УДК 534.2

КВАЗИЛЭМБОВСКИЕ ВОЛНЫ: ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Н.В. Клюева

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

natali.kl01@gmail.com

Поступила в редакцию 24.08.2011

Использование волн Лэмба для контроля тонкостенных изделий и конструкций сложной формы позволяет проводить диагностику на относительно больших расстояниях в сравнении с объемными волнами, а также имеет другие известные преимущества. Однако то, с чем на практике приходится иметь дело, – часто далеко не классический упругий слой со свободными поверхностями; так, например, газопроводные трубы для укладки на дно моря, покрыты защитным битумным слоем, толщиной не менее десятой доли от толщины собственно трубы. Отличия волн в подобных системах от классических волн Лэмба существенны и, как в работе показано, их необходимо учитывать. Будем называть распространяющиеся возмущения с распределением смещений в сагиттальной плоскости квазилэмбовскими волнами. Исследовано распространение квазилэмбовских волн в пачке из нескольких упругих и жидких слоев. Проанализированы дисперсионные свойства распространяющихся мод. Особое внимание уделено случаю упругого слоя, покрытого слоем сжимаемой вязкой жидкости, представляющему большой интерес для неразрушающего контроля. Предложена модификация матричного метода для расчета волновых полей, позволяющая расширить область его применимости и учесть сложную реологию вязкой жидкости защитных слоев (слоя). Рассмотрены зависимости коэффициентов затухания квазилэмбовских мод от отношения толщин слоев и частоты, имеющие, в отличие от недиспергирующих волн, сложный характер. Определены амплитудно-частотные характеристики смещений упругой поверхности слоя, обусловленные квазилэмбовскими волнами при некоторых видах поверхностной нагрузки. В рамках модели Крылова – Тирстена рассмотрено влияние свободной поверхности, имеющей дефекты, на дисперсионные и амплитудно-частотные характеристики нормальных мод.

Ключевые слова: упругий и жидкий слои, дисперсия и затухание нормальных мод.

Распространение акустических волн в упругой пластине, контактирующей с жидкостью, ранее исследовалось в предположении, что жидкость безгранична. Для приложений представляют большой интерес случаи, когда толщина слоя жидкости меньше или сравнима с толщиной упругого слоя. В сравнении с упругим слоем со свободными поверхностями, в волноводе из упругого и жидкого слоев больше распространяющихся нормальных мод на той же частоте и это число возрастает с увеличением толщины слоя невязкой жидкости. Моды уже нельзя разделить на симметричные и антисимметричные и, что более важно, появляются диапазоны частот очень быстрого изменения фазовых, групповых скоростей, а также участки очень близкого схождения дисперсионных кривых. Волны в упругом слое, погруженном в безграничную жидкость, часть акустической энергии которых излучается в бесконечную невязкую жидкость, часто называют вытекающими волнами Лэмба. Волны в рассматриваемых случаях будем называть квазилэмбовскими.

Показано, что дисперсионное уравнение для квазилэмбовских волн, распространяющихся в упругом слое, покрытом слоем невязкой сжимаемой жидкости, имеет вид

$$AS-\frac{1}{2}R\Omega^4[(\Omega^2-2k^2)^2\operatorname{ch}\zeta_*\operatorname{sh}\zeta_*(1-2\operatorname{ch}^2\eta_*)-$$
$$-4k^2\eta\zeta\operatorname{ch}\eta_*\operatorname{sh}\eta_*(1-2\operatorname{ch}^2\zeta_*)]\frac{\operatorname{th}\gamma l}{\gamma}=0,$$

где

$$S=(\Omega^2-2k^2)^2\operatorname{sh}\zeta_*\operatorname{ch}\eta_*-4k^2\zeta\eta\operatorname{ch}\zeta_*\operatorname{sh}\eta_*,$$
$$A=(\Omega^2-2k^2)^2\operatorname{ch}\zeta_*\operatorname{sh}\eta_*/\eta-4k^2\zeta\operatorname{sh}\zeta_*\operatorname{ch}\eta_*,$$
$$\Omega=\omega h/c_s,\quad k=k'h,\quad l=l'/h,\quad \gamma^2=k^2-\Omega^2c_s^2/c_f^2,$$
$$\eta^2=k^2-\Omega^2c_s^2/c_p^2,\quad \eta_*=\eta/2,\quad \zeta^2=k^2-\Omega^2,$$
$$\zeta_*=\zeta/2,\quad R=\rho/\rho_s;$$

c_s, c_p – скорости сдвиговой и продольной волн; ρ, ρ_s – плотности жидкости и упругого материала; ω – циклическая частота; k' – волновое число; h – толщина упругого слоя; l' – толщина слоя жидкости.

