

Надійшло до Академії наук України
Сиретарь / Сатур О.Р. /
26.10.02 16.01.2019р.



ВІДГУК

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора,
Кононова Юрія Микитовича на дисертаційну роботу
Райновського Ігоря Андрійовича «Асимптотична модальна теорія Наріманова-
Моїсеєва усталених демпфованих коливань рідини в циліндричному баці»,
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за
спеціальністю 01.02.01 – теоретична механіка.

Актуальність. Задача про резонансні коливання рідини у вертикальних циліндричних баках кругового перерізу була і залишається актуальною у зв'язку із ракето-космічним (баки з паливом), морським (танкери) та цивільним (контейнери, які зберігають великі маси рідини, зокрема, водонапірні баки) застосуваннями. Дослідження цих коливань за допомогою методів аналітичної механіки було започатковано у 60-70х роках минулого століття в роботах М.М.Моїсеєва, Г.С. Наріманова, І.О. Луковського, Л.В. Докучаєва та інших. Ці методи використовують наближені математичні моделі цієї гідродинамічної системи у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь відносно узагальнених координат, які описують відхилення вільної поверхні від статичного положення рівноваги. Автора цієї дисертаційної роботи цікавить новий клас застосувань, пов'язаних із біотехнологіями (біореактори), що вимагає врахування ряду специфічних властивостей, серед яких є в'язке демпфування, а також те, що контейнери біо- та фармтехнологій рухаються циклічно на довгому проміжку часу за складною та тривимірною траєкторією. Фактично в дисертації ставиться задача описати всі стійкі та нестійкі усталені періодичні демпфовані резонансні хвилі у циліндричних контейнерах для таких складних збурень. Така задача є *ною* та *актуальною*, як з теоретичної (узагальнення методів аналітичної механіки для фізично нової проблеми), так і практичної точок зору.

Дисертація складається із анотації, вступу, основної частини, що містить п'ять розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації – 161 сторінки. В першому розділі дисертаційної роботи наведений дуже детальний огляд сучасної літератури. Він описує як історію розвитку так званого модального методу, який дозволяє перейти від крайової задачі з вільною поверхнею теорії поверхневих хвиль до системи звичайних диференціальних рівнянь відносно гідродинамічних узагальнених координат, так і окреслює відповідні відкриті (не розв'язані) проблеми в цій галузі аналітичної (та нелінійної) механіки.

Другий розділ присвячено специфічним (для цієї постановки) математичним деталям нелінійного модального методу, коли він базується на варіаційному принципі Бейтмена-Люка. Цей підхід приводить до нескінченновимірної системи нелінійних звичайних диференціальних (модальних) рівнянь у формі Майлза-Луковського. Система зв'язує гідродинамічні узагальнені координати та швидкості.

В третьому розділі дисертаційної роботи виведено асимптотичні формули (в термінах числа Галілея) для оцінки коефіцієнтів демпфування власних

(стоячих) хвиль на поверхні циліндричного баку кругового перерізу, що відображають ефект в'язкого ламінарного поверхневого шару на змочених стінках, а також внутрішнє в'язке тертя. Показано, що демпфування цього типу є важливим для радіусів резервуара $0.05m \leq R_0 \leq 0.3m$, які є типовими для контейнерів біореакторів. Додаткові члени, які описують лінійне демпфування в механічній системі, введені до виведеної в цьому розділі нелінійної модальної системи рівнянь типу Наріманова-Моїсєєва. Також у цьому розділі побудовані (в аналітичному вигляді) періодичні розв'язки модальної системи Наріманова-Моїсєєва. Побудова цих розв'язків зведена до визначення двох інтегральних амплітудних параметрів A, B та зсувів фаз ψ, φ . Проаналізована стійкість цих розв'язків та описані всі можливі стійкі та нестійкі усталені коливання рідини при резонансному збуренні першої власної частоти (в рамках теорії Наріманова-Моїсєєва з демпфуванням). Результати розділу сформульовані у вигляді Теорема 3.1. Важливим наслідком цієї теореми є те, що визначення усталених резонансних хвиль в рамках теорії Наріманова-Моїсєєва при довільних періодичних рухах баку із чотирма ступенями вільності (крім вертикального та обертального навколо вісі баку) можна звести до асимптотично еквівалентних горизонтальних орбітальних рухів баку. Це значно спрощує подальший аналіз.

В четвертому розділі дисертаційної роботи доводиться Теорема 4.1, яка дозволяє аналітично визначити A, B та ψ, φ (а, отже, описати аналітично усталені хвилі) як функції частоти збурення для випадку поздовжніх збурень. Теоретичні результати порівнюються із експериментами французьких дослідників. Окрему увагу приділено дослідженню впливу дисипації на зсув фаз. Показано обмеженість лінійної моделі демпфування для кругових резонансних хвиль (коефіцієнт демпфування повинен рости із амплітудою цієї хвилі), який пов'язується із досить специфічними поверхневими явищами із розривами суцільності вільної поверхні, що не входить у вихідну математичну модель.

В п'ятому розділі розв'язується протиріччя між відомими експериментальними даними стосовно резонансних коливань рідини в біореакторах (при кругових орбітальних збуреннях існують лише кругові хвилі за напрямком руху баку) й теоретичними результатами в рамках теорії недемпфованих коливань рідини (завжди існують стійкі кругові хвилі як за-, так і проти напрямку збурення баку). Доведено, що для орбітальних (еліптичних) збурень баку існують лише кругові хвилі (Твердження 5.1). Чисельно-аналітичні дослідження також доводять зникнення протилежно направлених до руху баку кругових хвиль, коли орбітальні збурення баку наближаються до кругових. Дано порівняння теоретичних значень амплітуди хвилі із відомими експериментальними результатами швейцарських дослідників (для кругового орбітального збурення баку). На відповідному рисунку показано гарне узгодження теорії із експериментами в діапазоні частот, де експериментальні спостереження не фіксували розриву суцільності вільної поверхні.

