

М.Я. Квашнин¹, Г.С. Бихожаева², А.Б. Жумасейтова³, Г.М. Мурзахметова⁴
(^{1,2,3,4}Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева,
г. Алматы, Республика Казахстан)

К ВОПРОСУ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования колебаний упругих пластин как в их свободном состоянии, так и лежащих на упругом основании, при ударном воздействии. Целью являлось выявление физических закономерностей в изгибных колебаниях упругих пластин различной толщины, соответствующих дефектным участкам как всего объекта, так и внутренним расслоениям, а также оптимизация методики реализации виброакустического контроля слоистых структур.

Ключевые слова: дефекты, неразрушающий контроль, виброакустический метод, изгибные колебания, спектральная плотность.

Разработанный на кафедре ФТКП МГГУ виброакустический метод неразрушающего контроля нашел широкое применение при обнаружении дефектов связи покрытий и плит с основанием в различных областях техники (в строительстве, на транспорте, в горном деле, в гидромелиорации и т.д.).

Из различных модификаций данного метода наиболее часто применяется ударный вариант, основанный на спектральном анализе виброакустического импульса, зарегистрированного на поверхности исследуемого объекта при его возбуждении механическим ударом.

Однако все модификации виброакустического метода разрабатывались применительно к однослойной физической модели дефектного участка исследуемого объекта, когда объем между свободной поверхностью и дефектом представлялся в виде тонкой упругой пластины, в которой возбуждаются изгибные колебания на нескольких первых собственных модах пластины.

В то же время большинство подземных строительных конструкций городского строительства являются многослойными, особенно это относится к днищам сооружений. В таких конструкциях может наблюдаться от трех до пяти слоев различной толщины, и сами отдельные слои, как правило, выполнены из различных материалов или же из бетона различного состава. В процессе их сооружения, а особенно при эксплуатации конструкций, между отдельными слоями возможно возникновение структурных дефектов различного типа: расслоений, каверн, горизонтальных протяженных трещин и т.п.

Существенной особенностью неразрушающего контроля в данных условиях является односторонний доступ к объекту со стороны упругого слоя, который, как правило, является экранирующим элементом, препятствующим проникновению энергии источника к нижней границе с основанием. В связи с этим не-

разрушающий контроль таких слоистых объектов при значительной толщине общего упругого слоя (40 сантиметров и больше), заключающийся в обнаружении возможного нарушения контакта всей конструкции с основанием. Причем обнаружение такого дефекта и его идентификация современными методами неразрушающего контроля непосредственно в производственных условиях является весьма сложной технической задачей, а в ряде случаев это возможно только с применением виброакустического метода.

Кроме того, теоретические основы данного метода в настоящее время недостаточно развиты. Изгибные колебания упругой пластины над дефектом и над демпфирующим основанием теоретически рассматривались только в случае гармонического возбуждения объекта. Вследствие этого при реализации данного метода имеют место сложности во время интерпретации результатов экспериментальных исследований, что связано в ряде случаев с методическими ошибками, возникающими при проведении измерений на различных технических объектах. В особенности данные проблемы возникают при изучении многослойных структур, так как в этом случае спектр виброакустического импульса при наличии внутренних дефектов конструкций различного масштаба имеет весьма сложную структуру и идентификация соответствующих спектральных выбросов в общем спектре представляет значительную проблему [1].

С целью выявления физических закономерностей в изгибных колебаниях упругих пластин различной толщины, соответствующих дефектным участкам как всего объекта, так и внутренним расслоениям, при ударном воздействии, а также для оптимизации методики реализации виброакустического контроля слоистых структур было проведено компьютерное моделирование колебаний упругих пластин как в их свободном состоянии, так и лежащих на упругом основании при ударном воздействии на пластину. В связи с тем, что для корректировки методики виброакустического контроля достаточны качественные результаты, при проведении исследований применялось приближенное моделирование процессов изгибных колебаний упругих пластин, а так же использовалась простейшая модель упругого основания.

