взаимодействие между соседними слоями описывается соответствующими условиями контакта и непрерывности, которые обеспечивают соответствие перемещений на границах раздела.

Список использованной литературы:

(1). Graff K.F. Wave motion in Elastic solids. Dover publications.

(2). Pochhammer L. Uber die fortpflanzungsgeschwindigkeiten Kleiner schwingungen in einem unbegrenzten isotropen kreiszylinder.

(3). Achenbach J.D. Wave propagation in elastic solids. North-Holland.

(4). Chree C. The equations of an isotropic elastic solid in polar cylindrical coordinates.

(5). Сафаров И., Нуриддинов Б., Нуриддинов З. Распространение собственных волн в вязкоупругой цилиндрической панели переменной толщины. "Лобачевский журнал математики", 2024, т. 45, с. 1246–1253; [Safarov I., Nuriddinov B., Nuriddinov Z. Propagation of own waves in a viscoelastic cylindrical panel of variable thickness. "Lobachevskii Journal of Mathematics", 2024, vol. 45, pp. 1246–1253 (In English). doi: 10. 1134/S1995 080224600663].

(6). Нуриддинов Ж.З., Нуриддинов Б.З., Очалова З.Ш. Распространение собственных волн в плоских трехслойных средах. Изв. вузов. "Математика", 2024, № 10, с. 43–51 [Nuriddinov Zh.Z., Nuriddinov B.Z., Ochilova Z.Sh. Propagation of eigenwaves in plane three-layered media. Russian Mathematics (Iz. VUZ), 2024, vol. 68, № 10, p. 43–51 (In Russian). doi: 10.26907/0021-3446-2024-10-51-60].

(7). Safarov I.I., Usmonov B.Sh. Juraev S.I., Teshaev M.K. Natural Vibrations of a Viscoelastic Three-Layer Cylindrical Body. Russ Math. 2025, 69, p. 44–58 (2025). https://doi.org/10.3103/S1066369X25700240

(8). Bahodir Tursunov, Botir Usmonov, Baxtiyor Nuriddinov, Hakim Alimov, Utkirbek Qurbonov. Study on the oscillations of the Euler-Bernoulli beam on an elastic base. AIP Conf. Proc. 24 February 2025; 3268 (1): 020025. https://doi.org/10.1063/5.0260554

(9). Safarov I.I., Teshaev M.K., Nuriddinov B.Z., Ablokulov S.Z. Forced vibrations of hereditary deformable shell elements of aircraft structures in gas flow under influence of atmospheric turbulence.//In E3S Web of Conferences, 2023 (Vol. 401, p. 03017). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103017

(10). Usmonov B.Sh. A numerical solution of hereditary equations with a weakly singular kernel for vibration analysis of viscoelastic systems. In Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences, 2015, (Vol. 69, No. 6, pp. 326–330). DOI: 10.1515/prolas-2015-0048

(11). Usmonov B.Sh., Mahmood S.A., Salah B., Jlassi K., Khudayberdieva A., Shibl M.F., Eid K. Oxygen-enriched silicon carbide nanocrystals for efficient overall water splitting: Unveiling effect of doping and electrolyte pH // Catalysis Today, 2025, 115471. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2025.115471

(12). Usmonov B.Sh., Mahmood S.A., Salah B., Jlassi K., Khudayberdieva A., Shibl M.F., Eid K. Data on enhancing the water electrolysis performance of silicon carbide nanoparticles in various electrolytes through oxygen doping// Data in Brief, 2025, 112023. https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.112023

Марасулов Абдрахим Мустафаевич (д.т.н, профессор, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Республика Казахстан, г. Туркестан; e-mail: abdrahim.marasulov@ayu.edu.kz),

Баялы Азимхан Тохтасынович (Старший преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Республика Казахстан, г. Туркестан; e-mail: azimkhan.bayaly@ayu.edu.kz),

Намозов Жасур Шокулович (к.т.н, старший преподаватель, Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий, Республика Узбекистан, г. Термез; e-mail: jasurnamozov786@gmail.com)

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕДАХ

Аннотация. *При исследовании процессов распространения и затухания волн в упругих слоисто-однородных средах с плоскопараллельными границами раздела первоочередной задачей является определение дисперсионных характеристик указанных волн.*

Ключевые слова: *среда, напряжения, деформации, деформирования вязкоупругих тел, уравнения.*

