

В результате исследований показано, что вибропоглощающие покрытия являются эффективным средством снижения вибраций рам механизмов. Эффективность при относительном весе покрытия $15 \div 23\%$ составила в среднем 8–12 дБ в области частот 100 Гц – 10 кГц. Использование предложенного способа расчета позволяет оценить ожидаемую эффективность при проектировании демпфируемых покрытиями рам механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов В.Б., Тартаковский Б.Д. О статистическом методе оптимизации размещения вибропоглощающего покрытия на сложной конструкции // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 1. С. 166–121.

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

Поступило в редакцию
16.05.91

УДК 534.222

© 1992 г. Ю.С. Голик, Ю.Ф. Забашта, В.Н. Махровский

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НА МОДУЛИ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН

С термином "динамическая нелинейность" в физической акустике [1] связывают нелинейность соотношения между тензорами напряжений σ_{jk} и деформаций ϵ_{jk} :

$$\sigma_{jk} = c_{jklm} \epsilon_{lm} + b_{jklmpr} \epsilon_{lm} \epsilon_{pr} + \dots, \quad (1)$$

где c_{jklm} – модули второго порядка [2] – константы, характеризующие поведение материала в линейной области.

Величины b_{jklmpr} называют [2] модулями третьего порядка. В данной статье впервые исследуется влияние ориентации на модули третьего порядка. Данные эксперимента используются для получения новых сведений о механизме неупругости в полимерах.

Пусть материал подвергнут действию двух деформационных полей: статического $\epsilon^{(c)}_{jk}$ и акустического $\epsilon^{(a)}_{jk}$ так, что результирующий тензор деформации оказывается суммой:

$$\epsilon_{jk} = \epsilon^{(c)}_{jk} + \epsilon^{(a)}_{jk} \quad (2)$$

и выполняется условие:

$$\epsilon^{(a)}_{jk} \ll \epsilon^{(c)}_{jk}. \quad (2a)$$

Последнее позволяет после подстановки (2) в (1) пренебречь членами, содержащими $\epsilon^{(a)}_{lm} \epsilon^{(a)}_{pr}$, $\epsilon^{(a)}_{lm} \epsilon^{(a)}_{pr} \epsilon^{(a)}_{st}$, после чего выражение (1) приобретает вид

$$\sigma_{jk} = c_{jklm} (\epsilon^{(a)}_{lm} + \epsilon^{(c)}_{lm}) + b_{jklmpr} \epsilon^{(c)}_{pr} \epsilon^{(a)}_{lm} + \dots \quad (3)$$

Рассмотрим величину

$$c^{(a)}_{jklm} = \partial \sigma_{jk} / \partial \epsilon^{(a)}_{lm}, \quad (4)$$

которая, как это следует из (3), равна

$$c^{(a)}_{jklm} = c_{jklm} + b_{jklmpr} \epsilon^{(c)}_{pr} + \dots \quad (5)$$

Из формулы (5) следует возможный способ измерения констант b_{jklmpr} и других модулей высших порядков. Действительно, согласно [3], величина $c^{(a)}_{jklm}$ – это не что иное, как модуль, измеряемый при акустических исследованиях, или, как его еще называют, акустический модуль. Но если это так, то значение модулей высших порядков можно получить, как следует из (5), исследуя зависимость акустического модуля от статической деформации.

Описанный способ определения модулей высших порядков реализуется на установке, блок-схема которой изображена на рис. 1. Звуковая волна, возбуждаемая излучателем 1, распространяется вдоль исследуемого образца 2 и отражается от приемника 3. Количественной характеристикой акустического контакта может служить коэффициент отражения звуковой волны от приемника. Его постоянство свидетельствует о стабильности акустического контакта. Так как теория акустического интерферометра [4] предусматривает наличие интерференции звуковых волн только на участке образца между излучателем и приемником, то коэффициент отражения должен быть по возможности большим. Питание излучателя 1 осуществляется от синтезатора частоты 4. Для