Компьютерное моделирование выполнялось на основании общей теории колебательных систем с распределенными параметрами [2] в случае гармонической внешней силы и ударного воздействия на упругую пластину. Расчеты проводились в среде Mathcad. Для упрощения расчетов собственных частот изгибных колебаний пластин в качестве граничных условий был выбран случай прямоугольной пластины, жестко зажатой по контуру.

В случае возбуждения упругой пластины гармонической внешней силой $F(t) = F_0 e^{j\omega t}$ колебательная скорость изгибных колебаний пластины на ν -й моде определяется:

$$\dot{\xi}_\nu = \frac{F_0}{R_\nu^* + jM_\nu^* + \frac{1}{j\omega K_\nu^*}}, \quad (1)$$

где M_ν^* , K_ν^* , R_ν^* – эквивалентные масса, податливость и сопротивление системы на ν -й моде, конкретные выражения для которых можно найти в работе [2].

При расчете колебательных характеристик пластины, лежащей на упругом основании, в качестве приближенной модели которого была выбрана модель Г.Б. Муравского [3], в которой ее эквивалентные колебательные параметры: жесткость основания C и сопротивление основания μ при гармонических колебаниях могут достаточно просто определяться упругими характеристиками реального основания:

$$C = 1,53 \sqrt{\frac{S}{\pi}} \frac{E_0}{1 - \sigma_0^2}; \quad \mu = \frac{0,478 \sqrt{(1 + \sigma_0)(3 - 2\sigma_0)}}{(1 - \sigma_0^2)} \cdot S \cdot \sqrt{\rho_0 E_0}, \quad (2)$$

где E_0 , ρ_0 , σ_0 – модуль Юнга, плотность и коэффициент Пуассона материала основания;

S – площадь пластины, соприкасающейся с основанием.

Тогда модуль колебательной скорости центра пластины, лежащей на упругом основании, на ее основной моде, согласно общей теории колебательных систем с распределенными параметрами, может быть рассчитан следующим образом:

$$|\dot{\xi}_{loc}| = \frac{F_0}{\sqrt{\left[\omega_1^2 \cdot \eta \cdot \frac{M_1^*}{\omega^2} + \mu \right]^2 + \omega^2 \left[1 - \frac{1 + C \cdot K_1^*}{\omega^2 \cdot K_1^* \cdot M_1^*} \right]^2}}, \quad (3)$$

где η – коэффициент потерь материала пластины; M_1^* , K_1^* – эквивалентные масса и податливость пластины на первой моде.

При ударном воздействии на пластину модуль спектральной плотности виброакустического отклика определялся:

$$|N(f)| = |M(f)| \cdot |S(f)|, \quad (4)$$

где $|S(f)|$ – модуль спектра ударного импульса $F(t)$; $|M(f)|$ – модуль амплитудно-частотной характеристики объекта в случае колебаний пластины в свободном состоянии или на упругом основании.

В качестве ударного импульса силы, согласно теории Герца [4], была выбрана функция:

$$F(t) = \begin{cases} A \sin \frac{\pi t}{\tau} & \text{при } 0 \leq t \leq \tau; \\ 0 & \text{при } t > \tau, \end{cases} \quad (5)$$

модуль спектральной плотности которой имеет вид:

$$|S(\omega)| = \frac{2A\tau}{\pi} \frac{\cos \frac{\omega\tau}{2}}{1 - \left(\frac{2}{\pi} \frac{\omega\tau}{2}\right)^2}, \quad (6)$$

где τ – длительность импульса соударения ударной системы с объектом, зависящая от приведенной массы соударяющихся тел m , от их относительной скорости движения V_0 , от упругих характеристик тел и радиусов кривизны соударяющихся поверхностей.

При моделировании были проведены расчеты спектральной плотности виброотклика пластины на ударное воздействие как в свободном состоянии, так и лежащей на упругом основании при вариации упругих свойств основания и длительности ударного импульса τ .

