

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В УПРУГОЙ СРЕДЕ

Nurullo Kulmurotov [0009-0000-1500-3421]

Кулмуратов Н.Р. - PhD, доцент. Навоийского государственного горно-технологического университета.

Аннотация. В работе рассматривается распространение собственных волн на полупространстве, на контакте двух тел, различных пластинчатых и цилиндрических тел в неклассические формы. Если на поверхность однородного упругого полу бесконечного упругого тела нанесен слой другого материала, то фазовая скорость поверхностной волны в области длинных волн, сравнимых с толщиной этого слоя, т.е. фазовой скоростью будет зависит от частоты.

Ключевые слова: собственная волна, полупространства, слой, частота, фазовой скоростью, электромагнитных волноводах.

Annotatsiya. Bu ishda xususiy to'lqinlarning yarim fazoda, ikki jismning kontaktida, turli plastinka va silindrsimon jismlarning klassik bo'lmagan formalarida tarqalishi o'rganiladi. Agar materialning qatlami bir xil boshqa elastik yarim cheksiz ya'ni elastik jismning yuzasiga yotqizilsa, u holda bu qatlamning qalinligi bilan taqqoslanadigan uzun to'lqinlar hududida sirt to'lqinining faza tezligi, chastotaga bog'liq bo'ladi.

Kalit so'zlar: xususiy to'lqin, yarim bo'shliqlar, qatlam, chastota, faza tezligi, elektromagnit to'lqin o'tkazgich.

Abstract. The paper examines the propagation of natural waves on a half-space, on the contact of two bodies, various plate and cylindrical bodies in non-classical forms. If a layer of another material is applied to the surface of a homogeneous elastic semi-infinite elastic body, then the phase velocity of the surface wave in the region of long waves comparable to the thickness of this layer, i.e. the phase velocity will depend on the frequency.

Key words: eigenwave, half-spaces, layer, frequency, phase velocity, electromagnetic waveguides.

Введение

В радиоэлектронной технике широко использовались широкие пучки поверхностных волн. До последнего времени эти волноводы не применялись достаточно широко по трем основным причинам. Одна из этих причин связана с двумя недостатками, которые обычно приписывают волноводом: потерями и низкой эффективностью возбуждения. Вторая причина сравнительно редкого использования волноводов связана с вопросом о том, помогают ли они получить устройства, отвечающие современным требованиям [1-3]. В настоящее время серьезно рассматривается использование волноводов в линиях задержки на большие времена задержки, в основном, чтобы устранить уширения пучки. Однако это применения очень узкое и требует низких потерь в волноводе и пренебрежимо малой дисперсии. Третья причина заключается в том, что до сих пор еще нет ни одного волновода, который позволил бы заметно увеличить емкость запоминающих устройств, использующих пучки. Это объясняется остаточной дисперсией, и именно эта дисперсия представляет собой основное препятствие на пути использования волноводов и устройствах хранения информации. Рассматривая волновые процессы в волноводе, можно выделить задачи двух типов. В задачах правого типа мы не интересуемся источником волнового движения и ищем лишь возможные состояния волновода, согласованно сути, речь здесь идет о поиске некоторых резонансных ситуаций - таких частных решений уравнений движения для процессов, которые обеспечивают нулевые граничные условия относительно некоторого числа статических и кинематических факторов [4,5]. Эти частные решения называются

нормальными модами или нормальными волнами в волноводе. Второй тип задач связан с изучением вынужденных волновых движений в волноводе. В связи с наличием бесконечного набора возможных состояний (нормальных мод) в волноводе возникающие здесь задачи отличаются от аналогичных задач для полупространства большей сложностью. При математической формулировке задачи о возбуждении и распространении волн в идеально упругом волноводе появляются определенные затруднения с постановкой условий на бесконечности, которые должны играть ту же роль, что и условие изучения в случае пространства. Ведь уже для полупространства необходимо задавать не только бегущую на бесконечность цилиндрическую волну, но и условие на приповерхностные возмущения – волну Релея. Сформулированные при этом требования исключали из общего представления решения стоящую волн Рэлея. Условия аналогично типа должно ставится и в случай нормальных волн, с учетом дополнительных трудностей - геометрической дисперсии мод в волноводе. Постановка таких условий упругих волноводах затрудняется в связи с тем, что в ряде случаев эту моды имеют противоположные знаки фазовой и групповой скоростей. Поэтому для выяснения смысла указанных условий целесообразно изучить в начале характеристики тех элементарных состояний волновода (нормальных мод), суперпозицией которых представляется волновое поле в общем случае. Затем на основании этих свойств определить систему условий, задающих направленность волнового процесса в упругом волноводе.