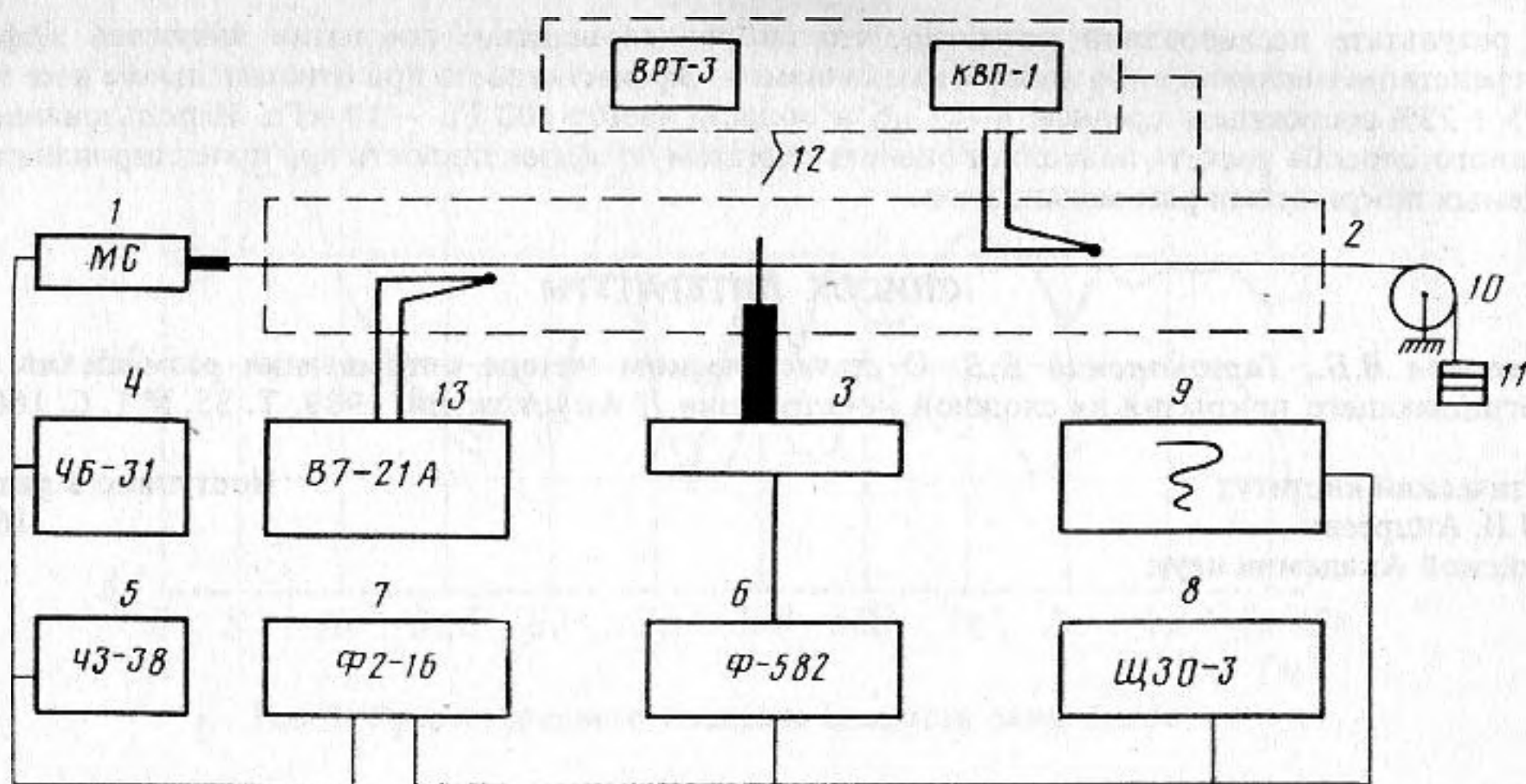


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения акустических параметров полимерных волокон

контроля частоты служит частотомер 5. Электрический сигнал с выхода приемника после усиления резонансным усилителем 6 поступает на измеритель разности фаз 7, вольтметр 8 и двухканальный самописец 9. На ленте самописца регистрируются амплитуда и разность фаз колебаний в зависимости от расстояния между излучателем и приемником.

