

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Поцелуєва Сергія Івановича
«Багатопараметричне збудження поверхневих і внутрішніх хвиль
у магнітних рідинах», представлена на здобуття
наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Розвиток нових технологій ставить перед спеціалістами в області механіки нові задачі, які вимагають для свого розв'язку комплексного врахування складних механізмів взаємодії суцільного середовища з різними фізико-хімічними полями. До числа таких задач належать проблеми ферогідродинаміки, яка вивчає ефекти впливу магнітного поля на рух середовища, що обумовлено магнітними властивостями речовини. Актуальність досліджень в цьому напрямку механіки спричинена широким використанням у техніці магнітних рідин, які є розчинами нанорозмірних частинок магнітного матеріалу в немагнітній рідині-носії. До числа важливих проблем ферогідродинаміки належить дослідження хвильових рухів намагнічуваних середовищ, оскільки виникнення поверхневих та внутрішніх хвиль у магнітних рідинах може суттєво впливати на характер технологічних процесів, у яких вони використовуються. Порівняння теоретичних результатів по характеру збудження хвиль в шарах ферорідин при дії нестационарних полів різної природи з експериментальними даними може бути використане для розробки нових магнітооптических пристроїв, тепло- і масообмінних апаратів.

Необхідно зазначити, що кожні два роки відбуваються Міжнародні наукові конференції з магнітних рідин, вивчення їх фізичних властивостей, застосування та математичного моделювання. У минулому році відбулась ІУ така конференція.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Поцелуєва С. І., пов'язана з дослідженням особливостей хвильових рухів, обумовлених магнітними властивостями середовища, є безумовно актуальною.

Наукова значимість дисертації Поцелуєва С. І. визначається зокрема й тим, що у розвиток в Україні нових технологій важливий вклад вносять та будуть вносити спеціалісти-механіки, які намагаються підтримувати і розвивати сучасні напрямки досліджень в області фізико-хімічної гідродинаміки, що спрямовані на пошук і розробку нових наноматеріалів та способів керування технологічними процесами.

Переходячи до оцінки результатів дисертаційної роботи Поцелуєва С. І. слід відзначити, що дослідження, результати яких увійшли в дисертацію, виконані у відповідності до держбюджетних програм та тематичних планів наукових досліджень: «Комбінаційні резонанси, біфуркації та параметрична стабілізація в механічних системах» (2012 – 2014 pp., № 0112U001313), «Розробка математичних моделей та чисельно-аналітичних методів дослідження хвильових рухів континуальних систем ускладненої структури» (2015 – 2016 pp., № 0115U000480), «Дослідження якісної поведінки динамічних систем різної природи» (2016 – 2017 pp., № 0116U000823), які виконувались на кафедрі прикладної математики та кафедрі теоретичної та прикладної механіки Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Основні результати дисертаційної роботи одержані автором особисто та достатньо повно викладені в 16 друкованих працях, з них 4 – наукові статті у фахових виданнях України, 2 статті у міжнародних журналах, 1 стаття у колективних працях по результатам наукової конференції, 9 тез доповідей на наукових конференціях. Рівень апробації роботи на семінарах і конференціях, у тому числі й міжнародних, є цілком достатнім.

Для дослідження умов виникнення поверхневих та внутрішніх хвиль у шарах намагнічуваних рідин, взаємодіючих із зовнішнім магнітним та вібраційним полями, автором сформульовано та розв'язано наступні задачі:

- Узагальнено метод побудови областей параметричної нестійкості необмеженої вільної поверхні шару в'язкої нелінійно намагнічуваної рідини при спільному впливі механічних вібрацій та довільно орієнтованого відносно горизонтальної поверхні нестационарного магнітного поля.

- Розроблено процедуру побудови границі області стійкості рівноважного стану двошарової системи незмішуваних магнітних рідин, які розділені горизонтальною пластиною з отвором та взаємодіють із зовнішнім магнітним полем.
- Досліджено стійкість поверхні розділу намагнічуваних рідин, розташованих у циліндричному соленоїді. Визначено моди та форми найшвидше зростаючих збурень поверхні в закритичному магнітному полі.
- Досліджено можливість збудження ультразвукових коливань у намагнічуваних рідинах при періодичній дії нестационарного магнітного поля за рахунок виникнення об'ємного параметричного резонансу.