Методология

Теоретические результаты, исследования свойств наличие ряда интересных особенностей, которые не имеют аналога для мод в акустических и электромагнитных волноводах. Это обстоятельство стимулировало проведение довольно большого объема экспериментальных работ, целью которых было подтверждение «реальности» характерных черт нормальных мод [6,7]. Мы не будем анализировать здесь постановки экспериментов. Отметим лишь, что в целом они подтвердили выводы, полученные в рамках модели идеально упругого тела для свойств нормальных мод. В заключение еще отметим, что волноводные системы свободны от некоторых недостатков, присущих широким пучкам поверхностных волн. Сфера применений волноводов еще мало, однако в будущем сильно возрасти особенно если будет создан волновод без дисперсии. Анализ распространения волн в упругой среде основан на допущении о справедливости закона Гука, согласно которому напряжения в данной точке среды в моменты времени t пропорциональны деформациям ε в те же самые моменты времени. Следствием этого предположения является тот факт, что энергия серии волн или импульса остается постоянной. На практике, однако, энергия убывает, колебания затухают, и закон Гука нужно рассматривать как первое приближение, которое справедливо только тогда, когда напряжения, определяемые этим законом, велики по сравнению с диссипативными напряжениями, зависящими от скоростей частиц (вязких напряжений) или от производных более высокого порядка от смещений частиц по координатам или по времени. Как правило, влияние этих «негуковых» напряжений для металлов и металлических сплавов достаточно мало, однако они имеют большое значение для резина подобных и строительных материалов, а также для так называемых пластиков, которые обнаруживают существенные временные эффекты под нагрузкой. В теории упругости рассматриваются материалы, обладающие известным свойством упругости. Напряжения и

деформации, возникающие при, нагруженные тел из таких материалов, не зависит от времени. Однако практика эксплуатации конструкций, а также экспериментальные исследования показывают, что многие материалы под нагрузкой, проявляют помимо упругих, ещё и вязкие свойства. Напряжения и деформации в конструкциях, выполненных из таких материалов, зависят от времени нагруженные, а сами материалы называются вязкоупругими.

Вязкоупругие свойства материалов выражаются прежде всего в явлении ползучести, т.е. в постепенном нарастании деформаций при неизменном напряжении. Например, при одноосном напряженном состоянии деформация ε является функцией времени t , т.е. $\varepsilon = \varepsilon(t)$. График этой зависимости называется кривой ползучести. Свойства вязко упругости выражаются также в явлении релаксации, т.е. в постепенном уменьшении напряжений в нагруженном тела при остающейся неизменной деформации. Так, при одноосном напряженном состоянии напряжение при $\varepsilon = \text{const}$ является функцией времени. График этой зависимости называется кривой релаксации (рис.1). К вязкоупругим материалам относятся полимеры и композиты, бетоны и горные породы, лед с включениями и без включений, металлы при повышенных температурах и др. Заметим, что конструкционные металлы при обычных температурах (от -20 до $+20^\circ\text{C}$) ведут себя как упругие тела, а при повышенных (более $+200^\circ\text{C}$) температурах проявляют вязкоупругие свойства. Пластмассы при 0°C имеют слабо выраженные свойства, т.е. близки к упругим телам, но уже при $+50^\circ\text{C}$ проявляют весьма существенные свойства вязкоупругих материалов. Поэтому можно не разделять материалы на упругие и вязкоупругие, а говорить об упругом и вязкоупругом состоянии одного и того же материала в зависимости от температуры или других факторов. К другим факторам можно отнести некоторые особенности эксплуатации конструкций. Такие, например, конструкции, как амортизирующие и виброзащитные устройства, выполненные из упругих материалов, в целом ведут себя под эксплуатационной нагрузкой как вязкоупругие тела. Наличие новое переменной (времени t) усложняет расчет конструкций из вязкоупругих материалов по сравнению с расчетами теории упругости. Основной трудностью является здесь установление зависимостей между напряжениями и деформациями вязкоупругого тела.