Блок 10 и набор грузов 11 предназначены для создания различных натяжений исследуемого волокна. На колесе блока нанесена шкала, позволяющая контролировать растяжение образца при его нагружении.

Конструкция приемника 3 обеспечивает стабильный акустический контакт с исследуемым образцом. Коэффициент отражения составляет $0,95 \pm 0,02$. Зависимость амплитуды колебаний от расстояния, полученная на установке с усовершенствованным приемником, практически совпадает с вычисленной теоретически. Для термостатирования образца служит термокриокамера 12, позволяющая ступенчато изменять температуру образца с необходимыми температурным шагом в интервале $110 \div 450$ К. Стабилизация низких температур осуществляется путем регулирования интенсивности подачи газообразного азота в камеру 12. Температура образца измеряется термопарой 13, которая перемещается вдоль образца вместе с приемником 3.

Погрешности измерения скорости звука и коэффициента поглощения на частоте 12,93 кГц не превышают 0,2 и $3 \div 5\%$ соответственно. Погрешность стабилизации температуры в интервале $110 \div 450$ К не более $\pm 1,0$ К. Изменение температуры вдоль оси камеры составляет $\pm (1,0 \pm 1,5)$ К, уменьшаясь к середине рабочего интервала температур.

Как видно из описания установки, в эксперименте реализуется одноосное напряженное состояние, так что место выражения (5) занимает формула

$$E(a) = E + BE(c) + \dots, \quad (6)$$

где $E(a)$ — экспериментально определяемый акустический модуль Юнга, E, B — соответственно модули Юнга второго и третьего порядка.

Объектами исследований были полиоксиметиленовые (ПОМ) волокна, полученные из гомополимера и сополимера триоксана и 1,3-диоксолана, содержание которого в полимере 2%. На установке УФП-2 формовалась филаментная нить, состоящая из 39 моноволокон. Молекулярная масса — $6 \cdot 10^4$. Для создания ориентации волокна вытягивались на стенде ВСТВ-1 при скорости 10 м/мин и температуре 423 К, в результате были получены ПОМ-волокна с кратностью вытяжки 1; 7; 9; 11. Для измерения акустических параметров волокон с кратностью вытяжки 1 выделялись пять моноволокон с целью уменьшения влияния трения между волокнами и увеличения площади поперечного сечения (в сравнении с моноволоконком). Для нитей с кратностью вытяжки более 7 зависимости коэффициентов отражения и поглощения от числа волокон не было обнаружено в ходе предварительных экспериментов, поэтому для исследований бралась филаментная нить из 39 волокон. Перед измерением волокна в ПОМ-нитях укладывались параллельно, их поверхность очищалась этиловым спиртом.

Как это следует из (1), при определении модулей второго, третьего и т.д. порядков материал предполагался нерелаксирующим: речь идет о мгновенных модулях. Соответственно этому, чтобы исключить влияние релаксационных процессов, а значит, и деформацию ползучести, измерения проводились при температуре 123 К, лежащей заведомо ниже главной области релаксации. При выбранной температуре деформация ползучести практически отсутствовала. Значение модулей

