

согласно ранее доложенной теории. Данные эксперименты подтверждает такую зависимость и позволяет находить подходящий „коэффициент ЛПШ”  $z_h$ . Наружное распределение трения следует линейному закону, как в лотковом и напорном течениях при „обычной” шероховатости. При этом имеет место резкий излом между наружным и внутренним профилями трения.

**Выводы:** подтверждено “универсальное” поведение профилей (1), свидетельствующее, что турбулентные вихри внутри и над ЛПШ подчиняются принципиально разным масштабам.

### ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ДЕФОРМИРОВАННОЙ ИЗОТРОПНОЙ НЕЛИНЕЙНО УПРУГОЙ СРЕДЕ

*\*Галич П.И., Рыжак Е.И.*

Московский физико-технический институт, г.  
Долгопрудный, Россия

Исследуется анизотропия распространения волн в деформированной изотропной нелинейно упругой среде на основе теории Адамара на примере модифицированного материала Муни–Ривлина [1]. Работа носит теоретический характер, но представляет и значительный теоретический интерес, например, измерения, относящиеся к анизотропии распространения поперечных волн в земной коре, используются в качестве одного из геофизических методов поиска и разведки нефтегазоносных пластов [2].

Если формально следовать законам линейной упругости, то мы придём к абсолютно неверному выводу о том, что наличие предварительных деформаций (и соответствующих им напряжений) никак не влияет на распространение волн в изначально изотропной упругой среде. Поэтому доказывается, что безоговорочное применение классической линейной теории упругости в вопросах исследования распространения волн в предварительно деформированных упругих средах неприемлемо и зачастую приводит к качественно неверным результатам.

Математическая задача заключается в нахождении акустического тензора для конкретного упругого материала; отыскании его собственных чисел и соответствующих им собственных векторов (скоростей распространения и поляризаций волн).

С помощью бескоординатного тензорного исчисления [3] и теории распространения волн Адамара для модифицированного материала Муни–Ривлина доказано, что: 1) в общем случае поляризации волн будут и не продольными, и не поперечными, даже для сколь угодно малых начальных деформаций; 2) в случае, когда волновая нормаль лежит в одной из плоскостей ортотропии, имеется одна поперечная поляризация (ортогональная этой плоскости), а две другие поляризации лежат в этой плоскости и не являются ни продольными, ни поперечными; 3) лишь для

«главных волн» будет одна продольная и две поперечных поляризации с разными скоростями распространения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошной среды. М.; Мир, 1975. –602с.
2. Lynn H. B. A geophysicist's view on seismic anisotropy// Seismic anisotropy. Proc. Sixth Int. workshop on seismic anisotropy. Oklahoma: Soc. of Exploration Geophysicists, 1994. – 1–11p.
3. Рыжак Е.И. Бескоординатное тензорное исчисление для механики сплошных сред. М.: МФТИ, 2011. – 170с.

### АТОМНАЯ ДИНАМИКА ГЕТЕРОГЕННЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР С КВАЗИНИЗКОРАЗМЕРНЫМИ НАНОВКЛЮЧЕНИЯМИ

<sup>1</sup>Господарев И.А., <sup>1</sup>Гришаев В.И., <sup>1</sup>Манжелий Е.В.,  
<sup>2</sup>Минакова К.А., <sup>1</sup>Сыркин Е.С., <sup>1</sup>Феодосьев С.Б.

<sup>1</sup>Физико-технический институт низких температур  
им. Б.И.Веркина НАН Украины, Харьков  
<sup>2</sup>Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт», Украина

В последние годы популярным объектом исследований стали структуры, содержащие одно- или квазиодномерные нановключения в разного рода кристаллические или аморфные матрицы. При этом в квазичастичных спектрах таких структур могут проявляться характерные особенности. Естественно, что проявление таких особенностей зависит от соотношения взаимодействий между атомами внедренной квазиодномерной системы между собой и с окружающими атомами. Отметим, что квазиодномерное поведение фононного спектра может существенно снизить динамическую устойчивость системы привести к высоким значениям среднеквадратичных амплитуд атомных смещений. Поэтому выяснение, хотя бы на простых моделях, возможности наблюдения одномерных особенностей в системах, обладающих достаточно высоким запасом устойчивости, представляется важной и интересной задачей.

В предлагаемой работе рассмотрена атомная динамика линейных цепочек, внедренных в кристаллическую матрицу или адсорбированных на ее поверхность. Особо проанализирован случай, когда линейная цепочка образована примесями замещения в поверхностном слое и, при этом, выходит за плоскость этого слоя. Данная ситуация моделирует активно изучаемые экспериментально системы, когда молекулы газа (одноатомные или двухатомные) адсорбированы на стенках жгутов углеродных нанотрубок, находящихся, в свою очередь, в некоторой среде [1].