Оскільки метою дисертаційної роботи є аналітичні дослідження, використовуючи методи аналітичної та нелінійної механіки, усталених демпфованих хвильових резонансних рухів рідини у вертикальних кругових баках (біореакторах) та їхньої стійкості за умови просторових періодичних збурень баку, я вважаю, що автор успішно впорався із поставленими *задачами*, отримавши ряд *нових* важливих *результатів*, серед яких потрібно відмітити аналітичну оцінку коефіцієнтів демпфування (логарифмічних декрементів) стоячих хвиль, обумовлених ламінарним в'язким шаром на змоченій поверхні баку та внутрішнім тертям (узагальнення формул Хендерсон-Майлза), побудову нелінійних модальних рівнянь типу Наріманова-Моїсеєва, які описують резонансні демпфовані хвилі, побудову аналітичних періодичних розв'язків модальних рівнянь типу Наріманова-Моїсеєва, аналіз стійкості цих розв'язків і, як результат, опис усіх можливих усталених резонансних хвиль (стоячих та кругових), визначення діапазонів існування та стійкості кругових хвиль за- та проти напрямку орбітальних еліптичних рухів баку залежно від відношення осей "еліпсу орбіти", а також порівняння результатів із відомими експериментами. *Достовірність* отриманих результатів пов'язується із використанням математично обґрунтованих методів аналітичної та нелінійної механіки, а також порівняннями із експериментальними даними.

Дисертаційна робота І.А. Райновського містить нові, в основному, *теоретичні результати*, які присвячені актуальним питанням сучасної теоретичної механіки. Вони можуть знайти своє застосування в інженерних дослідженнях, пов'язаних із новими біотехнологіями, зокрема, вирощуванням протеїну. Дані результати є корисними для науковців з Інститутів механіки та гідромеханіки НАН України, інших наукових установ.

Результати дисертаційної роботи опубліковані у 7 статтях в наукових періодичних фахових виданнях, з яких 4 статті – у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus та Web of Science, причому 2 з цих статей опубліковано в престижних західних наукових журналах. Результати апробовано на чотирьох міжнародних конференціях.

Дисертаційна робота добре оформлена й гарно написана, має 18 ілюстративних рисунків. *Автореферат* правильно і повно висвітлює основні положення дисертації.

Проте, на мій погляд, дисертація має декілька незначних недоліків.

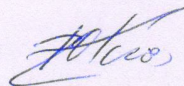
1. Постановка задачі із вільною поверхнею про коливання рідини в баках із розділу 2 є відомою, її наведено у багатьох монографіях. Думаю, можна було б скоротити постановочну частину цього розділу шляхом посилання на відповідні книги.
2. Не досить детально викладено процедуру виводу узагальнених формул Хендерсон-Майлза в розділі 3. Дійсно, викладки є досить громіздкими, але автор міг би надати їх у додатках.
3. Зважаючи на практичні застосування, що розглядаються, було б більш доцільним надати ілюстративні графіки рисунка 3.1 не для води, а для біосумішей, характерних для технологій вирощування протеїну.

4. Для малого параметра $\delta = O(\varepsilon^{2/3})$, дійсно, вплив демпування на розв'язки рівнянь (3.29) дає вклад порядку $o(\varepsilon)$, що знайшло своє відображення у формулах (3.44). Але цей факт мені здається не зовсім тривіальним, отже, автору слід було б привести відповідне доведення перед (3.44).
5. За умови (4.8), $C = \tan \alpha > 0$ (α - різниця зсувів фаз) в теоремі 4.1. Це є важливим фактом, який було б бажано включити в формулювання цієї теореми, а не давати у вигляді зауваження після її доведення.
6. Незважаючи на той факт, що простий алгоритм побудови біфуркаційних кривих в розділах 4 та 5, скоріш за все, не пристосований для цього, я б рекомендував автору провести додаткові дослідження відносно типів біфуркаційних точок в рисунках із цих розділів. Хоч це і може значно збільшити об'єм цих розділів та самої дисертації, яка і так є досить великою за об'ємом.
7. Робота містить також ряд несуттєвих синтаксичних та граматичних помилок, які опонент повідомив автору персонально.

Але всі ці недоліки не мають принципового характеру, а скоріш рекомендацій для подальшої роботи, тому вони жодною мірою не зменшують науковий рівень дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота «Асимптотична модальна теорія Наріманова-Моїсєєва усталених демпфованих коливань рідини в циліндричному баці», зважаючи на актуальність тематики, ступінь обґрунтованості та новизну результатів, є закінченою науково-дослідницькою роботою, яка виконана на високому науковому рівні та задовольняє усі вимоги до кандидатських дисертацій, які містяться в "Порядку присудження наукових ступенів" (Постанова Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013. Її автор, Райновський Ігор Андрійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 – «теоретична механіка».

Офіційний опонент, доктор
фізико-математичних наук, професор,
зав. відділом теорії керуючих систем
Інституту прикладної математики і
механіки НАН України (м. Слов'янськ)



Ю.М. Кононов



Підпис Кононова І. М. завідувач:
от. інспектор з кадрів І. М. Дубовик Р. І.
04.01.2019 р.