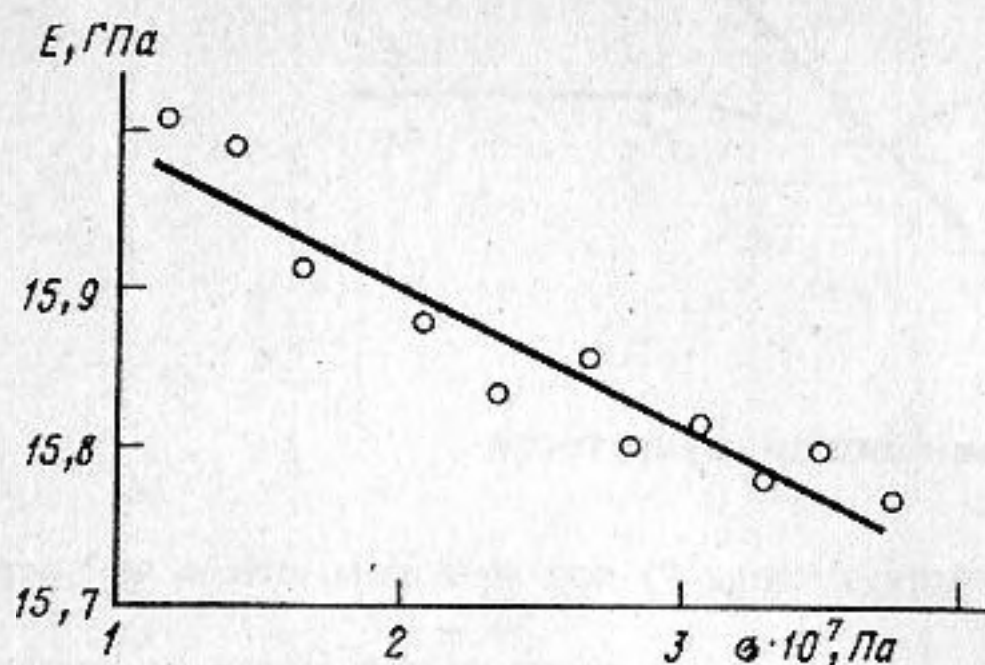


Рис. 2

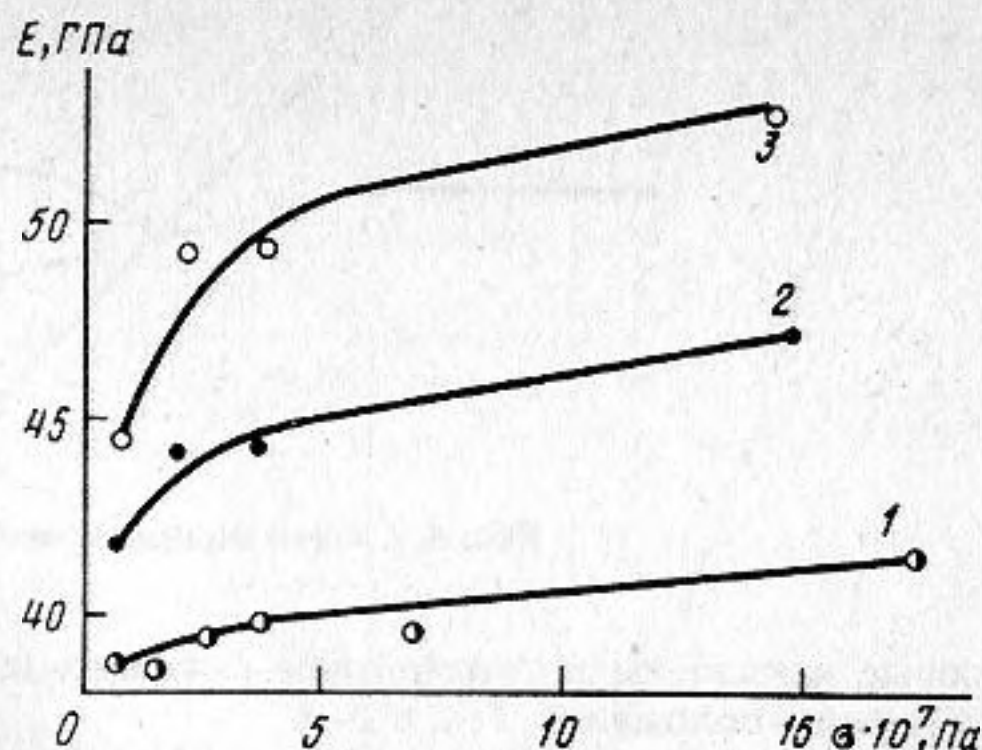


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость акустического модуля Юнга от статической нагрузки ПОМ-волокна с кратностью вытяжки 1

Рис. 3. Зависимость акустического модуля Юнга от статической нагрузки ПОМ-волокна с кратностью вытяжки 7 (кривая 1), 9 (кривая 2), 11 (кривая 3)

Юнга второго порядка для различных напряжений, полученные в результате акустических измерений, представлены на рис. 2, 3. Рассчитанные по кривым (рис. 2, 3) значения модулей третьего порядка приведены ниже.

