

УДК 620.179.16

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В АНИЗОТРОПНЫХ ОБРАЗЦАХ ПОВЕРХНОСТНЫМ ИСТОЧНИКОМ

Глушков Е.В., Глушкова Н.В.

Институт математики, механики и информатики,

Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия, evg@math.kubsu.ru

*Ключевые слова: произвольная анизотропия, матрица Грина, бегущие и объемные волны, контурные интегралы, асимптотика.*

Задачи моделирования волновых процессов в упругих анизотропных материалах возникают в ультразвуковом неразрушающем контроле, геофизике, акустоэлектронике, акустической оптике и многих других практических приложениях. В аэрокосмической промышленности разрабатываются системы ультразвукового неразрушающего контроля, позволяющие снизить риск отказа компонентов в процессе эксплуатации за счет раннего обнаружения и определения характеристик скрытых дефектов. Нередко сильная анизотропия материалов, таких как композитные углепластики, которые все чаще используются в современных авиалайнерах, или специальные монокристаллические никелевые сплавы для лопаток турбин, создают серьезные проблемы для интерпретации данных неразрушающего контроля, полученных с помощью поверхностных ультразвуковых преобразователей и датчиков.

В настоящее время для расчета волнового поля, генерируемого в таких средах заданным источником, обычно используются программные пакеты, реализующие прямые сеточные численные методы, например метод конечных элементов (МКЭ). Однако МКЭ моделирование волновых процессов, как правило, требует слишком больших вычислительных затрат и дополнительной постобработки для выделения отдельных волновых мод (например, квазипродольных или квазипоперечных объемных волн) из суммарного численного решения. Разработанные ранее быстрые численно устойчивые алгоритмы построения матрицы Грина для произвольно-анизотропного многослойного упругого полупространства или пакета слоев позволяют использовать интегральные представления решения соответствующих волновых задач через матрицу Грина рассматриваемой структуры и параметры источника. Они обеспечивают такое же количественное решение, как и при МКЭ моделировании, но с меньшими затратами. Амплитудно-частотные характеристики ближнего поля получаются путем численного интегрирования контурных интегралов обратного преобразования Фурье, а их асимптотика в дальнем поле дает явные физически наглядные представления для генерируемых источником волн различных типов.

Асимптотика квазицилиндрических бегущих волн, распространяющихся вдоль поверхности и внутренних слоев, а также квазисферических объемных волн в нижнем полупространстве выводится из данных контурных интегралов, используя технику теории вычетов и метод стационарной фазы. В отличие от изотропного случая, зависимость полюсов и стационарных точек от рассматриваемого направления распространения существенно усложняет волновую картину вплоть до появления складок и множественных стационарных точек, дающих дополнительные волновые фронты и каустики. В отличие от классических модальных разложений, определяемые с точностью до постоянных множителей, полученные

асимптотики дают однозначные амплитудно-частотные характеристики каждой из возбуждаемых волн, а также величину и направление вектора групповой скорости, отклоняющегося в анизотропной среде от волнового вектора.

В докладе планируется кратко обсудить общую схему вывода, компьютерную реализацию и верификацию асимптотических представлений, проиллюстрировав их численными примерами для образцов с различными типами анизотропии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-11-00140.

Сведения об авторах

Глушков Е.В., доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник. Область научных интересов: волновые процессы, интегральные уравнения, полуаналитический подход, компьютерное моделирование, анизотропные композиты, резонансные эффекты, поток энергии.

Глушкова Н.В., доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник. Область научных интересов: волновые процессы, интегральные уравнения, полуаналитический подход, компьютерное моделирование, резонансные эффекты, волновая энергия.

## **SIMULATION OF ELASTIC WAVES GENERATED IN ANISOTROPIC STRUCTURES BY A SURFACE SOURCE**

Glushkov E.V., Glushkova N.V.

Institute for Mathematics, Mechanics and Informatics, Kuban State University, Krasnodar, Russia,  
[evg@math.kubsu.ru](mailto:evg@math.kubsu.ru)

*Keywords: arbitrary anisotropy, Green's matrix, guided and body waves, path integrals, asymptotics.*

An asymptotic representation for quasi-spherical body waves excited in an arbitrarily anisotropic elastic half-space by a time-harmonic surface source is derived. Unlike classical plane waves in an unbounded anisotropic medium, it provides at ones the group velocity and amplitude of each excited body wave. Its derivation, computer implementation and verification, as well as numerical examples for transversely isotropic composite material and nickel alloy with cubic anisotropy are to be discussed in the talk.