

Пользуясь формулами (1) и (4), получим для рассеянного поля следующее выражение:

$$p^{(1)}(r, \varphi, z) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(1)} \psi_m(r, \varphi) e^{i\xi_m |z|},$$

где амплитуды  $A_m^{(1)}$  нормальных мод вычисляются по формуле

$$A_m^{(1)} = -A_q^{(0)} \left\{ \sum_{\nu=0}^{N-1} \frac{\theta_m \xi_m}{\theta_\nu \xi_\nu} \psi_\nu^2(r_0, \varphi_0) \right\}^{-1} \psi_q(r_0, \varphi_0) \psi_m(r_0, \varphi_0). \quad (5)$$

Полное поле в волноводе равно  $p^{(0)} + p^{(1)}$ , амплитуда  $q$ -й прошедшей моды будет  $A_q^{(0)} + A_q^{(1)}$ .

Из формулы (5) можно сделать следующие заключения:

– в одномодовом волноводе резонатор полностью отражает нулевую падающую моду (при  $q=0, N=1$  имеем  $A_0^{(1)} = -A_0^{(0)}$ );

– в двухмодовом волноводе резонатор будет полностью отражать нулевую падающую моду только при помещении его в узел распределения давления первой моды (при  $q=0, N=2, \psi_1(r_0, \varphi_0) = 0$  имеем  $A_0^{(1)} = -A_0^{(0)}, A_1^{(1)} = 0$ );

– в многомодовом волноводе резонатор эффективно рассеивает падающую моду в нормальные моды с другими (в основном высокими) номерами;

– резонатор не рассеивает падающую моду при помещении его в узел распределения давления этой моды (при  $\psi_q(r_0, \varphi_0) = 0$  имеем  $A_m^{(1)} = 0$ ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973.
2. Лапин А.Д. Применение резонаторов для увеличения затухания звука в волноводе, облицованном звукопоглощающим материалом // Акуст. журн. 1966, Т. 12, № 3, С. 333–339.

Акустический институт  
им. Н.Н. Андреева  
Российской Академии наук

Поступило в редакцию  
13.01.92

УДК 534.222; 539.3

© 1992 г. В.М. Родюшкин

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ УПРУГОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВОЛНЫ

Ультразвуковая диагностика – это один из экспериментальных подходов, пригодных для изучения деформации твердых тел. С помощью ультразвука, например, измеряют статические напряжения, используя эффект акустоупругости [1]. Известен метод измерения динамических деформаций [2, 3], при котором твердое тело зондируется непрерывной упругой высокочастотной волной. Здесь использован эффект нерезонансного параметрического взаимодействия волн, который впервые наблюдался в жидкости [4] и позже в упругих средах [5]. На базе этого эффекта удается построить методику измерения импульсных деформаций, возникающих при ударе.

Чтобы убедиться в адекватности предложенной методики следует: вычислить деформации, возникающие в упругой среде при ударе; решить задачу о нерезонансном параметрическом взаимодействии упругой высокочастотной волны с этими деформациями, т.е. найти функциональную связь между реально измеряемым сигналом и законом изменения параметров в высокочастотной волне; измерить сигнал – отклик ультразвуковой волны на ударное нагружение и, наконец, сопоставить теоретический прогноз с результатами эксперимента.

Для выполнения поставленной задачи необходимо тестовое нагружение и аппаратура, способная фиксировать изменения параметров ультразвуковой волны во времени.

В качестве тестового использовано доступное для расчета нагружение: удар шара по полупространству, на поверхность которого он падает с заданной высоты. Оценка возникающих деформаций основывается на наипростейшей квазидинамической безволновой теории [6]. Рассчитываются ударная сила  $p$ , длительность контакта  $t_0$ , распределение поверхностных напряжений  $q$ , а также внутренние трехосные напряжения. Для условий эксперимента эти величины имели значения:  $p = 13,8$  кН;  $q_0 = 11,2$  ГПа;  $q = q_0 \sin(\pi t/t_0)$ ;  $t_0 = 0,28$  мс при  $h = 0,88$  м и  $m = 0,094$  кг. Про-