VISKOELASTIK VOSITALARDA TO‘LQINLARNING TARQALISHI

Annotatsiya. *Yassi parallel interfeys chegaralari bo‘lgan elastik qatlamli bir xil muhitda tarqalish jarayonlarini, so‘nayotgan to‘lqinlarni o‘rganishda, birinchi navbatda, ushbu to‘lqinlarning dispersiya xususiyatlarini aniqlash kerak.*

Kalit so‘zlar: *muhit, stresslar, deformatsiyalar, viskoelastik jismlarning deformatsiyalari, tenglamalar.*

WAVE PROPAGATION IN VISCOELASTIC MEDIA

Annotation. *When investigating the processes of wave propagation and attenuation in elastic layered homogeneous media with plane-parallel interfaces, the determination of the dispersion characteristics of the waves under consideration constitutes a primary objective.*

Keywords: *medium, stresses, deformations, deformations of viscoelastic bodies, equations.*

Введение. Настоящая работа посвящена исследованию процессов распространения волн в слоисто-неоднородных упругих диссипативных средах. Рассматриваются как плоские, так и цилиндрические геометрические модели таких тел. Подобные материалы и конструкции широко применяются в строительстве и машиностроении, в частности в корпусах машин, зданиях, трубопроводах и других инженерных сооружениях, подверженных колебательным и динамическим нагрузкам.

Целью исследования является изучение исследованию распространение волн в вязкоупругих средах.

Методы исследования. Для решения этих уравнений использовались интегральные подстановки Фурье, метод замораживания, разделение переменных, методы специальных функций математической физики Мюллера, Гаусса, Лапласа.

Анализ и результаты. При исследовании процессов распространения волн в упругих средах в качестве фундаментальной модели используется закон Гука, согласно которому напряжения в материале в каждый момент времени линейно пропорциональны соответствующим деформациям. Иными словами, отклик материала на внешнее воздействие носит линейный и предсказуемый характер. Учет данного соотношения является необходимым при анализе волновых процессов, поскольку именно упругие свойства среды определяют особенности распространения волн в таких материалах.

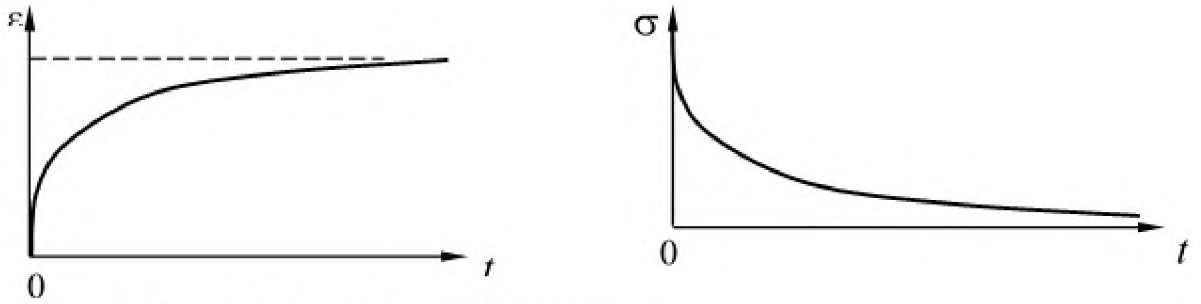


Рис. 1. Кривая ползучести. Рис. 2. Кривая релаксации.

В механике деформируемого твёрдого тела используются различные реологические модели для описания поведения вязкоупругих материалов, сочетающих в себе упругие и вязкие свойства (рис.1 и 2) [1,2]. В целях более точного моделирования реальных механических процессов применяются комбинированные реологические модели, составленные из элементарных. Схематическое представление таких моделей приведено на рисунках 3 и 4. Для тела Кельвина – Фойгта зависимость напряжения – деформации дается уравнениям; учитывая, что $\varepsilon = \partial u / \partial x$, 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 $C_0^2 = E_1 / \rho$, 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

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

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:

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

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

При воздействии на конструкцию динамических нагрузок, характеризующихся изменением во времени (колебания, ударные воздействия и т.п.), в материале возникают циклически повторяющиеся напряжения, сопровождающиеся потерями части механической энергии. Для большинства традиционных строительных и инженерных материалов (таких как сталь и бетон) при расчётах, как правило, достаточно учитывать эффект затухания колебаний. Учет расширенного набора вязкоупругих характеристик позволяет более точно прогнозировать динамическое поведение конструкций в реальных эксплуатационных условиях.