С целью выбора оптимальных режимов возбуждения многослойных объектов с внутренними расслоениями отдельных слоев конструкции компьютерное моделирование выполнялось для двух типов упругих пластин с геометрическими размерами, характерными для реальных строительных объектов: 1) $1,5 \times 1 \times 0,23$ м; 2) $0,5 \times 0,5 \times 0,1$ м.

Упругие параметры пластин соответствовали параметрам бетона: $E = 1,225 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; $\sigma = 0,17$; $\rho = 2,45 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\eta = 0,261$. В процессе моделирования величина η уменьшалась на порядок ($\eta = 0,0261$). Упругий модуль основания варьировался в следующих пределах:

$$E_{01} = 8,18 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; E_{02} = 8,18 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; E_{03} = 8,18 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Остальные характеристики основания соответствовали случаю консолидированного грунтового основания: $\sigma_0 = 0,34$; $\rho_0 = 1,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Изменение характера ударного возбуждения упругой пластины учитывалось путем варьирования в процессе моделирования длительности ударного импульса τ .

Типичный вид результатов таких расчетов представлен на рисунке 1.

На основании данных исследований, во-первых, было получено количественное и качественное подтверждение общих закономерностей изгибных колебаний пластин в свободном состоянии и при демпфировании этих колебаний упругим основанием. Так изменение параметров затухания в материале пластины η от 0,261 до 0,0261 приводит к увеличению амплитуды колебаний пластины на резонансной частоте в 5,3 раза и к значительному уменьшению ширины полосы пропускания резонансного выброса (в 8,85 раза). Также наблюдается увеличение в 1,31 раза амплитуды спектральной плотности виброимпульса в случае пластины, лежащей на упругом основании ($E_{оч} = 8,18 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$). При этом имеет место перемещение максимума спектра в область низких частот на 200 процентов.

Кроме того, был отмечен весьма важный для реализации данного метода факт, связанный с тем, что наибольшее демпфирование колебаний пластин основанием имеет место на первой основной моде пластины, колеблющейся над дефектом. Причем, чем тоньше пластина, тем выше коэффициент демпфирования во всем частотном диапазоне, в особенности на частоте первой моды.

Изучение влияния длительности ударного импульса τ на колебательные процессы упругой пластины показало, что в большинстве случаев спектры импульсов виброотклика на ударное воздействие имеют сложный вид и в них из-за причин наличия дополнительных спектральных выбросов весьма трудно выделить основной максимум, по величине которого, согласно методике виброакустического контроля, производится выявление наличия дефектов. Кроме того и амплитуда основных максимумов спектральной плотности виброимпульса различна и зависит от величины τ . Исходя из указанных особенностей для каждого характерного контролируемого объекта может быть выбран оптимальный режим возбуждения конструкции, при котором в спектре отклика наблюдается единственный основной амплитудный выброс и его величина, по возможности, максимальная.

