

## ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Тімохіна Олексія Павловича «Нелінійна динаміка трубопроводу з рідиною в околі критичних швидкостей течії рідини» на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 – теоретична механіка

Дисертаційна робота Тімохіна Олексія Павловича присвячена дослідженню нелінійних коливань трубопроводів з рідиною, що тече, при різних швидкостях течії. Трубопровід моделюється як пружна балка, рідина вважається ідеальною, а її рух – одномірним. Задача розглядається в нелінійній сумісній постановці.

**Актуальність дослідження** визначається тим, що трубопроводи з рідиною є складовими частинами багатьох інженерних, енергетичних і транспортних систем. Дослідження подібних класів задач проводилися в роботах В.І. Феодос'єва, М.Г. Бондаря, В.А. Светлицького, В.Д. Кубенко, П.С. Ковальчука, В.І. Гуляєва, О.О. Горошка, R.A. Ibrahim, G.L. Kuiper, M.R. Paidoussis та ін. Переважна більшість результатів була отримана в рамках лінійної теорії визначення частот і форм коливань і побудови динамічної моделі системи для випадку руху системи в докритичній області швидкостей течії. Дослідження задач нелінійної динаміки таких систем має вагомі складності, пов'язані з тим, що для опису руху компонентів системи використовуються різні змінні: ейлеровий підхід для моделювання поведінки рідини і, відповідно, лагранжевий – для пружної труби. Крім того, значний практичний інтерес в поведінці таких систем пов'язаний саме з діапазоном, коли швидкість течії наближається до критичної чи перевищує її. В околі цих швидкостей в системі спостерігаються біфуркаційні режими, які складно досліджуються чисельно. Тому створення ефективної розрахункової моделі динаміки трубопроводів з рідиною з урахуванням найбільш загальних механічних властивостей таких динамічних об'єктів визначає актуальність і практичну значимість роботи.

Нелінійна дискретна модель коливань рідини одержується за допомогою формулювання задачі у формі варіаційного принципу Гамільтона–Остроградського, з якого виводяться не лише рівняння сумісного руху системи, динамічні граничні умови, але який в поєднанні з методами модальної декомпозиції використовується як ефективний засіб для аналітичної побудови дискретної моделі (системи звичайних диференціальних рівнянь відносно амплітудних параметрів) нелінійної динаміки сумісного руху трубопроводу з рідиною. На основі розгляду групи тестових задач розглянуті питання точності числового розв'язання динамічної моделі системи.

В роботі отримані такі **нові наукові результати**:

- Розроблено нелінійну модель динаміки трубопроводу при швидкісній течії рідини, яка орієнтована на дослідження задач динаміки трубопроводу в околі втрати стійкості прямолінійної форми і здатна надійно відображати поведінку системи як для докритичних швидкісних режимів течії рідини, так і для закритичних режимів. Модель враховує більшість відомих нелінійних механізмів і їх взаємний вплив на систему.
- На основі методу модальної декомпозиції побудовано нелінійну скінченновимірну модель динаміки системи трубопровід – рідина для довільної кількості власних форм коливань (при чисельній реалізації приймалося до уваги дванадцять власних форм коливань), що дало змогу більш детально проаналізувати рух системи в закритичних режимах течії рідини. Аналітичними і (для перевірки) засобами символної математики, реалізованими у програмному пакеті Mathematica, систему диференціальних рівнянь аналітично було приведено до форми Коші.
- Для випадку консольно закріпленого трубопроводу з вільним кінцем розроблено і реалізовано модель динамічної системи та програмний пакет в програмному середовищі Mathematica із застосуванням

найбільш передових інструментів адаптивного неявного аналізу диференціальних рівнянь. **Достовірність побудованої моделі** підтверджується, зокрема, повною відповідністю результатів для випадку відсутності течії рідини та відповідністю частини результатів дослідженням інших авторів.