Показано, что для цепочек, внедренных в объем кристалла или адсорбированных на его поверхности

одномерные особенности характерны, если межатомное взаимодействие в цепочке превышает взаимодействие атомов цепочки с атомами кристалла-матрицы в  $2\div 3$  раза. На локальных плотностях состояний атома цепочки переход к одномерному поведению носит характер излома. То есть, подобен первой ван хововской особенности, которая в аналогичной *периодической* структуре, соответствовала бы переходу от замкнутых изочастотных поверхностей к открытым (квазиплоским). В случае адсорбированной на поверхности цепочки (более интересном с прикладной точки зрения) только высокие значения ее изгибной жесткости могут обеспечить динамическую устойчивость. Иначе среднеквадратичные амплитуды ее поперечных (изгибных) колебаний чрезвычайно быстро растут с температурой.

Для случая цепочки, образованной примесями замещения в поверхностном слое, определены геометрические параметры и соотношения межатомных взаимодействий, соответствующие проявлению в фоновом спектре системы одномерных особенностей при сохранении ее динамической устойчивости.

Проанализировано поведение низкотемпературной теплоемкости и среднеквадратичных амплитуд атомных смещений для линейных цепочек, внедренных в объем или адсорбированных на поверхность кристалла. Показано качественное отклонение поведения теплоемкости таких цепочек от предложенной в [2] модели «безактивационного» поведения фонового спектра таких структур.

Кроме того, в работе проанализировано поведение фоновых спектров графеновых моно- и бислоев, адсорбированных на различные подложки, а также свободных би- и триграфена. Особое внимание уделено динамической устойчивости таких систем, в частности, проанализированы квантовые поправки в классическую теорию [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bagatskii M.I., Sumarokov V.V., Dolbin A.V., LowTemp. Phys. 2011. – v.37. – P.424.
2. Šiber A., Phys. Rev. – 2002. – В 66. – 235414.
3. Ландау Л.Д., ЖЭТФ – 1937. – v.7. – P. 627.

### **ВИМУШЕНІ НЕЛІНІЙНІ КОЛИВАННЯ ПАКЕТУ ТУРБІННИХ ЛОПАТОК ІЗ ДИНАМІЧНИМ КОНТАКТОМ У РОЗ'ЄМНОМУ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОМУ БАНДАЖУ**

*\*Грицан С.О., Ларін О.О.*

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

Підвищені рівні вібрацій – найпоширеніша причина відмов і поломок, що відбуваються при експлуатації парових турбін. Найбільш динамічно навантаженим елементом при цьому є лопатковий апарат циліндра низького тиску. Внаслідок конструкційних особливостей (велика довжина, складний профіль змінного перерізу та значний кут

попередньої закрутки) лопаткам властива велика згинально–крутильна податливість, що може призвести до небажаних рівнів вібрацій.

У турбобудуванні з метою збільшення жорсткості лопаткового апарату останніх ступенів застосовуються міжлопаткові зв'язки, які являють собою роз'ємні з'єднання. Міцнісні та вібраційні характеристики таких апаратів суттєво залежать від особливостей контактної взаємодії в з'єднаннях, а при дії нестационарних навантажень у системі відбуваються нелінійні коливання. В попередніх дослідженнях [1] вимушених коливань пакетів лопаток не враховувалася наявність статичного навантаження, в результаті були зроблені висновки щодо можливості зриву контакту. Разом із цим дія статичного поля відцентрових сил призводить до досить щільного замикання в бандажних роз'ємних з'єднаннях, істотно впливаючи на динамічну поведінку системи. Таким чином, прийняття до розгляду статичного попереднього напруженого стану при розрахунках вимушених нелінійних коливань лопаткового апарату становить особливий практичний інтерес, тому що може привести до уточнених результатів і висновків.

Для чисельної симуляції використовувалася тривимірна скінченно-елементна (СЕ) модель пакета із двох робочих лопаток четвертої ступені циліндра низького тиску парової турбіни. Лопатки зв'язані одноярусним цілісно фрезованим роз'ємним бандажем, де контакт відбувається в умовах попереднього технологічного натягу. Впливом диска та хвостовика при моделюванні знехтуване. Вважається, що лопатки в кореневій частині мають жорстке закріплення. Контактна взаємодія в бандажній полиці розглянута з урахуванням сухого тертя (згідно до закону Кулона) та моделювалася скінченними елементами типу «поверхня–поверхня». У дослідженні основну увагу зосереджено на вивченні контактування лопаток у бандажі, так як надійне щільне замикання цих з'єднань є однією з найважливіших умов безпечної та стабільної роботи останніх ступенів лопаткового апарату циліндру низького тиску.

Проведено дослідження нерезонансних нелінійних коливань пакету з двох лопаток при дії гармонічного навантаження від пульсації аеродинамічного потоку, з урахуванням статичного навантаження (постійна частина тиску пари та відцентрова сила внаслідок обертання ротора турбіни).

В рамках чисельної симуляції розроблено наступний алгоритм рішення задачі:

– перший крок розрахунку: квазістатичне виведення системи на стан рівноваги при номінальних значеннях навантажень;

– другий крок розрахунку (аналіз перехідних процесів): увімкнення врахування інерційних ефектів, що призводить до початкової задачі та необхідності задання відповідних початкових умов. Поле початкових переміщень є розв'язком першого кроку розрахунку. Початкові швидкості отримуються автоматично з обчислювального алгоритму, що використовує різницеву схему Ньюмарка. На цьому етапі відбувається прикладання динамічного