

*А.Ю. Бауков, С.В. Павлов, Н.А. Гуляева*

**ОПТИМИЗАЦИЯ УДАРНОЙ СИСТЕМЫ  
ПРИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ  
МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ  
СООРУЖЕНИЙ ГОРОДСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Семинар № 3

**Т**еоретически [1] и экспериментально [2] доказано, что при проведении неразрушающего контроля многослойных конструкций подземных сооружений городского строительства, например коммуникационных коллекторов, многослойных оснований подземных хранилищ и т.п., весьма эффективно может применяться ударная модификация виброакустического метода, основанная на возбуждении в объекте контроля изгибных колебаний как во всей изучаемой конструкции, так и в её промежуточных слоях [3].

Компьютерные, модельные и натурные экспериментальные исследования особенностей изгибных колебаний упругих пластин в свободном состоянии и лежащих на упругом основании при ударном воздействии на них позволили сделать вывод о том, что эффективность возбуждения основных изгибных мод пластины, а следовательно, надежность проведения контроля в основном зависит от длительности ударного импульса  $\tau$ , создаваемого в пластине реальным ударным устройством [1].

Так было показано, что при оптимальных условиях возбуждения основной изгибной моды в пластинах, моделирующих многослойную конструкцию, и в тонких пластинах, аналогичных участку конструкции над внутренним дефектом, длительность ударного импульса должна варьироваться в весьма широких пределах

от 0,004÷0,001 с (при толщине пластины  $h = 0,5\div 0,2$  м) до 0,0001÷0,00005с (при толщине пластины  $h = 0,05\div 0,1$  м)

Так как при практической реализации данной модификации виброакустического метода в производственных условиях ударное возбуждение реальных объектов производится молотками (кувалдами, стержнями) с различным весом и размерами или простейшими (например, электромагнитными) специальными устройствами, необходимо проанализировать практическую возможность создания ударного импульса такими системами в пределах указанного диапазона изменения величины  $\tau$ .

Длительность ударного импульса в первом приближении может быть получена на основе теории удара Герца [4]:

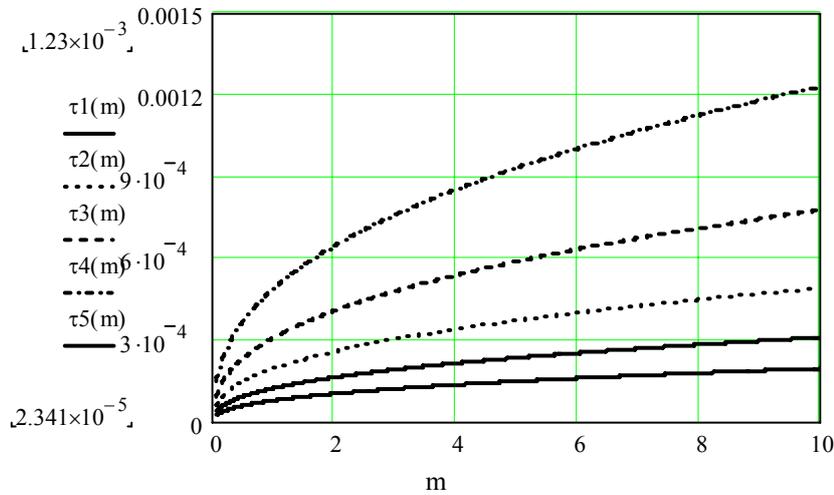
$$\tau = \frac{2.94 \left\{ \frac{5}{4} m \left[ \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right] \cdot \frac{3}{4} \right\}^{2/5}}{V_0^{1/5}}, \quad (1)$$