Заметим, что $S(\Omega, k)=0$ является известным дисперсионным уравнением для симметричных мод в свободном упругом слое, а $A(\Omega, k)=0$ – для антисимметричных мод. На рис. 1 показаны зависимости фазовых скоростей от безразмерной частоты. Представлен случай, когда параметры материала упругого слоя соответствуют параметрам железа: плотность $\rho_s = 7878$ кг/м^3, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$ и скорость сдвиговой вол-

При учете вязкости жидкости дисперсионное уравнение может быть записано в следующем виде

$$g_{31}g_{42} - g_{32}g_{41} = 0.$$

Здесь g_{ij} – элементы матрицы $\mathbf{G}_2\mathbf{G}_1$, где $\mathbf{G}_n = \mathbf{H}_n/(k^2 - \zeta_n^2)$, матрица $\mathbf{H}_n$ имеет вид:

$$\begin{pmatrix} -\upsilon_n^2\mathrm{ch}\zeta_n + 2k^2\mathrm{ch}\eta_n & -ik(\upsilon_n^2\,\eta_n^{-1}\mathrm{sh}\eta_n - 2\zeta_n\mathrm{sh}\zeta_n) & -ik(\mathrm{ch}\eta_n - \mathrm{ch}\zeta_n z) & k^2\eta_n^{-1}\mathrm{sh}\eta_n - \zeta_n\mathrm{sh}\zeta_n \\ ik(\upsilon_n^2\zeta_n^{-1}\,\mathrm{sh}\zeta_n - 2\eta_n\,\mathrm{sh}\eta_n) & -\upsilon_n^2\mathrm{ch}\eta_n + 2k^2\mathrm{ch}\zeta_n & k^2\zeta_n^{-1}\mathrm{sh}\zeta_n - \eta_n\mathrm{sh}\eta_n & -ik(\mathrm{ch}\eta_n - \mathrm{ch}\zeta_n) \\ -2ik\upsilon_n^2(\mathrm{ch}\eta_n - \mathrm{ch}\zeta_n) & \upsilon_n^4\eta_n^{-1}\mathrm{sh}\eta_n - 4k^2\zeta_n\mathrm{sh}\zeta_n & -\upsilon_n^2\mathrm{ch}\eta_n + 2k^2\mathrm{ch}\zeta_n & -ik(\upsilon_n^2\eta_n^{-1}\,\mathrm{sh}\eta_n - 2\zeta_n\mathrm{sh}\zeta_n) \\ \upsilon_n^4\eta_n^{-1}\mathrm{sh}\zeta_n - 4k^2\zeta_n\mathrm{sh}\eta_n & -2ik\upsilon_n^2(\mathrm{ch}\eta_n - \mathrm{ch}\zeta_n) & ik(\upsilon_n^2\,\zeta_n^{-1}\mathrm{sh}\zeta_n - 2\eta_n\mathrm{sh}\eta_n) & -\upsilon_n^2\mathrm{ch}\zeta_n + 2k^2\mathrm{ch}\eta_n \end{pmatrix},$$

ны $c_s = 3230$ м/с. Параметры жидкости – это параметры воды с плотностью $\rho = 1000$ кг/м^3 и скоростью звука $c_f = 1400$ м/с, толщина слоя жидкости составляет одну десятую от толщины упругого слоя. На низких частотах фазовые скорости низших мод приближаются к фазовым скоростям нулевой антисимметричной (изгибной) и нулевой симметричной (продольной) мод свободного упругого слоя. На рисунке пунктиром нанесены асимптоты, соответствующие скоростям рэлеевской волны c_{R} и волны Стоунли (Stonely) c_{St}.

