

УДК 534.232

А.Ю. Бауков, С.В. Павлов

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ КОЛЕБАНИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ
СИСТЕМ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
НА ОБЪЕМНОЙ МОДЕЛИ**

Семинар № 2

В результате выполненных ранее теоретических исследований особенностей изгибных колебаний упругих пластин при ударном воздействии с целью оптимизации виброакустического метода контроля многослойных строительных конструкций и значительного повышения надежности интерпретации результатов виброакустической диагностики были получены следующие основные выводы, позволяющие в значительной мере усовершенствовать методику виброакустических измерений:

1) Характер спектра виброакустического отклика пластин различной относительной толщины существенным образом зависит от длительности τ ударного возбуждающего импульса [1] и энергии удара [2];

2) Длительность ударного импульса τ , а следовательно форма спектра регистрируемого виброакустического импульса, определяется различными факторами, в частности массой возбудителя колебаний, формой поверхности ударного устройства и скоростью его взаимодействия с объектом [3].

Таким образом, варьируя указанными выше характеристиками ударного процесса, можно наиболее эффективно выявлять наличие протяженных дефектов на различных глубинах в исследуемых многослойных

конструкциях и разрешать спорные ситуации при получении неоднозначных результатов измерений на основе ряда методических приемов контроля.

С целью экспериментальной проверки выводов теоретических исследований были проведены спектральные измерения виброакустических импульсов при ударном возбуждении многослойных пластин на объемной модели. Объемная модель, состоящая из двух массивных мраморных кубов, служащих основанием изучаемой конструкции, на которых сверху располагалась однослойная или двухслойная пластина, описана в работе [4]. Однослойная прямоугольная пластина, выполненная из мрамора толщиной $h_1 = 0.04$ м, имела габаритные размеры 0.68×0.33 м. При расположении ее на указанных основаниях в данной модели имел место дефект прямоугольной формы с соответствующими горизонтальными размерами: $a = 0.315$ м; $b = 0.252$ м. Пластина крепилась к основаниям на цементном растворе.

В случае образования многослойной конструкции сверху на пластину из мрамора с помощью алебаstra крепилась пластина из текстолита толщиной $h_2 = 0.013$ м с такими же горизонтальными размерами, что и у

мраморной пластины. Виброакустические измерения выполнялись при двух ситуациях:

1) В случае сплошной двухслойной пластины;

2) При образовании между указанными слоями внутреннего прямоугольного дефекта с горизонтальными размерами такими же, как и в случае однослойной пластины, расположенного непосредственно над дефектом основания конструкции.

Измерение изгибных колебаний пластин производилось с помощью пьезоаксельрометра типа КД-32 с собственной частотой $f_0 = 7$ кГц. Датчик располагался сверху пластин приблизительно в центре дефекта или же в центре участка над одним из оснований модели. Ударное возбуждение пластин выполнялось с использованием двух типов ударных устройств: а) молотком массой $m_1 = 0.3$ кг, когда удар производился плоской поверхностью и обратной заостренной частью насадки с радиусом кривизны $R_1 = 0.5$ см; б) пикой отбойного молотка массой $m_2 = 1.0$ кг, когда удар также производился плоской поверхностью и заостренным концом. Точка ударного возбуждения на каждом участке измерений располагалась на различном расстоянии от пьезоаксельрометра: $r_1 = 5$ см; $r_2 = 10$ см; $r_3 = 20$ см.

Измерение виброакустического импульса осуществлялось в цифровой форме с использованием схемы АЦП (модель CS -512) и специальной компьютерной программы. Данное программное обеспечение предусматривало регулировку амплитудного уровня измеряемого сигнала, его масштабирования и измерения амплитуды, времени различных фаз импульса и степени спада его образующей со временем наблюдения [5]. Спектральная обработка зарегистрированного импульса производилась с использо-

ванием той же программы на базе быстрого преобразования Фурье. Результаты измерений и обработки сигнала визуализировались в виде совместных осциллограмм и спектрограмм, которые фиксируются при выбранных масштабах по оси времени и частот.

