №3
4. Скучик, Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971.
5. Муравский, Г.Б. Задача о вынужденных вертикальных колебаниях штампа кругового очертания при некоторых моделях основания / Г.Б. Муравский // Труды МИИТ. – 1968. – вып. 260. – с. 128-132.
6. Гольдсмит, Р./ Гольдсмит. – М.: Мир, 1965.
7. Бауков А.Ю., Павлов С.В. Компьютерное моделирование процессов изгибных колебаний упругих пластин применительно к оптимизации виброакустического метода контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень – МГГУ, 2005, №6.
8. Бауков Ю.Н., Павлов С.В., Бауков А.Ю. Экспериментальные исследования изгибных колебаний упругих пластин применительно к оптимизации виброакустического метода контроля. // Горный информационно-аналитический бюллетень, МГГУ, 2004, №4.
9. Бауков А.Ю., Павлов С.В., Гуляева Н.А. Оптимизация ударной системы при виброакустическом контроле многослойных конструкций подземных сооружений городского строительства. Доклад на научном симпозиуме «Неделя горняка - 2006» // Программа научного симпозиума. – М.: МГГУ, 2006. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Бауков А.Ю. – аспирант, Московский государственный горный университет.

Рецензент канд. техн. наук, А.М. Кириленко.



РУКОПИСИ,
ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

1. Голик В.И. Экономика и управление конверсией горнодобывающих предприятий (576/12-07 — 30.03.07) 10 с.