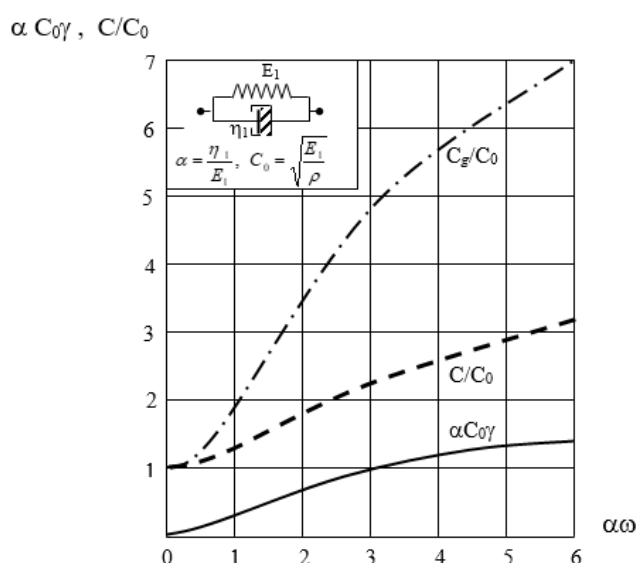


Рис.1. Тело Кельвина-Фойгта. Зависимость фазовой скорости c , групповой скорости c_g и коэффициента затухания γ от частоты $\omega/2\pi$ для синусоидальных волн.

Существует несколько подходов для установления этих зависимостей. Один из них основан на упрощенных механических моделях (модели Фойгта и Максвелла), в которых упругие свойства описываются на основании закона Гука, а вязкие - на основании реологического закона Ньютона о течении вязкой жидкости. Между тем известно, что эти модели не отражают реальное поведение нагруженного тела из вязкоупругого материала и не дают удовлетворительного согласования с экспериментом. Так, например, модель тела Фойгта не обладает свойством релаксации напряжений, а из модели релаксирующего тела Максвелла следует только линейный закон изменения деформации во времени, что является частным случаем деформирования вязкоупругих тел. Обобщая модели Фойгта и Максвелла, можно получить более сложные комбинированные модели (обобщенная модель Кельвина-Фойгта-Мейера), которые во многих случаях оказываются вполне приемлемыми для описания процессов ползучести и релаксации. Для тела Кельвина – Фойгта зависимость напряжения – деформации дается уравнением; учитывая, что, вместо получим

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta_1 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t}$$

Это уравнение совпадает с уравнением Стокса, используемым в акустике. Если обозначить $\eta_1/E_1 = \alpha$ и, то уравнение принимает вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Для синусоидальной волны с начальной амплитудой A и частотой $\omega/2\pi$ решение имеет вид

$$u = A e^{-\gamma x} \exp[i\omega(t - x/c)],$$

где γ - коэффициент затухания и c - фазовая скорость волны. Если то значение u подставить в уравнение, то получится система из двух уравнений для γ и c ; окончательно получим

$$\frac{c^2}{c_0^2} = \frac{2}{\alpha^2 \omega^2} (1 + \alpha^2 \omega^2) (\sqrt{1 + \alpha^2 \omega^2} - 1)$$

$$\alpha c_0 \gamma = \frac{c}{2c_0} \frac{\alpha^2 \omega^2}{1 + \alpha^2 \omega^2} = \frac{\alpha \omega}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 \omega^2}} (\sqrt{1 + \alpha^2 \omega^2} - 1)$$