Кратность вытяжки	Модуль третьего порядка B , ГПа
1	-0,13
7	0,19
9	0,85
11	1,70

Наиболее примечательным фактом из полученных экспериментальных данных, по нашему мнению, является инверсия (изменение знака) модулей третьего порядка при ориентации. Этот факт можно объяснить следующим образом. Как известно, простейшей моделью, на которой иллюстрируется неупругость материала, является двухатомная модель твердого тела. "Мгновенная неупругость" такой модели является следствием асимметрии потенциала взаимодействия и проявляется в уменьшении силовой константы при увеличении расстояния между атомами.

Если теперь твердое тело разбить на пары атомов и предположить, что в каждой паре действует центральная сила, как это имеет место в двухатомной модели, то прежний вывод по отношению к каждой паре останется в силе, что в результате должно обеспечить уменьшение макроскопического модуля при одноосном растяжении, т.е. отрицательное значение модуля третьего порядка.

Центральным силам, как известно, соответствует симметричный тензор напряжений. Поэтому отрицательный знак модуля третьего порядка — свидетельство преимущественного вклада симметричной части тензора напряжений в неупругость. В связи с последними рассуждениями можно предположить, что положительный знак модуля B соответствует преобладающему вкладу в неупругость нецентральных сил и, следовательно, несимметричной части тензора напряжений — моментных напряжений. По аналогии с известным термином "моментная упругость" [5] уместно употребить в данном случае термин "моментная неупругость". Появление нецентральных сил в полимере вызвано зависимостью потенциальной энергии цепи u от углов поворота связей друг относительно друга, относящихся к так называемым естественным координатам. Таких координат две: α — угол между двумя соседними химическими связями и φ — угол поворота связи относительно плоскости, образованной двумя предыдущими связями.

Однако в силу известного неравенства $\partial u / \partial \alpha^2 |_{\alpha = \alpha_0} \gg \partial^2 u / \partial \varphi^2 |_{\varphi = \varphi_0}$, где нулевым индексом обозначены значения величин в отсутствие внешней силы, можно утверждать, что справедливы аналогичные неравенства и для высших производных: $\partial^3 u / \partial \alpha^3 |_{\alpha = \alpha_0} \gg \partial^3 u / \partial \varphi^3 |_{\varphi = \varphi_0}$ и т.д., а последнее означает, что в нулевом приближении по малым параметрам, возникающим как результат указанных неравенств, можно учитывать только нецентральность сил (а следовательно, и моментную неупругость), связанную только с координатой α .

Механизм возникновения неупругости в этом случае легко выявить, рассматривая участок цепи, состоящий из трех звеньев (рис. 4). Как только к участку прикладывается растягивающая сила P , угол α увеличивается, а связи 1-2 и 2-3 переходят в положение отрезков 1'-2' и 2'-3'