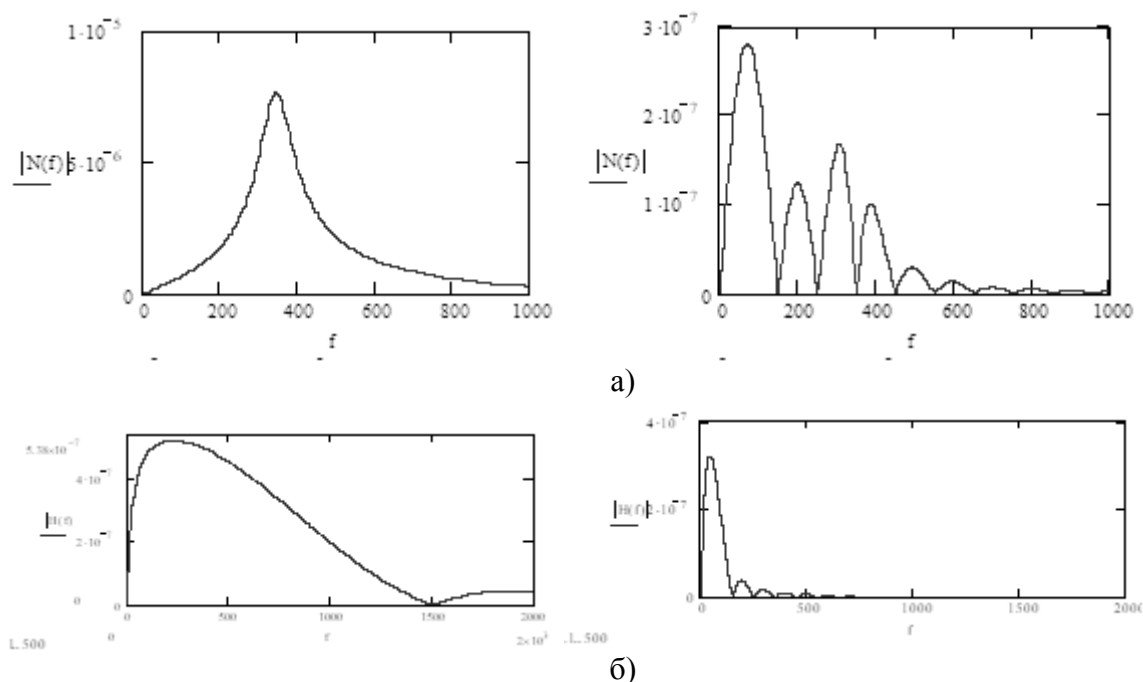


Рис. 1. Спектральная плотность виброакустического отклика пластины (1,5x1,0x0,23 м) для импульсов с $\tau = 0,001; 0,01$ с
 а) в свободном состоянии б) лежащей на упругом основании ($E_0 = 8,18 \cdot 10^8$ Н/м²)

Из полученных результатов следует следующий вывод о возможности в значительной степени увеличить надежность виброакустического контроля многослойных конструкций путем использования ударных систем, создающих возбуждающие импульсы с различной величиной их длительности, что может быть реально достигнуто вариацией параметров ударной системы.

Практическая реализация виброакустического метода в условиях неразрушающего контроля многослойных объектов предполагает применение специализированной измерительной аппаратуры, позволяющей непосредственно на объекте получать информацию в цифровом виде и визуализировать в реальном масштабе времени и частот виброакустический импульс и его спектр, а также обладающей программным обеспечением процесса интерпретации экспериментальных данных на персональных компьютерах [4].

Данным требованиям удовлетворяет компьютеризированная аппаратура виброакустического контроля «Vibroset». В комплект аппаратуры входит малогабаритный автономный переносной измерительный прибор, позволяющий регистрировать виброакустические 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 формы 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 производственном объекте, в дальнейшем подвергаются обработке и интерпретации по специальным программам, позволяющим детально анализировать виброакустические импульсы и их спектры и измерять их основные характеристики.

На рисунке 2 представлены типичные спектрограммы и осциллограммы, наблюдаемые на дисплее прибора «Vibroset», полученные в условиях комплексного исследования днища резервуара чистой воды, имеющего многослойную конструкцию: плита днища, мощностью 140 мм, уложена на бетонную подготовку толщиной 50-70 мм. Между ними выполнена гидроизоляция – битумная мастика со стяжкой 5-10 мм.