У роботі використовуються фундаментальні положення механіки суцільних середовищ, рівняння ферогідродинаміки, застосовуються класичні математичні методи, такі як метод Бубнова – Гальоркіна, методи теорії стійкості, асимптотичні методи, чисельні методи лінійної алгебри. Математичні методи та фізичні моделі, які використовує автор, є достатньо коректними й забезпечують достовірність результатів. Теоретичні результати, які отримані на основі рівнянь квазістаціонарної ферогідродинаміки за допомогою вказаних методів, є достатньо обґрунтованими, оскільки вони узгоджуються з відомими результатами експериментальних досліджень M. P. Perry, T. B. Jones (Journal of Applied Physics. – 1975. – Vol. 46, № 2 – P. 756 – 760); B. Abou, J. E. Westfreid, S. Roux (J. Fluid Mech. – 2000. – Vol. 416. – P. 217 – 237); J. C. Bacri, A. Cebers, J. C. Dabadie, R. Perzynski (Phys. Review E. – 1994. – Vol. 50. – P. 2712 – 2715.); V. G. Bashtovoi, R. E. Rosensweig (J. Magn. Magn. Mater. – 1993. – Vol. 122, Issue 1-3. – P. 234 – 240); A. Cebers, M. M. Maiorov (Magnetohydrodynamics. – 1989. – Vol. 25, № 4. – P. 445 – 448); T. Mahr, I. Rehberg (Europhys. Lett. – 1998. – Vol. 43 (1). – P. 23–28); C. Gollwitzer, G. Matthies, R. Richter et al.(J. Fluid Mech. – 2007. – Vol. 571. – P. 455 – 474).

По результатам виконаних досліджень автор сформулював і виносить на захист основні положення та результати, які відображені в розділах дисертації. В роботі насамперед обґрунтовано актуальність теми і представлено загальну характеристику роботи; наведено огляд наукових публікацій по темі дисертаційної роботи. Вписано основну систему рівнянь ферогідродинаміки ізотропно

намагнічуваних середовищ та сформульовано граничні умови на поверхнях розділу. На основі проведеного аналізу стану проблеми визначено мету і задачі дослідження.

Основні наукові результати містяться у розділах 2, 3 та 4 дисертації.

В розділі 2 досліджено задачі параметричної стійкості необмеженої вільної поверхні шарів нелінійно намагнічуваної рідини й динамічної стабілізації поверхневої нестійкості за допомогою осцилюючих магнітних і вібраційного полів. Встановлено, що при нехтуванні тепlopровідністю рідини ця задача зводиться до дослідження стійкості для рідини зі спеціальним рівнянням магнітного стану, що залежать тільки від напруженості поля й густини. Показано, що магнітне поле, яке складається зі стаціонарної та осцилюючої частин, здійснює двочастотне параметричне збудження поверхневих хвиль. У цьому випадку задача в лінійному наближенні зведена до нескінченної системи лінійних рівнянь для коефіцієнтів ряду Фур'є амплітуди збурень вільної поверхні ферорідини. Матриця цієї системи є квадратичним пучком матриць, параметром якого є амплітуда періодичної дії. Встановлено, що на відміну від випадку механічних вібрацій, для тільки осцилюючого магнітного поля найнебезпечнішими є гармонічні коливання. З додаванням стаціонарного поля, починають проявлятися зони субгармонічної нестійкості. Збільшення стаціонарного поля може призводити до виникнення бікритичних точок, тобто ситуацій, коли одній критичній амплітуді поля відповідають два різних хвильових числа (гармонічних та субгармонічних коливань). Подальше збільшення постійної компоненти поля може призводити до того, що субгармонічні коливання стають більш небезпечними. Встановлено залежність критичної амплітуди магнітного поля і критичного хвильового числа від кута орієнтації поля. При відхиленні поля від вертикального або горизонтального положення для збудження нестійкості потрібно прикласти поле більшої амплітуди, оскільки вертикальна й горизонтальна складові магнітного поля можуть компенсувати дію один одного. Для нелінійно намагнічуваної рідини показано можливість збудження параметричної нестійкості вільної поверхні в результаті гармонійного збурення температури за рахунок магнітокалоричного ефекту.