В динамике конструкций при воздействии цикл напряжений часть механической энергии поглощается в результате диссипационного механизма в материале. В обычных конструкционных материалах достаточно учитывать затухание. Многие материалы, например, материалы, используемые в дорожном строительстве на базе битумов, связные грунты, или материалы современной химии-термопласты, обладают отчетливыми вязкоупругими свойствами. Характерной чертой их вязкоупругости является зависимость упругих и затухающих свойств от температуры или времени нагружения, или же частоты динамического процесса нагружения. Анализ реакций конструкций из таких материалов на динамическое нагружение требует уже более общей формы выражения закономерностей их динамического вязкоупругого действия. Динамические вязкоупругие характеристики материала выражаются комплексным модулем при сдвиге $G^*_{\omega, T} = G_{\omega, T} (1 + i\delta_G \operatorname{sgn} \omega)$, и комплексным модулем объема $B^*_{\omega, T} = B_{\omega, T} (1 + i\delta_B \operatorname{sgn} \omega)$. Устанавливая значения вязкоупругих характеристик $G_{\omega, T}$, $B_{\omega, T}$, δ_G , δ_B при всех частотах ω , полностью определяется вязкоупругое действие материала при данной температуре T .

Список использованных литературы:

- [1]. Анофрикова Н.С.,Сергеева Н.В.Исследование гармонических волн в наследственно - упругом слое. // Изв. Саратов.ун. - дисперсионных уравнений в случае наследственно- упругого слоя. //Вестник Нижегородского та. Сер. Математика. Механика.Информатика. -2014. Т.14. вып.3. С.321- 328.
- [2]. Григоренко А.Я., Ефимова Т.Л., Соколова Л.В. Свободные колебания круговых цилиндрических оболочек переменной толщины в уточненной постановке // Теорет. и прикл. механика. - 2008. -Вып. 43. - С. 111-117.
- [3]. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в уругих телах. - Киев: Наукова Думка, 1981, с. 284.
- [4]. M.R. Ishmamatov, N.R. Kulmurov., A.X. Avezov, T. R. Ruziyev, Z.I. Boltayev. Propagation of Natural Waves on a Multilayer Viscoelastic Cylindrical Body Containing the Surface of a Weakened Mechanical Contact. Journal of Physics: Conference Series (2021) 012127IOP Publishing pp. 1-14. doi:10.1088/ 1742-6596/1921/1/012127 Scopus
- [5]. Matlab Ishmamatov, Nurillo Kulmurov Nasriddin Axmedov, Shaxob Xalilov, Sherzod Ablakulov. Natural Vibrations of the Reinforced Tapered Shell with Taking into Account the Viscoelastic Properties of the Material. E3S Web of Conferences 264, 01011 (2021) Publishing pp. 1-12. CONMECHYDRO – 2021.
- [6]. M.R. Ishmamatov, N.R. Kulmurov., U.I. Safarov, Sh.F. Khalilov, N.B. Akhmedov. Vibrations of Burned Pipes Insulated with Soft Soil under Exposure to Seismic Loads. AIP Conference Proceedings 16.06.2022y. 030123/1-030123/6 p. <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0091544> (N°2- Journal Impact Factor; IF=0,402) p 1-6. Scopus
- [7]. Matlab Ishmamatov, N.R. Kulmurov., Nasriddin Kuldashov, Mirjalol Choriev, and Nasriddin Axmedov. Fluctuations of the ground surface at blasting operations on tunnel structures. E3S Web of Conferences 417, 06003(2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341706003> GEOTECH-2023 Publish. pp.1-12. Scopus
- [8]. Ismoil Safarov, Mukhsin Teshaeв, Tulkin Ruziev, Matlab Ishmamatov, Nurillo Kulmurov. Proper normal waves in a two-layer tube taking into account the rheological properties of materials. E3S Web ofConferences 417, 06004 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341706004> GEOTECH-2023 Publishing pp.1-6.