В рамках настоящего исследования вязкоупругие свойства материала описываются с использованием комплексного модуля сдвига.

В работе получено решение задачи продольных колебаний цилиндрического стержня с вязкоупругим покрытием. При этом покрытие предполагалось достаточно тонким, что позволило пренебречь касательными усилиями на поверхности контакта.

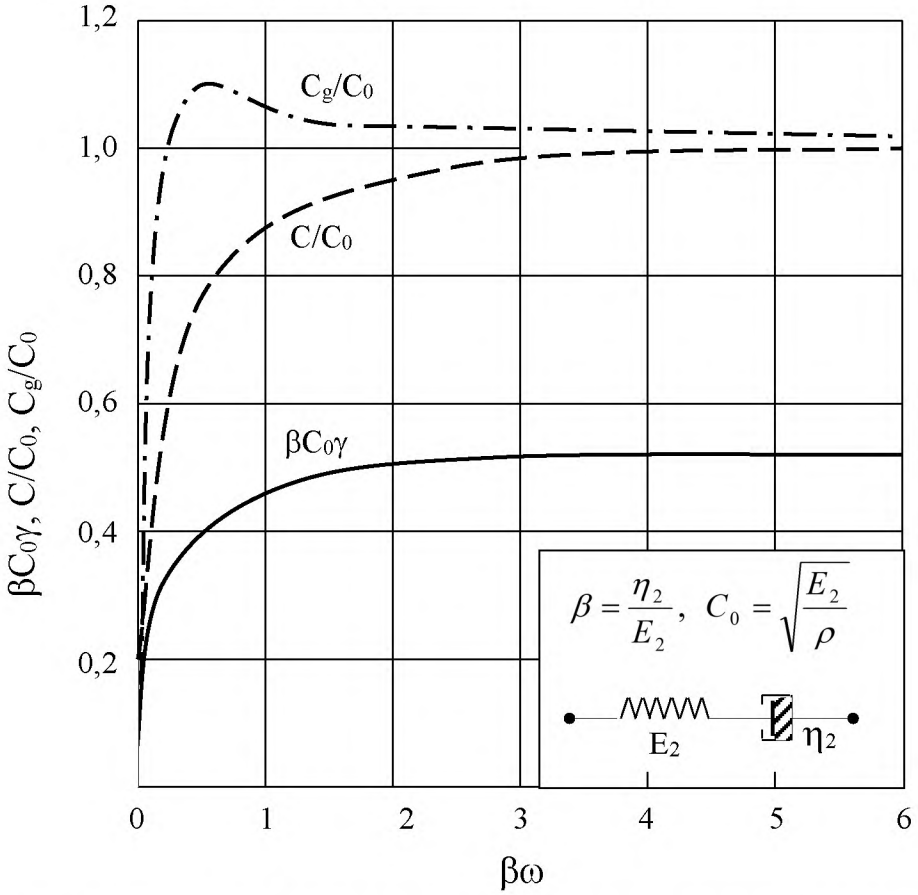


Рис. 3. Тело Кельвина–Фогта. Зависимость фазовой скорости *c*, групповой скорости c_g и коэффициента затухания γ от частоты $\omega/2\pi$ для синусоидальных волн.

Распространение волн в пластинке слоя и цилиндре было предметом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, ведущихся уже более столетия. Возможность выразить характеристики волнового поля в цилиндре (рис. 4) через хорошо исследованные специальные функции впервые отмечались в работах Похгаммера и Кри, которые имеют вид

$$4\mu k^2 h' k' J_1(h'a)\left[J_0(k'a) - \frac{J_1(k'a)}{k'a}\right] = \left(2k^2 - \frac{\omega^2\rho}{\mu}\right) J_1(k'a) \times$$

$$\times \left\{2\mu h'^2 \left[J_0(h'a) - \frac{J_1(h'a)}{h'a}\right] - \frac{\omega^2 \rho \lambda}{\lambda + 2\mu} J_0(h'a)\right\},$$

где $h'^2 = k_L^2 - k^2$, $k_L^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2}$, $k'^2 = k_S^2 - k^2$, $k_S^2 = \frac{\omega}{c_S^2}$.