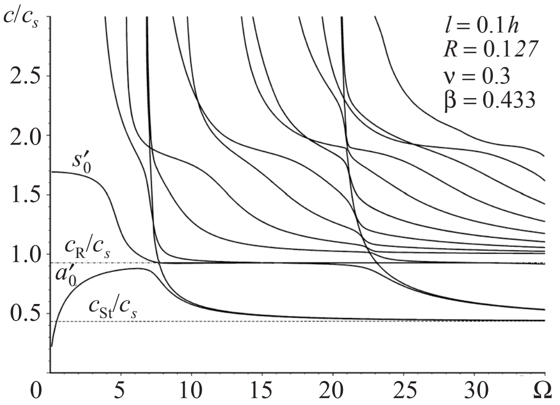

Рис. 1

Совокупность критических частот (частот запирания) является объединением множества корней уравнений

$$2\sin(\Omega c_s/2c_p)\cos(\Omega c_s/2c_p) + Rc_f c_p^{-1}\times$$
$$\times\mathrm{tg}(\Omega l c_s/c_f)\cos(\Omega c_s/c_p) = 0,\ \ \Omega = \pi n\ (n = 1, 2, \ldots).$$

где $n = 2$ соответствует жидкости,

$$\upsilon_n^2 = (k^2 + \zeta_n^2),\quad \eta_1 = \eta,\quad \xi_1 = \xi,$$
$$\zeta_2^2 = (k^2 - i\Omega\mathrm{X}^{-1})l'^2,$$

$\eta_2^2 = (k^2 - \Omega^2 R/(\Lambda - 4/3 i\Omega\mathrm{X} - i\Omega\mathrm{K}))l'^2$, $\Lambda = K_f/\mu$, K_f – модуль объемной упругости жидкости, $\mathrm{X} = \chi/(\rho_s, s_c, h)$, $\mathrm{K} = \kappa/(\rho_s, s_c, h)$; χ, κ – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости соответственно. Рассмотрены зависимости коэффициентов затухания квазилэмбовских мод от отношения толщин слоев и частоты. Определены амплитудно-частотные характеристики смещений упругой поверхности слоя, обусловленные квазилэмбовскими волнами при некоторых видах поверхностной нагрузки. Исследовано также распространение волн в случае, когда свободная поверхность слоя имеет особые свойства, например вследствие коррозионной поврежденности или технологической обработки, что учитывалось в рамках модели Крылова–Тирстена со следующим неклассическим граничным условием

$$(\lambda + 2\mu)\frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r}\right) =$$
$$= \Re\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + H\frac{\partial u_z}{\partial t} + \Gamma\Delta u_z,$$

приближенно описывающим, в частности, влияние поверхностных модулей упругости и поверхностного натяжения.

Работа выполнена в сотрудничестве с И.Н. Солдатовым и поддержана РФФИ (проекты №09-01-00356, 09-08-00827).

QUASI-LAMB WAVES: FEATURES AND POSSIBLE APPLICATIONS

N.V. Klyueva

The use of Lamb waves for the control of thin-walled components and structures of complex shape makes it possible to diagnose at relatively large distances in comparison with bulk waves, and also has other notable advantages. However, in practice we have to deal with objects which often far from the classical elastic layer with free surfaces, for example, gas pipes laying on the sea bottom, covered with a protective asphalt layer thickness not less than one tenth of the thickness of the pipe itself. Differences between the normal waves in such systems from the classical Lamb waves are also important, as we have shown them to be considered. The wave disturbances with displacements in the sagittal plane are called below quasi-Lamb waves (or Lamb-type waves). We have studied the propagation of quasi-Lamb waves in a pack of several elastic and fluid layers. The dispersion properties of the propagating modes are investigated. Particular attention is paid to the case of an elastic layer coated with a layer of compressible viscous fluid; this case is of special interest for nondestructive testing. A modification of the matrix method for calculating wave fields that extends its range of applicability and to take into account the complex rheology of a viscous liquid of protective layer or layers is proposed. Complex dependences of the attenuation of quasi-Lamb modes from frequency (and the ratio of layer thicknesses) are studied. For certain types of surface load the amplitude-frequency characteristics of quasi-Lamb waves are determined. In the frame of the Tiersten – Krylov model we consider the effect of free surface with defects on the amplitude-frequency characteristics of normal modes.

Keywords: elastic and fluid layers, dispersion and attenuation of normal modes.