где  $m$  – приведённая масса соударяющихся тел

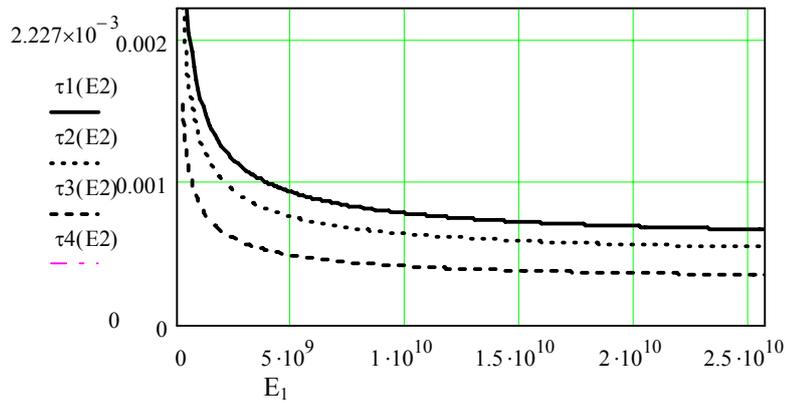
$$m = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2},$$

$m_1$  и  $m_2$  – массы

ударника и пластины;  $E_1$ ,  $E_2$  и  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона, соответственно материала ударника и пластины;  $R$  – радиус контактной поверхности ударной системы;  $V_0$  – относительная



а)



б)

Рис. 1. Зависимость длительности ударного импульса  $\tau$  от массы  $m$  ( $E_1 = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ;  $V = 5 \text{ м/с}$ ;  $R = \text{var}$ ) (а) и от модуля  $E_1$  ( $V = 5 \text{ м/с}$ ;  $R = 0,1 \text{ м}$ ;  $m = \text{var}$ ) (б):  $\tau_1-R = 10 \text{ м}$ ;  $\tau_2-R = 1 \text{ м}$ ;  $\tau_3-R = 0,1 \text{ м}$ ;  $\tau_4-R = 0,01 \text{ м}$ ;  $\tau_5-R = 100 \text{ м}$

скорость соударяющихся тел, в данном случае линейная скорость ударника.

Из приведенного выражения видно, что длительность ударного импульса зависит от четырех основных параметров ударной системы: массы ударника  $m$ ; модуля упругости материала ударника  $E_1$ ; радиуса контактной поверхности ударника  $R$  и скорости движения ударника  $V_0$ . Путем варьирования данных параметров ударной системы можно добиваться требуемого диапазона значений  $\tau$ . Таким образом, задача о выборе указанных пара-

метров ударной системы для достижения необходимой величины длительности ударного импульса  $\tau$  сводится к задаче нахождения заданного значения функции с четырьмя переменными.

Точное решение такой математической задачи достаточно сложно. Однако в данном конкретном случае оно может быть значительно упрощено путем приведения функции четырех переменных к функции двух переменных. Это можно сделать вследствие того, что ряд из указанных параметров ударной системы можно зада-