В розділі 3 показано, що на відміну від випадку нескінченно протяжних

горизонтальних шарів ферорідин власні частоти коливань рідини з обмеженою вільною поверхнею утворюють дискретний спектр, а моди коливань, що їм відповідають, якісно відрізняються одна від одної. У зв'язку з цим зазначено, що в теоретичних дослідженнях нестійкості безмежних шарів магнітних рідин, як правило, обмежуються розглядом одномірного синусоїdalного збурення вільної поверхні, що неперервно залежить від одного параметра (хвильового числа), або суперпозиції двох або трьох таких збурень. Це дозволяє апроксимувати одномірні, квадратні або гексагональні структури, які спостерігаються в експериментах з ферорідинами в прямокутних, гексагональних або круглих кюветах у далекій закритичній області значень параметрів, коли вплив границі області, яку займає рідина, суттєво слабшає. У випадках, коли вільна поверхня рідини (або поверхня розділу рідин) обмежена, а індукція магнітного поля близька до критичних значень, найнебезпечніші збурення мають більш складну структуру. Показано, що область значень параметрів, що відповідають нестійким рівноважним станам, розбивається на зони, кожна з яких характеризується цілком визначеноюmodoю найбільш швидко зростаючих збурень. Зміни індукції магнітного поля, що викликають перехід фізичних параметрів з однієї зони в іншу, супроводжуються якісною перебудовою форм поверхні розділу ферорідин. Зі збільшенням числа Бонда, яке характеризує відношення гравітаційних сил до капілярних, критичні значення індукції магнітного поля наближаються до значень, що відповідають випадку необмеженої поверхні розділу.

В розділі 4 для встановлення основних закономірностей одновимірних хвильових рухів непровідних намагнічуваних рідин запропоновано метод дослідження таких процесів шляхом побудови ефективного немагнітного середовища зі спеціальним рівнянням термодинамічного стану. Це дозволило виразити акустичні характеристики звукових хвиль через термодинамічні параметри ефективного середовища. Описаний метод може бути застосований не лише для дослідження одновимірних хвильових процесів у непровідних рідинах та газах, але й у більш складних середовищах (наприклад багатокомпонентних, анізотропних середовищах та ін.). Показано, що при нестационарній дії магнітного поля в

ферорідині може виникнути об'ємний параметричний резонанс, що відповідає збудженню ультразвукових коливань.

Таким чином, новими науковими результатами, які одержані у дисертації особисто автором, можна вважати наступні положення:

1. Теоретично встановлено, що поріг виникнення нестійкості Розенцвейга в стаціонарному вертикальному магнітному полі, можна підвищити за рахунок додавання осциляцій поля (як горизонтальних так і вертикальних).

2. Виявлено, що при спільній дії механічних вібрацій та нестаціонарного магнітного поля, які осцилюють з однаковою частотою, може проявлятися ефект параметричної стабілізації, оскільки ці періодичні впливи можуть компенсувати параметричну дію одного.

4. Встановлено, що для магнітного поля, яке складається зі стаціонарної та осцилюючої частин, зміна кута орієнтації поля може призводити до зміни критичного хвильового числа, яке відповідає гармонічній або субгармонічній нестійкості.

5. Показано принципову можливість збудження параметричної нестійкості вільної поверхні нелінійно намагнічуваної рідини при періодичному збуренні температури за рахунок магнітокалоричного ефекту.