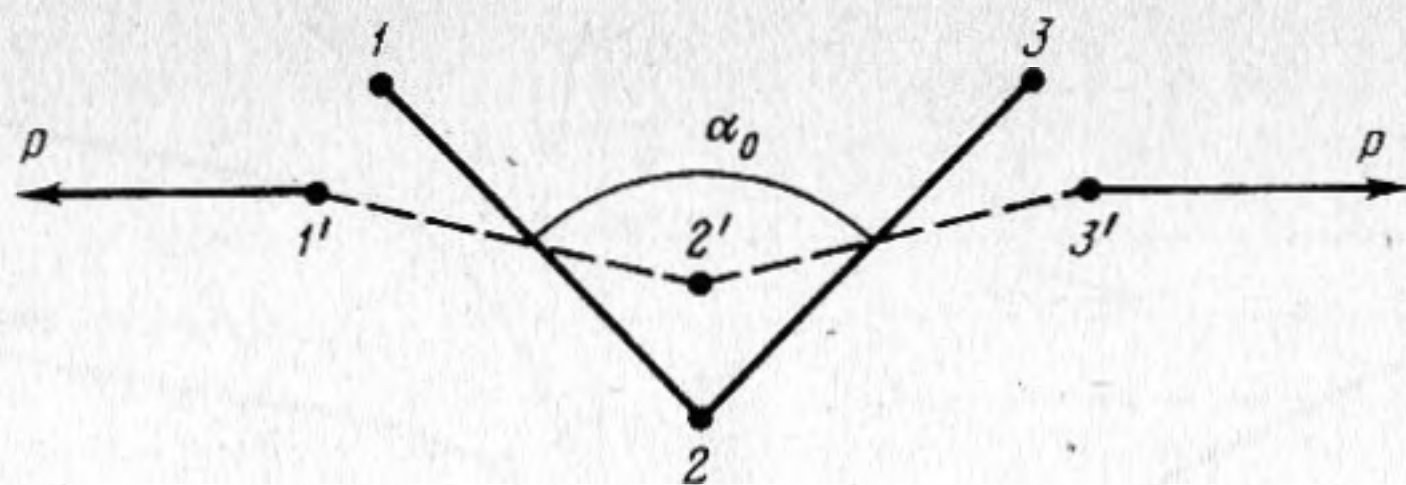


Рис. 4. Схема возникновения моментной неупругости

которые наклонены к горизонтали (направлению действия силы P) под меньшим углом, чем первоначальные положения $1-2$ и $2-3$.

Как известно, $\partial^2 u / \partial l^2 |_{l=l_0} \gg (1/l_0^2) (\partial^2 u / \partial \alpha^2) |_{\alpha=\alpha_0}$, где l — длина связей, поэтому модуль упругости модели, представленной на рис. 4, определяется главным образом наклоном связей по отношению к направлению растяжения. Тогда, если считать P статической растягивающей силой, то очевидно, что акустические измерения должны обнаружить возрастание модуля с увеличением силы P .

Таким образом, можно говорить о существовании для полимеров двух конкурирующих микроскопических механизмов мгновенной неупругости: связанной с центральными силами (это преимущественно ван-дер-ваальсовы взаимодействия; неупругостью, вызванной деформацией химических связей, можно пренебречь) и связанной с изменением валентных углов в полимерной цепи. Первый механизм преобладает в неориентированных полимерах, второй — моментная неупругость — превалирует в высокоориентированных полимерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973.
2. Ноздрев В.Ф., Федорищенко Н.В. Молекулярная акустика. М.: Высш. шк., 1974.
3. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975.
4. Ballou J.W., Smith J.C. Dynamik measurements of the polymers physical properties // J. Appl. Phys. 1949. V. 20. № 6. P. 493–502.
5. Koiter W.T. Couple-Stresses in the theory of elasticity // Proceedings Koninklijke Nederlandse Akademie Ven Wetenschappen. 1964. V. 67. № 1. P. 17–29, 30–44.

Киевский государственный университет
им. Т.Г. Шевченко

Поступило в редакцию
01.08.91

УДК 534.231

© 1992 г. Г.А. Грачев, Е.В. Рашидова, А.В. Розенберг

МИНИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ПЕРЕНОСА ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ В ВОЛНОВОДЕ ПЕКЕРИСА

При расчетах пространственно-временной структуры импульсного сигнала методом дискретного преобразования Фурье в модельных задачах, а также при планировании экспериментов по распространению импульсов в океанических волноводах необходимо уметь оценивать априори длительность регистрируемого сигнала. В плоскостных волноводах длительность короткого импульса на горизонтальном расстоянии r от места его генерации определяется соотношением $\Delta T = r(U_{\min}^{-1} - U_{\max}^{-1})$, где U_{\max} , U_{\min} — максимальная и минимальная скорости переноса звуковой энергии импульсом в волноводе. Как известно [1], максимальная скорость переноса звуковой энергии в волноводе равна скорости звука в нижнем полупространстве c_{∞} . Функциональной зависимости от параметров среды минимальной скорости переноса звуковой энергии в волноводах, насколько нам известно, получено не было (за исключением идеального волновода, где $U_{\min} = 0$).

В настоящей работе приводится вывод соотношения между величиной U_{\min} и параметрами волновода Пекериса.

Дисперсионное уравнение для определения фазовых скоростей мод, распространяющихся в волноводе Пекериса, имеет вид [2]

$$kh(1 - n_1^2)^{1/2} = \varphi_1, \quad (1)$$