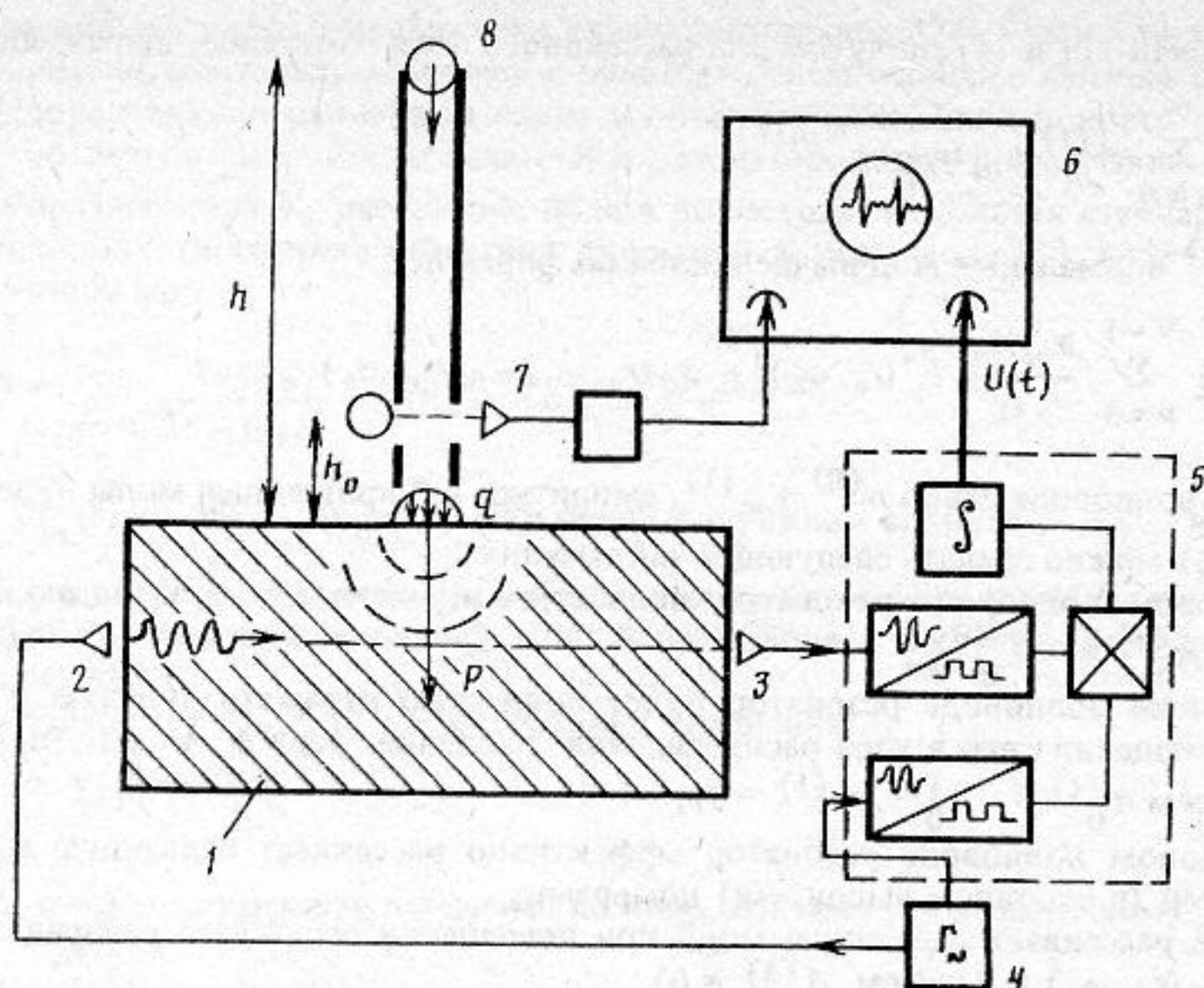


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования импульсных деформаций в массивном образце — 1. Здесь 2, 3 — излучатель и приемник ультразвуковых колебаний, создающие упругую волну; 4 — высокостабильный генератор на частоте 2 МГц; 5 — синхронный детектор; 6 — осциллограф С9-8; 7 — система синхронизации; 8 — ударник, шар массой  $m$