6. Для обмеженої поверхні розділу рідин, які розділені горизонтальною пластиною з круговим отвором або розташовані в циліндричному соленоїді, побудовано границю області стійкості в просторі безрозмірних параметрів цих систем. Зокрема для вільної поверхні рідини, намагнічуваної за законом Ланжевена, показано, що область значень параметрів, які відповідають виникненню просторових структур на вільній поверхні, розбивається на зони, кожна з яких характеризується цілком визначеною модою найбільш швидко зростаючих збурень поверхні.

7. Показано, що осцилююче магнітне поле може призводити до виникнення вузьких областей об'ємної параметричної нестійкості, що відповідає збудженню ультразвукових коливань в магнітній рідині. Додавання стаціонарної компоненти поля понижує критичну амплітуду осциляцій при якій збуджуються звукові хвилі.

Зазначимо основні зауваження до дисертаційної роботи Поцелуєва С. І.

– В роботі є друкарські помилки орфографічного та стилістичного характеру, такі, як пропущені коми та тире. Зустрічається вираз "плаский" шар замість плоского. На стор. 35 пропущено слово "інерціальна" для системи відліку, що позначена зірочкою, при відповідних фізичних величинах. Пропущено ρ в знаменнику для виразів f та u другого та четвертого рівнянь (1.10), відповідно. В кінці третього рівняння (1.11) та (1.16) пропущено множення на v_{ik} . Некоректно відображається посилання на формулу (1.6) на стор. 36. Тим не менше в авторефераті дисертації ці недоліки відсутні.

– Для близьких по постановці задач наведено повні системи рівнянь та граничних умов, хоча можна було б використовувати посилання на попередні рівняння із зазначенням відповідних змін у них.

На мою думку більш коректним є вираз "Рівняння (2.66) складає задачу для квадратичного пучка матриць" (стор.56).

Хоча результати числових розрахунків у їх обговоренні вказують на новизну, в тексті дисертації відповідні коментарі можна було б розширити.

На стор. 97 при введені безрозмірних змінних у формулах (3.15) пропущено значення безрозмірної величини $\bar{z} = z / R$, хоча у виразах (3.19)-(3.23) вона використовується. У формулі (3.16) помилково записана функція φ замість ψ .

У виразі (3.36) перед подвійним підсумовуванням помилково стоїть знак рівності замість додавання, а в коефіцієнтах цієї суми пропущені позначення гіперболічних функцій ch та sh при $\gamma_{nj}t$, що могло призвести до неправильного розуміння виду розв'язку еволюційної задачі. Проте, в тексті відповідної статті ці помилки відсутні, а подальші висновки про початкову стадію еволюції вільної поверхні в закритичному магнітному полі є коректними.

Недоліки, які зазначені у відгуку, не знижують доволі високої оцінки як теоретичної, так і практичної значимості роботи.

В цілому дисертація Поцелуєва С. І. є завершеним науковим дослідженням.

В ній розглянуті актуальні задачі збудження поверхневих хвиль у ідеальній намагнічуваній рідині, в'язкій магнітній рідині, та задачі параметричної стійкості стискуваної рідини в однорідному нестационарному магнітному полі. Вона має необхідну ступінь новизни, вирізняється новими методами дослідження хвильових рухів, та новими розв'язками, які розкривають різноманіття явищ у середовищах, що взаємодіють з електромагнітними полями.

Автореферат правильно відображає суть дисертаційної роботи. Результати досліджень Поцелуєва С. І. достатньо висвітлені в опублікованих ним роботах й апробовані на міжнародних наукових конференціях. Результати дисертаційної роботи можуть стимулювати подальші дослідження фізики колоїдів і магнітних явищ, механіки намагнічуваних середовищ, а також прикладні розробки в області ферогідродинаміки.

Дисертація Поцелуєва С. І. «Багатопараметричне збудження поверхневих і внутрішніх хвиль у магнітних рідинах» у повній мірі задовольняє вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.

Офіційний опонент доктор фіз.-мат. наук, проф.,
завідувач кафедри прикладної математики,
статистики та економіки
Кіровоградського державного педагогічного
університету імені Володимира Винниценка
МОН України (м. Кропивницький)

Авраменко О. В.