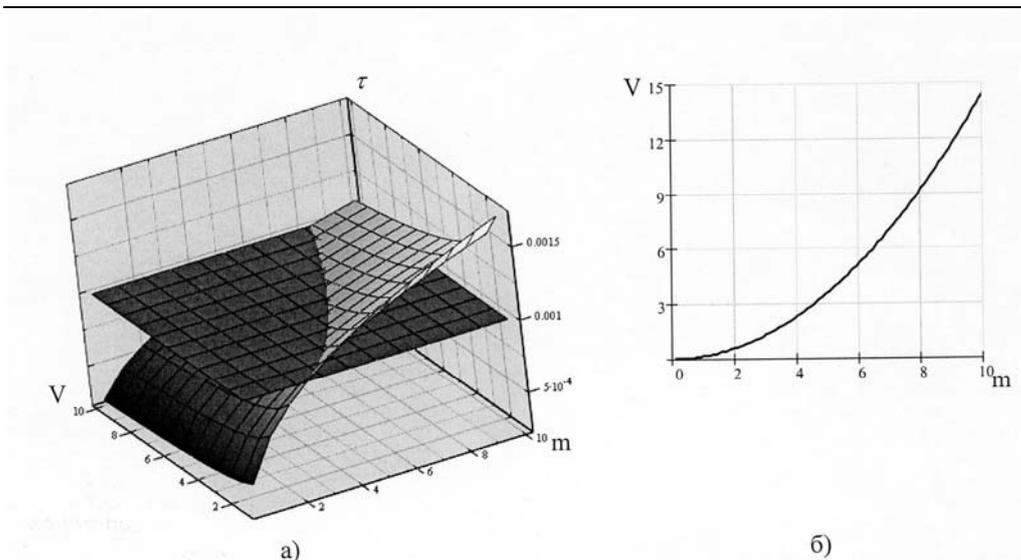


Рис. 2. Трехмерные поверхности для функции ударного импульса  $\tau = f(m, V)$  при  $E_1 = 5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ ,  $R = 0,1 \text{ м}$  и  $\tau = 0,001 \text{ с}$  (а) и линия пересечения трехмерных поверхностей (б)

вать в четко обозначенных диапазонах их изменения, а некоторые из них в силу технических условий могут принимать конкретные дискретные значения.

Так, например масса ударника системы возбуждения теоретически может изменяться от 0 до 10 кг, тогда как практически механическая ударная система желательно должна иметь массу от 0,1 до 5 кг. То же можно сказать и о радиусе ударника, который может изменяться в диапазонах от 0,01 м до 0,1 м и от 10 м до 100 и выше метров, когда ударная поверхность приближается к плоской. Модуль Юнга ударной системы, хотя и может изменяться в весьма широких пределах при использовании промежуточных слоев из различных материалов (от  $1,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$  – для резины до  $2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$  – для стали), но конкретно должен принимать дискретные значения, соответствующие определенному выбранному материалу. Наиболее сильно изменяющейся величиной является скорость соударения  $V_0$ , хотя реальный диапазон вариации  $V_0$  относительно небольшой (от

1 до 10 м/с). Особенно это относится к ручному способу возбуждения изгибных колебаний, когда практически скорость перемещения молотка при ударе можно реализовать только приблизительно в пределах определенного диапазона значений  $V_0$ .

Решение поставленной задачи можно выполнять различными способами. Так, при постоянных заданных значениях каких-либо двух параметров рассчитываются аналитические зависимости  $\tau$  от третьей переменной для семейств кривых, параметром которых является четвертая переменная. Пример таких зависимостей  $\tau = f(m)$  и  $\tau = f(E_1)$ , представлен на рис. 1, а, б.

Анализ полученных зависимостей позволяет определить диапазон изменений величин каждой из четырех переменных, в пределах которого возможно получение заданного значения  $\tau$  при реально достижимых параметрах ударной системы. Так, в частности, значения  $\tau$  в пределах 0,001 с имеют место в случае достаточно больших масс ударной системы ( $m = 3 \div 5$

V	m	R	E	t
10	0,3	0,01	4.000e8	9.945e-4
10	0,3	100	3.000e6	1.106e-3
1	0,5	0,01	2.000e9	1.049e-3
10	0,5	100	3.000e6	1.357e-3
1	3	0,1	5.000e9	9.914e-4
10	3	1	4.000e8	9.945e-4
1	3	100	4.000e8	6.275e-4
1	5	0,1	1.000e10	9.949e-4
1	5	1	2.000e9	1.049e-3
1	5	100	4.000e8	7.697e-4
10	0,3	0,01	2.000e11	2.194e-4
1	0	100	5.000e9	9.914e-5
10	0,5	0,01	2.000e11	2.691e-4
1	0,5	100	1.000e10	9.949e-5
10	3	0,1	2.000e11	3.477e-4
10	3	1	2.000e11	2.194e-4
6	3	100	1.000e11	9.997e-5
10	5	0,1	2.000e11	4.265e-4
10	5	1	2.000e11	2.691e-4
10	5	100	2.000e11	1.071e-4

кг), при использовании накладок из материалов со средними и малыми значениями модуля Юнга ( $E_1 = 4 \cdot 10^8 \div 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>), при малых радиусах кривизны ( $R = 0,01 \div 0,1$  м).