Анализ осциллограмм и спектрограмм виброакустических откликов пластин на ударное воздействие, полученных при указанных выше условиях измерений, позволил сделать ниже представленные выводы.

Предварительно необходимо отметить, что данные экспериментальные исследования были выполнены на объемной модели, которая с точки зрения интерпретации спектральных измерений представляют собой достаточно сложный объект. Это обусловлено большой вероятностью возникновения в модели различных резонансных процессов, которые значительно усложняют получаемый в результате измерений спектр виброакустического импульса и дают в его спектрограмме много дополнительных спектральных выбросов помимо тех, что связаны с изгибными колебаниями пластин. Вследствие этого устойчиво наблюдаемый какой-либо эффект убедительно доказывает предварительные гипотетические предположения о характере конкретных колебательных процессов.

Кроме того, для правильной идентификации различных спектральных максимумов (с целью возможности объяснения эффектов их появления и изменения положения вдоль оси частот при изменении условий эксперимента) предварительно были проведены расчеты собственных частот изгибных колебаний участков пластин из мрамора и текстолита, расположенных над дефектами в исследуемой модели.

№ п/п	Материал пластины	C_p , м/с	$E \cdot 10^{-6}$, Па	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	μ	f_{11} , Гц
1	Мрамор	5500	1225	2,7	0,3	1046
2	Текстолит	1503	1,161	1,4	0,3	472
3	Составная Мрамор + текстолит		2856	2,7	0,3	2116

Расчеты выполнялись для прямоугольных пластин со сторонами a и b соответственно выражениям для пластин, опертых по краям. При этом модули Юнга E_1 и E_2 рассчитывались на основании экспериментально измеренных скоростей продольных волн в материале каждой пластины C_{p1} и C_{p2} . Причем в случае составной пластины (текстолит + мрамор) рассчитывался эквивалентный модуль упругости $E_{экр}$ на основании выражения для двухслойной пластины, представленного в работе [6]:

$$E_{экр} = E_1 \frac{h_1^3}{h_2} \left\{ 1 + E_2 \frac{h_2}{E_1 h_1} \left[5 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 + 4 \right] \right\} \quad (1)$$

где E_1, h_1 - модуль Юнга и толщина пластины из текстолита; E_2, h_2 - то же для пластины из мрамора; h_2 - толщина двухслойной пластины.

Результаты расчетов собственных частот пластин и их основные характеристики представлены в таблице.

При рассмотрении спектрограмм, полученных на модели при различных условиях эксперимента можно заметить ряд общих особенностей в общем характере этих спектрограмм.

Во-первых, при измерениях на однослойной пластине из мрамора, отличающейся достаточно высокой добротностью (малыми потерями), спектр виброимпульса является весьма широким с большим количеством локальных спектральных выбросов, среди которых наблюдается на всех

спектрограммах амплитудный максимум, связанный частотой датчика. При этом на участке над дефектом в спектрограммах стабильно выделяются максимумы, расположенные в пределах 1,5 кГц (рис. 1, б), обусловленные собственными колебаниями этого участка пластины на основной частоте f_{11} . Причем при сравнении с аналогичными сейсмограммами, полученными на бездефектном участке (рис. 1, а), отмечается резкое увеличение спектральной амплитуды как всей спектрограммы, так в особенности ее части в пределах указанных резонансных выбросов на частотах f_{11} (от 5 до 10 и более раз). Данные особенности отмечаются при измерениях на всех расстояниях между точками регистрации и возбуждения виброакустического импульса r_i . При изменении формы контактной поверхности ударного устройства изменение характера спектрограмм незначительно. Это обусловлено тем, что для данной пластины длительность ударного импульса τ располагается в пределах ее оптимальных значений.

Во-вторых, при переходе к составной пластине наблюдается резкое изменение формы всей спектрограммы при различных условиях ее получения, заключающееся в значительном уменьшении ее ширины, которое выражается в практически полном ослаблении ее высокочастотной части и переносе спектральной энергии виброакустического импульса в низкочастотный диапазон (рис. 2, а, б).