Полученное соотношение устанавливает зависимость фазовой скорости волн от частоты и следующих параметров: радиуса цилиндра a, длины волны λ, коэффициента Пуассона ν и плотности материала ρ. Представление данного уравнения в безразмерной форме позволяет сократить число независимых переменных до набора параметров: c=ω/k–фазовая скорость, c_0 — скорость бесконечно длинных волн расширения в цилиндре.

Каждая система уравнений сводится к единственному частотному уравнению, содержащему функции Бесселя, корни которого определяют функциональную зависимость между безразмерными параметрами. При фиксированном значении коэффициента Пуассона ν частотные уравнения могут быть решены численными методами, в результате чего строятся дисперсионные кривые, отражающие зависимость c_0 от параметра λ для каждого типа волн. В случаях волн расширения и кручения частотные уравнения обладают кратными корнями, вследствие чего соответствующие дисперсионные кривые состоят из набора ветвей, каждая из которых соответствует основной или более высокой форме колебаний

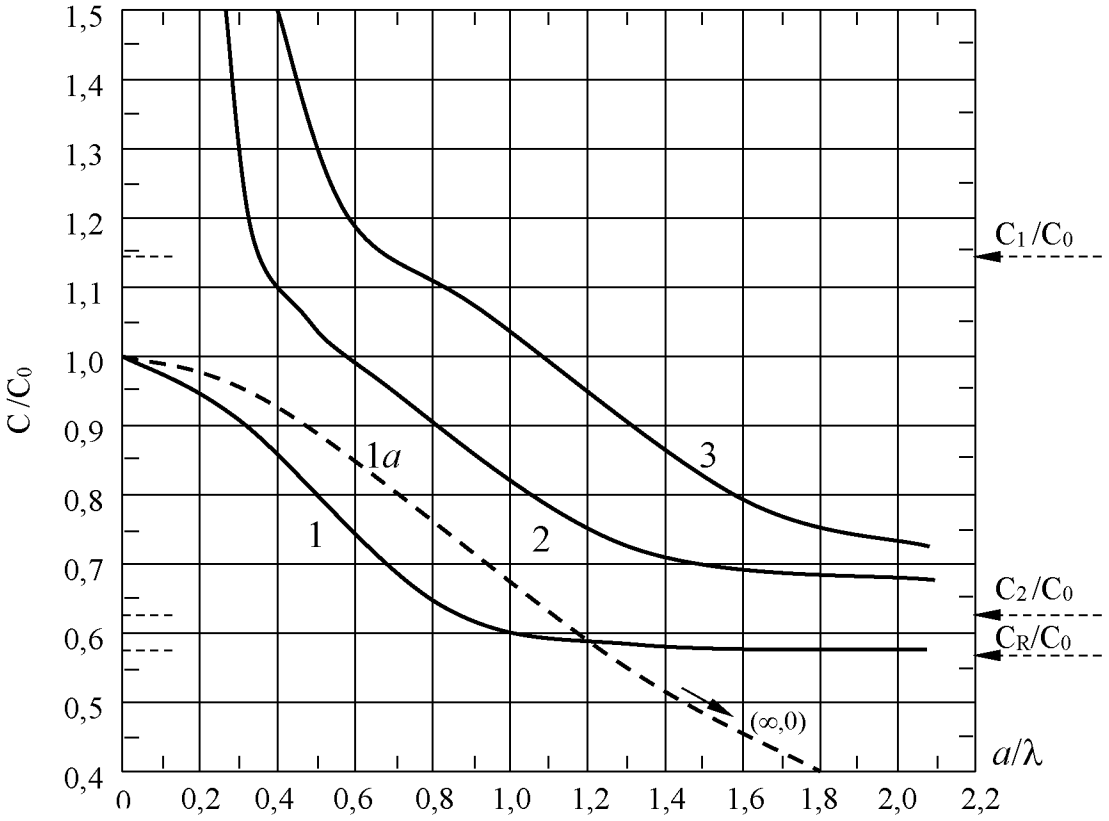


Рис. 4. Фазовая скорость для волн расширения с длиной волны λ в цилиндрическом стержне радиуса *a*.

Для упругого слоя в двумерной постановке аналогичные результаты были получены Рэлеем [3,4,5]. Если в качестве узловых поверхностей рассматривать поверхности, на которых продольные смещения и деформации обращаются в нуль, то в рассматриваемом случае такими поверхностями являются цилиндрические поверхности.

Заключение. Таким образом, рассматривая волновые процессы в волноводе, можно выделить задачи двух типов. 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.