Тогда как достижения малых величин длительность ударного импульса в районе  $\tau = 0,0001$  с реально возможно при малых массах ударника ( $m = 0,1 \div 0,5$  кг), выполненного из металла (сталь или дюралюминий) с практически плоской контактной поверхностью ( $R = 10 \div 100$  м и выше).

Для нахождения оптимального соотношения параметров ударной системы при заданных величинах  $\tau$  в пределах указанных выше диапазонов их возможного изменения можно воспользоваться методом «перебора» или способом встроенных циклов при расчетах в среде Mathcad.

Пример таких расчетов представлен в таблице.

Однако данный метод достаточно формален и его результаты зачастую не удовлетворяют требованиям практической реализации как самого ударного устройства, так и методики проведения контроля.

Наиболее удобным способом выбора оптимальных параметров ударной системы является построение объёмных трехмерных поверхностей типа 3D в среде Mathcad для функции  $\tau$  согласно выражению (1) от двух (из указанных четырех) переменных. При этом оптимальное соотношение параметров системы определяется координатами линии пересечения трехмерной поверхности с плоскостью, соответствующей заданной величине  $\tau$  (например,  $\tau = 0,001$  с или  $\tau = 0,0001$  с). Пример такого построения в

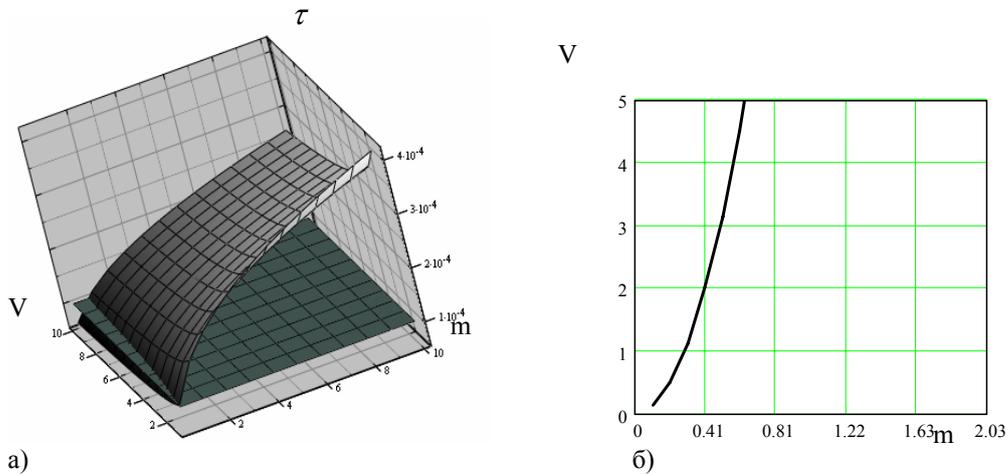


Рис. 3. Трехмерные поверхности для функции  $\tau = f(m, V)$  при  $E_1 = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ,  $R = 10 \text{ м}$  и  $\tau = 0,0001 \text{ с}$  (а) и линия пересечения трехмерных поверхностей (б)

системе Mathcad представлен на рис. 2, а.

Варьируя диапазонами изменения переменных и параметров трехмерной поверхности достаточно просто выбрать необходимое соотношение величин  $m$ ,  $E_1$ ,  $R$ ,  $V_0$ , удовлетворяющее техническим требованиям к реальной ударной системе. При этом уже точное определение координат линии пересечения трехмерных поверхностей возможно путем графического построения на основе выражения (1).