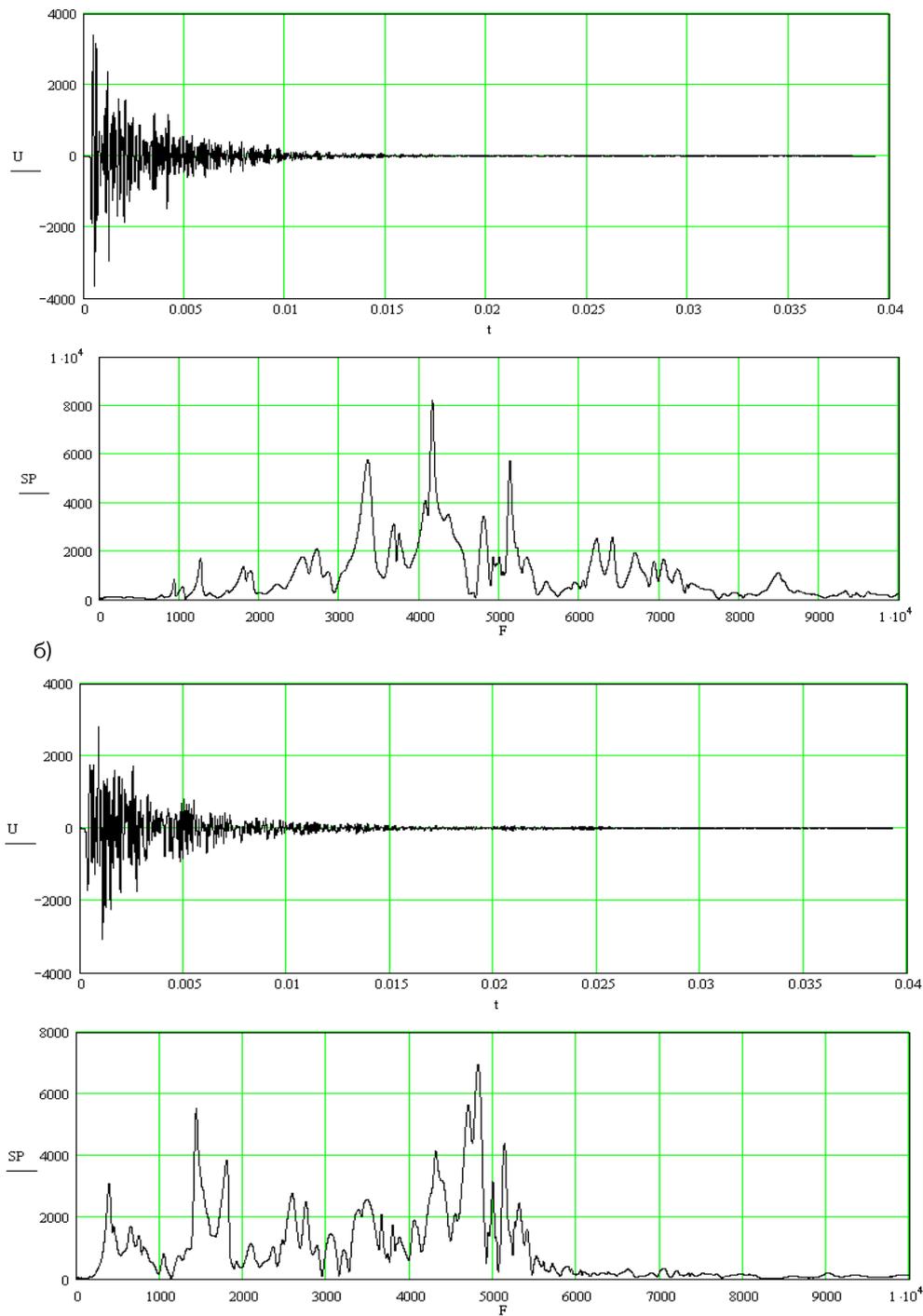


Рис. 1. Осциллограммы и спектрограммы виброакустического импульса в случае однослойной пластины: а – вне дефекта; б – над дефектом