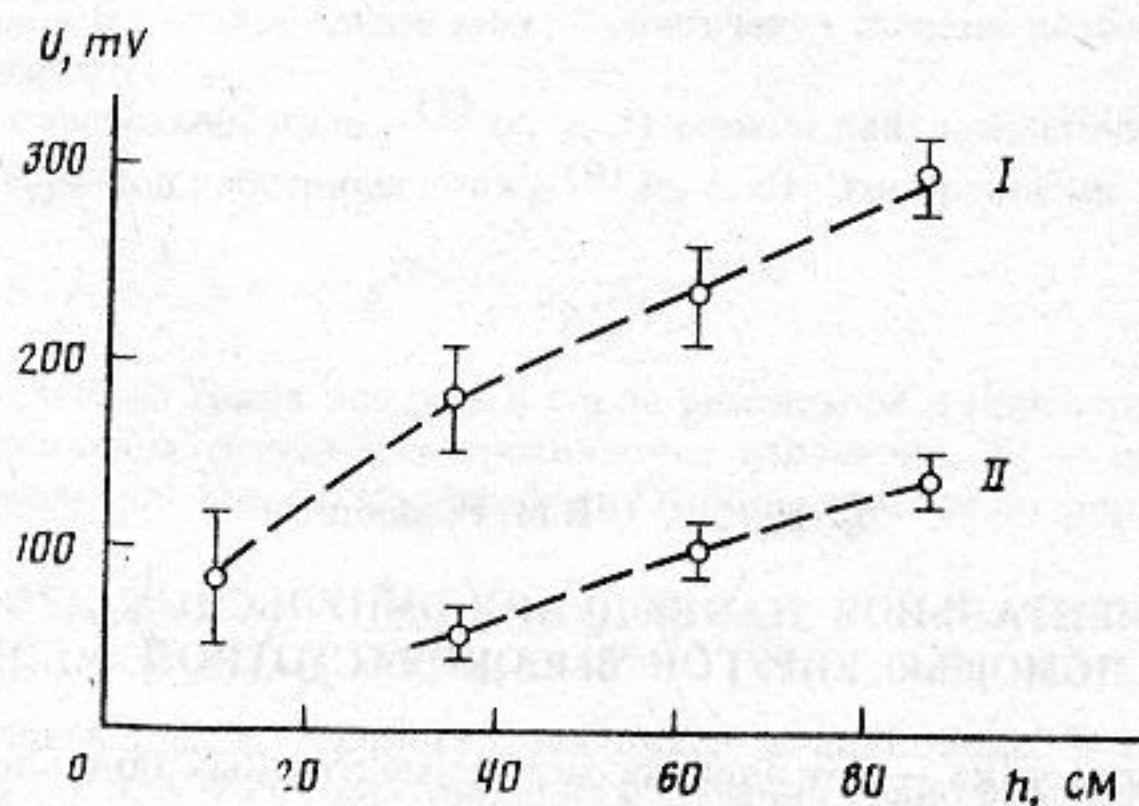


Рис. 2. Зависимость амплитуды импульсного выходного сигнала  $u(t)$  от ударной силы  $P \approx h^{3/5} \cdot m^{3/5}$ . I —  $m = 94$  г, II —  $m = 8,5$  г

должительность удара оказалась много больше времени прохода волн напряжений по ударнику — шару, порядка  $6 \cdot 10^{-6}$  с, что подтверждает корректность применения выбранной теории.

Экспериментальное наблюдение импульсных деформаций заключалось в измерении сигнала-отклика ультразвуковой волны на ударное нагружение и проводилось на соответствующем стенде (рис. 1). Сигнал с опорного генератора подается на излучатель ультразвуковых колебаний и на вход синхронного детектора (СД). Ультразвуковая волна, сформированная излучателем, проходит образец и, попадая на приемник, возбуждает в нем сигнал, подаваемый на второй вход СД. Работа СД основана на формировании из синусоидального напряжения импульсного и дальнейшей обработки сигнала на логических элементах. Это обеспечило необходимые технические возможности аппаратуры, которые, в свою очередь, обусловили диапазон исследуемых ударных процессов. При отсутствии в образце на пути ультразвуковой волны импульсных деформаций, выходной сигнал с СД обусловлен только шумами схемы. Они определяют порог чувствительности по уровню модуляции фазы, который составлял значение 80 дБ. Динамический диапазон, равный 40 дБ, ограничивал максимальный уровень модуляции фазы, который измеряется СД. Временные характеристики



сигнала-отклика на ударное нагружение характеризуются длительностью  $\tau$  и крутизной фронта  $\tau^*$ . Прохождение такого сигнала через измерительную систему без искажений возможно в случае, когда амплитудно-частотная характеристика системы будет линейна от частоты  $1/\tau$  до  $1/\tau^*$ . СД обеспечивал обработку сигнала в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц.

В направляющей трубе, на расстоянии  $h_0$  от поверхности образца, сделаны два отверстия, сквозь которые проходит луч света от источника – лампы накаливания к фотодиоду, подключенному к схеме формирования синхроимпульса. Шар, падая в трубе, перекрывает луч света, вследствие чего вырабатывается синхроимпульс, опережающий начало нагружения на  $(1 - \sqrt{1 - h_0/h}) \cdot \sqrt{2h/g}$  – время пролета расстояния  $h_0$ , и запускается регистрирующая аппаратура. Здесь  $g$  – ускорение свободного падения. Подбирая соответствующим образом высоту и развертку осциллографа, на экране наблюдается при падении шара на образец импульс – отклик ультразвуковой волны на ударное нагружение образца.

Результаты теоретического прогноза и данные о величине и форме непосредственно измеряемого отклика ультразвуковой волны при ударе шара по образцу приведены на рис. 2. Они демонстрируют, что методика, основанная на эффекте нерезонансного параметрического взаимодействия волн, пригодна для измерения импульсных деформаций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гузь А.Н., Махорт Р.Г., Гуца О.И.* Введение в акустоупругость. Киев: Наук. думка, 1977. 152 с.
2. *Малюков О.В., Родюшкин В.М.* Применение ультразвука для измерения динамических сил // *Машиноведение*. 1988. № 2. С. 98–100.
3. *Лебедев В.П., Родюшкин В.М.* Метод экспериментальной оценки неоднородности поля внутренних напряжений в элементах машин с помощью ультразвука // *ПМТФ*. 1990. № 4. С. 153–156.
4. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Измерение взаимодействия звуковых волн в жидкости // *Акуст. журн.* 1958. № 4. С. 321–324.
5. *Конюхов Б.А., Шалашов Г.М.* О нерезонансных параметрических взаимодействиях упругих волн в изотропной упругой среде // *Изв. АН СССР. МТТ*. 1976. Вып. 5. С. 178–183.
6. *Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др.* Динамика удара / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 296 с.

Нижегородский филиал  
Института машиноведения  
им. А.А. Благонравова  
Российской Академии наук

Поступило в редакцию  
01.08.91