Например, для случая, представленного на рис. 2, а, аналитическое выражение для кривой пересечения трехмерной поверхности и плоскости  $\tau = 0,0001 \text{ с}$  имеет вид:

$$V(m) = \frac{2.886^5 \cdot \left[ \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \right]^2 \cdot m^2}{0.001^5 R} \cdot (2)$$

Кривая, соответствующая выражению (2), представлена на рис. 2, б. Из данной кривой следует, что при выбранных параметрах ударной системы  $R = 0,1 \text{ м}$ ;  $E_1 = 5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ , что соответствует контактному слою из капрона, при массе ударника  $m = 3 \text{ кг}$  требуемая скорость  $V_0$  должна со-

ставлять  $5 \text{ м/с}$ . Тогда как для ударника, изготовленного из дюралюминия ( $E_1 = 7,3 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ), при уменьшении его радиуса до  $R = 0,01 \text{ м}$  при той же массе  $m = 3 \text{ кг}$  оптимальная скорость соударения снижается до  $1,5 \text{ м/с}$ .

При выборе оптимальных параметров для ударной системы, создающей импульс с длительностью  $\tau = 0,0001 \text{ с}$ , в случае ударника, выполненного из стали, получается согласно выражению (1) трехмерная поверхность, представленная на рис. 3, а. При этом для молотка массой  $m = 0,5 \text{ кг}$  с радиусом кривизны контактной поверхности  $R = 10 \text{ м}$  необходимо развить скорость  $V_0 = 3 \text{ м/с}$  (рис. 3, б).

Совершенно аналогичные результаты получаются и при построении трехмерной поверхности  $\tau = f(E_1, V_0)$ , а также кривой пересечения поверхностей  $V = f(E_1)$  (рис. 4).

Таким образом, можно весьма просто выбирать оптимальные диапазоны изменения параметров ударной системы при её проектировании для контро-

ля конкретных объектов или для возможности корректировки этих параметров не-

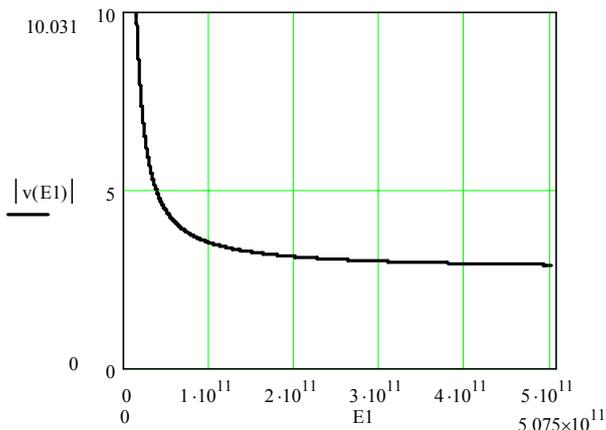


Рис. 4. Линия пересечения трех-  
мерных поверхностей для функ-  
ции  $\tau = f(E, V)$  и  $\tau = 0,0001$  с при  $t$   
 $= 0,3$  кг;  $R = 10$  м

посредственно на объекте ис-  
следования, например путем  
изменения скорости соударе-  
ния  $V_0$  или материала кон-  
тактной накладки на ударное  
устройство.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауков А.Ю. Компьютерные исследования изгибных колебаний пластин с целью оптимизации виброакустического метода контроля слоистых структур. Доклад на XVI сессии РАО. Москва. //Сборник трудов XVI сессии Российского Акустического общества, 2005.

2. 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.

3. Бауков А.Ю. Практический опыт применения виброакустического метода при неразрушающем контроле слоистых конструкций подземного городского строительства. // Горный информационно-аналитический бюллетень, МГГУ, 2004, №6.

4. Гольдсмит Р. Удар. - М.: Мир, 1965.

#### Коротко об авторах

Бауков А.Ю. – аспирант,  
Павлов С.В., Гуляева Н.А. – студенты,  
Московский государственный горный университет.

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

РУКОПИСИ,

1. Цыганков Д.А. Применение способа разрушения хрупких материалов пластичными веществами при отбойке горных пород (459/05-06 — 14.03.06) 11 с.