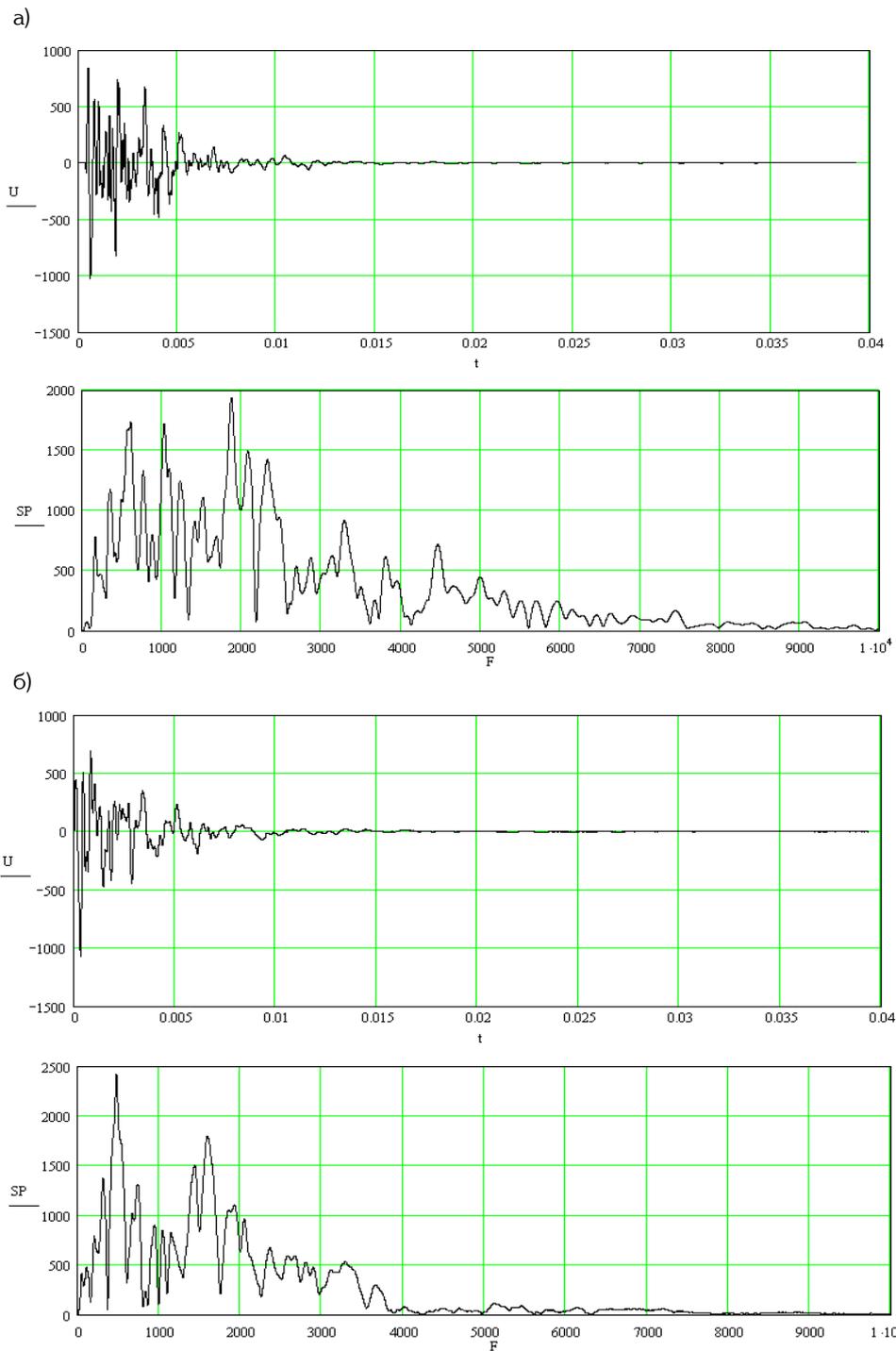


Рис. 2. Осциллограммы и спектрограммы виброакустического импульса в случае двухслойной пластины: а – вне дефекта; б – над дефектом