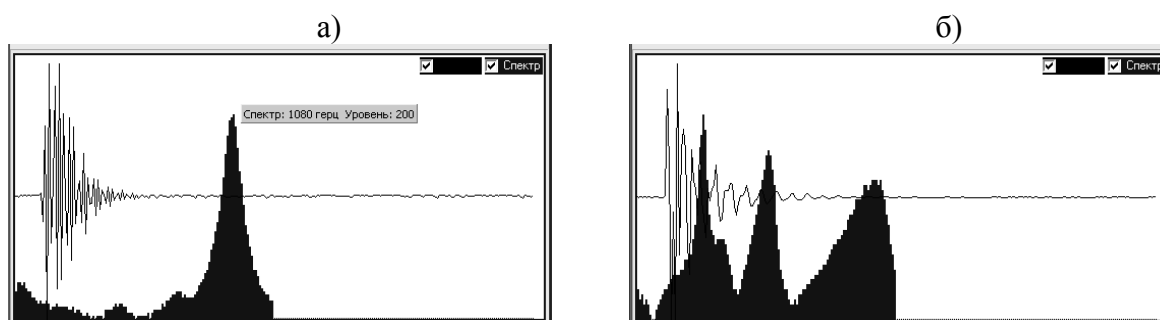


Рис. 2. Виброакустический импульс и его спектр
а) полученные на бездефектном участке б) на участке с отсутствием связи плиты и основания и при наличии внутренних дефектов

Измерения выполнялись по стандартной методике виброакустических ис-

следований с учетом вышеизложенных особенностей проведения виброакустического контроля в условиях многослойных объектов. Экспериментальные данные, полученные непосредственно на объекте, подвергались компьютерной обработке в лабораторных условиях.

Анализ большого объема 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. При наличии дефектов связи между внутренними слоями конструкции днища. В спектре виброимпульса наблюдается ярко выраженный экстремум (один или несколько), располагающийся в центральной области частотного диапазона спектрального анализа. И наконец, на участках, в пределах которых имеет место наличие полостей в основании и внутренних дефектов конструкции днища, в спектре проявляются наряду с низкочастотным максимумом более высокочастотные спектральные выбросы (рис. 2, б).

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 больший вклад дают низкочастотные составляющие.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о принципиальной возможности применения виброакустического метода при комплексном неразрушающем контроле многослойных объектов. Причем полученные закономерности изгибных колебаний пластин различных толщин в свободном состоянии и связанных с упругим основанием при ударном воздействии на них позволяют в значительной мере повысить надежность виброакустического контроля многослойных конструкций на основе оптимизации методик измерений и интерпретации их результатов и совершенствования аппаратурного обеспечения данного метода, вплоть до разработки виброакустических приборов нового поколения.

Литература:

1. *Квашин М.Я., Квашин Н.М. Исследование изгибных колебаний упругих пластин с целью оптимизации виброакустического метода контроля // Вестник КазАТК. – 2009. – №3. – С. 152-159.*
2. *Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир, 1971. – 168 с.*
3. *Муравский Г.Б. Задача о вынужденных вертикальных колебаниях штампа кругового очертания при некоторых моделях основания / Г.Б. Муравский // Тр. МИИТ. – 1968. – Вып. 260. – С. 128-132.*

4. Махметова Н.М., Квашинин М.Я., Аханов А.Р., Квашинин Н.М. Практический опыт применения виброакустического метода при неразрушающем контроле слоистых строительных конструкций // Мат. III междунар. научн. конф. «Актуальные проблемы механики и машиностроения», посв. 75-летию проф. А.Н.Тюреходжаева. – Алматы: КазНТУ, 2009. – С. 97-104.

Бұл жұмыс серпімді пластиналардың тербелістерін олардың еркін күйінде де, серпімді негізде де әсер ету арқылы компьютерлік модельдеудің нәтижелерін ұсынады. Мақсаты бүкіл объектінің де, ішкі стратификацияның да ақаулы бөліктеріне сәйкес келетін әртүрлі қалыңдықтағы серпімді пластиналардың иілу ауытқуларындағы физикалық заңдылықтарды анықтау, сонымен қатар қабатты құрылымдарды виброакустикалық бақылауды жүзеге асыру әдістемесін оңтайландыру болды.

Түйін сөздер: ақаулар, бұзылмайтын бақылау, виброакустикалық әдіс, иілу тербелісі, спектрлік тығыздық.

This paper presents the results of computer simulation of vibrations of elastic plates, both in their free state and lying on an elastic base, under impact. The goal was to identify physical regularities in the Flexural vibrations of elastic plates of different thickness corresponding to defective sections of the entire object and internal stratifications, as well as to optimize the implementation of vibroacoustic control of layered structures.

Key words: defects, non-destructive testing, vibroacoustic method, bending vibrations, spectral density.