Список использованной литературы:

(1). Сафаров И.И. Колебания и волны в диссипативно недородных средах и конструкциях. Ташкент, "Фал", 1992, 250 с.

(2). Сафаров И.И. Распространения волн в слое, лежащем в вязкоупругом полупространстве. Тезисы докладов конфер. «Опыт применения композитных материалов в сельскохозяйственном машиностроении», Чернигов, 1985, с. 91–92.

(3). Сафаров И.И. Динамика неоднородных вязкоупругих систем к конечным числом степеням свободы Тезисы докл. II научно-технической конференции «Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов», Калининград, 1981, с. 97 – 98.

(4). Сафаров И.И. Динамика вязкоупругих виброзащитных систем. Автореферат дисс… канд. физ-мат. наук, Москва, 1982, 24 с.

(5). Georgievsky D.V., Shamolin M.V. (2023). Sessions of the workshop of the mathematics and mechanics department of the Lomonosov Moscow state university". Urgent problems of geometry and mechanics" named after V.V.Trofimov. Итоги науки и техники. Современная математика и её приложения. Тематический обзор, 229, p. 3–11.

Kushiev Giyosiddin Abdivahob ogli (Assistant professor (PhD) of the Department of "Digital electroncs and microelectronics", Tashkent state technical university; gkushiyev@inbox.ru),
Rakhmanov Ulugbek Musirmon ogli (Teacher of the Department of Exact Sciences, Tashkent Branch of the University of Business and Science; ulugbekraxmanov08@gmail.com),
Kholmanov Rustam Oktam ogli (Teacher at Karshi State Technical University; xolmanovrustam51@gmail.com)

DEVELOPMENT OF AN IoT–AI INTEGRATED DEVICE PLATFORM FOR AIR MONITORING AND AUTOMATIC FILTRATION IN INDUSTRIAL AREAS

Annotation. *This paper presents the development of an Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) integrated device platform designed for real-time air quality monitoring and automatic filtration in industrial environments. The proposed system is based on the ESP32 microcontroller and incorporates environmental sensors for measuring gas concentration, temperature, and humidity. A rule-based intelligent algorithm is implemented to analyze sensor data and control filtration mechanisms automatically. The system enables continuous monitoring, early detection of hazardous conditions, and autonomous activation of air filtration processes. Experimental results demonstrate that the integration of IoT and AI technologies significantly improves environmental safety, reduces response time, and enhances system reliability in industrial zones.*

Keywords*: IoT, artificial intelligence, air quality monitoring, industrial environment, ESP32, gas sensor, smart filtration.*

SANOAT HUDUDLARIDA HAVO MONITORINGI VA AVTOMATIK FILTRLASH UCHUN IOT–AI INTEGRATSIYALASHGAN QURILMA PLATFORMASINI RIVOJLANTIRISH

Annotatsiya. *Ushbu maqolada sanoat muhitida real vaqt rejimida havo sifatini monitoring qilish va avtomatik filtrlashni ta'minlashga mo'ljallangan internet of Things (IoT) va sun'iy intellekt (AI) integratsiyalashgan qurilma platformasini ishlab chiqish yoritilgan. Taklif etilgan tizim ESP32 mikrokontrolleriga asoslangan bo'lib, gaz konsentratsiyasi, harorat va namlikni o'lchash uchun atrof-muhit sensorlarini o'z ichiga oladi. Sensor ma'lumotlarini tahlil qilish va filtrlash mexanizmlarini avtomatik boshqarish uchun qoidalarga asoslangan intellektual algoritm joriy etilgan. Tizim uzluksiz monitoringni, xavfli holatlarni erta aniqlashni hamda havo filtrlash jarayonlarini avtomatik ishga tushirishni ta'minlaydi. Tajriba natijalari IoT va AI texnologiyalarining integratsiyasi sanoat hududlarida ekologik xavfsizlikni sezilarli darajada oshirishini, javob berish vaqtini qisqartirishini va tizim ishonchliligini yaxshilashini ko'rsatadi.*

Kalit so'zlar: *IoT, sun'iy intellekt, havo sifati monitoringi, sanoat muhiti, ESP32, gaz sensori, aqlli filtrlash.*

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ УСТРОЙСТВ IOT–AI ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОЗДУХА И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗОНАХ

Аннотация. *В данной статье представлена разработка интегрированной платформы устройств на основе Интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта (AI), предназначенной для*