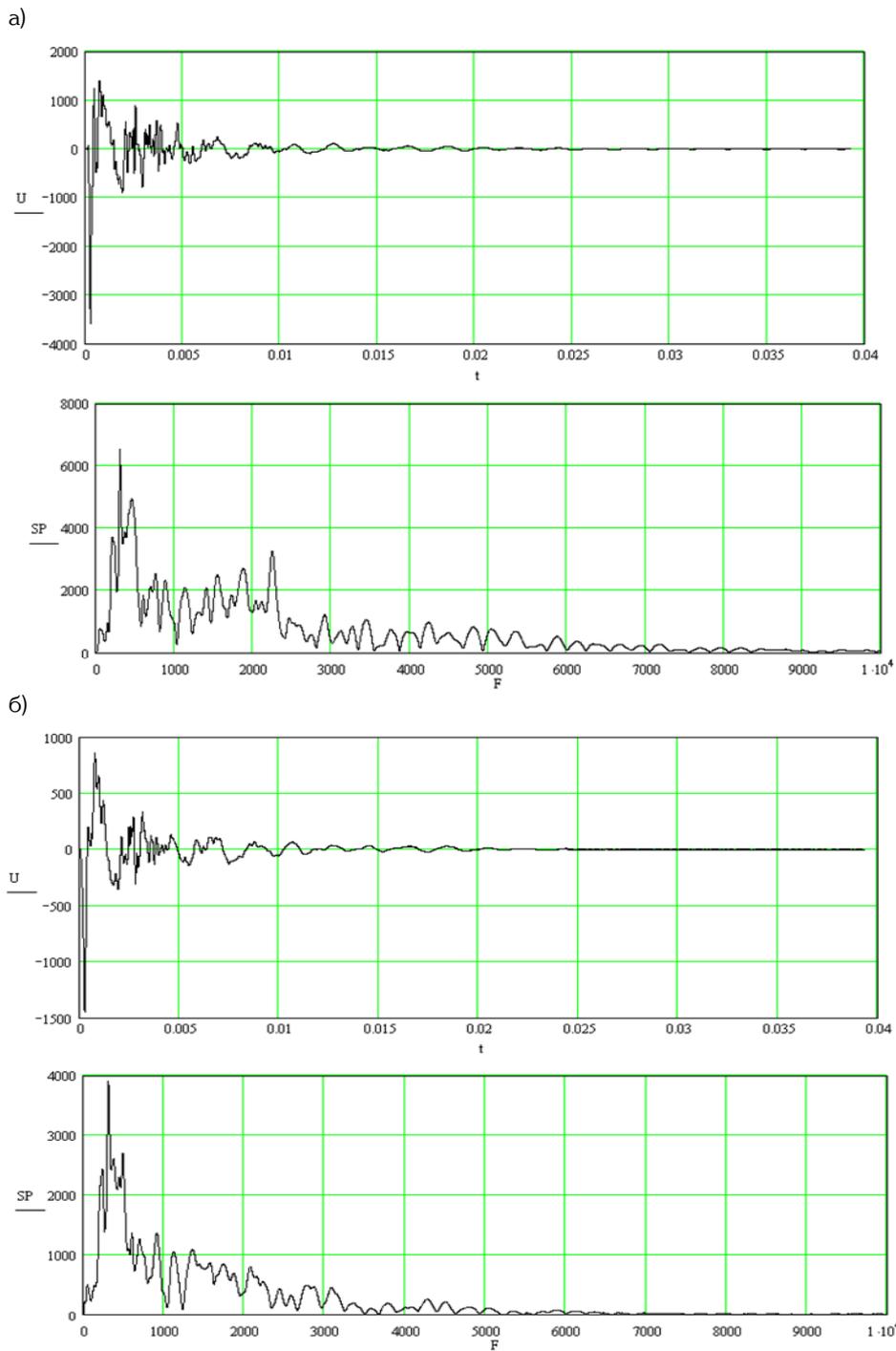


Рис. 3. Спектрограммы виброакустического импульса в случае двухслойной пластины над дефектом при ударном возбуждении: а – молотком с малым радиусом кривизны; б – молотком с плоской контактной поверхностью

При этом в спектре виброакустического импульса, полученного над дефектом, доминирует низкочастотный спектральный выброс на частоте f_{11} для тонкой пластины из текстолита (~ 500 Гц) (рис. 2, б). В то же время в спектре импульса вне дефекта помимо данного амплитудного максимума проявляется спектральный выброс в пределах частоты 2000 Гц, связанный с собственными колебаниями составной пластины (рис. 2, а). В спектре же импульса над дефектом помимо основного низкочастотного спектрального максимума наблюдается тоже еще один локальный выброс, связанный с собственными колебаниями нижней мраморной пластины ($f_{11} \cong 1.5$ кГц) – рис. 2, б.

В случае многослойной пластины при увеличении основного радиуса кривизны R контактной поверхности ударного устройства весьма заметно наблюдается эффект изменения формы спектра виброакустического отклика пластины на ударное воздействие. Так при переходе от малого радиуса кривизны к практически плоской ударной поверхности имеет место значительное сужение спектра и более яркое проявление спектрального выброса на основной частоте тонкого расслоения (рис. 3, а, б). Данный эффект в той – либо другой мере наблюдается на различных расстояниях r_i и при ис-

пользовании обоих ударных устройств. Этим подтверждается теоретический вывод о том, что изменяя длительность τ ударного импульса при сложном спектре регистрируемого сигнала возможно выделять в нем частотные составляющие, соответствующие дефектам конструкции, расположенным на различных глубинах или в ее различных слоях.