- Було проведено дослідження впливу на систему трубопровід – рідина присутності нелінійного демпфера у вигляді однобічної додаткової пружності, або однобічної в'язкості. Ідея такого демпфера полягала у тому, що за рахунок нелінійності у формі нерівності буде відбуватися інтенсивний перерозподіл енергії коливань між власними формами, тобто буде відбуватися перерозподіл енергії від нижчих форм, коливання яких мають найбільшу амплітуду і представляють найбільшу небезпеку, до вищих форм, де інтенсивніше проявляється дисипація. Але в процесі аналізу таких демпферів для трубопроводів було виявлено їх низьку ефективність через наявність більш потужного механізму енергообміну обумовленого дією сил Коріоліса.
- Була досліджена біfurкаційна динаміка системи трубопровід–рідина, визначені основні режими коливань в системі при докритичних та закритичних швидкостях течії рідини. Також виконано класифікацію основних режимів коливань трубопроводу з точки зору теорії стійкості за першим методом Ляпунова.
- Визначено існування діапазонів стійкості в закритичній області швидкостей течії рідини. Для підтвердження існування таких діапазонів було проведено безпосереднє чисельне моделювання поведінки системи в визначених областях швидкостей течії рідини, де було отримано підтвердження можливості коливань навколо стійкого прямолінійного положення рівноваги за першою формою.

**Достовірність отриманих результатів** забезпечується коректністю постановки задачі на основі варіаційного підходу, порівнянням частини одержаних результатів з результатами інших авторів, порівнянням з

відомими результатами для випадку докритичних режимів течії рідини, виконанням великої кількості тестових прикладів з контролем збіжності числового рішення.

Зміст дисертації і одержані результати повністю відповідають спеціальності 01.02.01 – теоретична механіка. Результати дисертації достатньо повно опубліковано в 7 наукових працях, з них 6 – наукові статті у фахових виданнях. Результати дисертації в достатній мірі апробовані на наукових конференціях і семінарах провідних наукових центрів. Автореферат дисертації вірно та повно відображає зміст дисертаційної роботи.

По дисертаційній роботі є наступні зауваження:

1. В роботі розглядається виключно двомірна задача. Виникає питання щодо стійкості двовимірних коливань і можливості переходу на режим тривимірних коливань системи.
2. В роботі не розглянуто питання про силову взаємодію трубопроводу з рідиною в місці закріплення, хоча вся інформація для цього є в рівняннях. Особливо цікавим було б дослідити як відрізняється силова взаємодія трубопроводу із закріпленням для докритичних і закритичних швидкостей течії.
3. В роботі досліджується декілька режимів докритичних і закритичних швидкостей течії, проте сам випадок течії з критичною швидкістю не описаний в роботі. Цікаво що відбувається в такому режимі? Чи стійко працює запропонований алгоритм дослідження в режимі коли лінійна частина відновлюючої сили відсутня?
4. Наведені в роботі графіки виконані в різних стилях і мають різного характеру підписи біля осей.

Висловлені критичні зауваження не знижують загальної позитивної оцінки проведених досліджень.

**Значення роботи для науки і практики.** Теоретична цінність роботи полягає в розвитку і застосуванні більш повної моделі для дослідження

динамічних процесів в трубопроводах з рідиною в біля- і закритичних діапазонах швидкостей течії рідини. Результати досліджень можуть бути використані в практиці діяльності проектних організацій і конструкторських бюро в галузях ракетобудування, транспорту, енергетичних комплексів, систем збереження і транспортування нафти і газу.

**Рекомендації по використанню результатів досліджень.** Результати роботи можуть бути використані в наукових дослідженнях і навчальному процесі в Київському, Львівському, Дніпровському національних університетах, в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Інституті технічної механіки НАН України і ДКА України як засіб побудови нових моделей трубопроводів з рідиною і приклад ефективного моделювання сумісних нелінійних коливань механічних систем.

В цілому, дисертаційна робота Тімохіна Олексія Павловича «Нелінійна динаміка трубопроводу з рідиною в околі критичних швидкостей течії рідини» має завершений характер, наукову новизну, актуальність та практичну цінність, виконана на високому науковому рівні та відповідає вимогам МОН України, що висуваються до кандидатських дисертацій (вимог Положення «Про порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» до кандидатських дисертацій). Вважаю, що дисертаційна робота Тімохіна Олексія Павловича відповідає вимогам МОН України до дисертаційних робіт на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 – теоретична механіка, а її автор за дослідження нелінійних коливань системи трубопровід – рідина в біля- і закритичних областях швидкостей течії рідини заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.

Офіційний опонент  
старший науковий співробітник відділу  
математичних проблем механіки та теорії  
Інституту математики НАН України.  
кандидат фізико-математичних наук