Необходимо также отметить, что количественные характеристики осциллограмм виброакустических импульсов, зарегистрированных при различных условиях эксперимента, в частности длительность импульса не позволяет делать какие-либо конкретные заключения о характере дефектности исследуемого объекта.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно еще раз сделать выводы о работоспособности и эффективности применения ударной модификации виброакустического метода в условиях многослойных конструкций, о правильности результатов теоретических исследований колебаний многослойных пластин при ударном воздействии и о возможности оптимизации процесса виброакустической диагностики многослойных структур, что дает возможность разработки специализированных методов контроля многослойных строительных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Бауков А.Ю., Нарышкин Д.А., Волик Е.В. Энергетические аспекты ударного

возбуждения изгибных колебаний в многослойных упругих пластинах// Горный информационно-аналитический бюллетень - МГГУ, 2006, №4

3. 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.

4. 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.

5. Бауков Ю.Н., Павлов С.В. Постановка лабораторно-практического комплекса по дисциплине «Горная геофизика» на

базе результатов современных научных исследований в геоконтроле. Доклад на научном симпозиуме «Неделя горняка – 2005» // Программа научного симпозиума. – М.: МГГУ, 2005.

6. Бауков А.Ю., Звонкина А.А. Об эквивалентных параметрах многослойных конструкций применительно к оптимизации виброакустического метода контроля. Доклад на научном симпозиуме «Неделя горняка - 2008» // Программа научного симпозиума. – М.: МГГУ, 2008. **ИДБ**

Коротко об авторах

Бауков А.Ю. – ЗАО «Триада-Холдинг»,

Павлов С.В. – Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 2 симпозиума «Неделя горняка-2008».

Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Л. Шкуратник.



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ГРИГОРЕНКО Станислав Юрьевич	Обоснование параметров исполнительного органа и разработка установки для проведения перегонных тоннелей метрополитенов	05.05.06	к.т.н.