

АНОТАЦІЯ

Печук В. Д. Регулярна і хаотична динаміка в механіці хрестоподібних хвиль. –Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» (13 Механічна інженерія). - Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ 2024.

В даній роботі вперше показана можливість перекачування енергії від хвилепродуктора до хрестоподібних поверхневих хвиль в ідеальній рідині в прямокутному басейні скінченних розмірів з хвилепродуктором. Це показано аналітично на основі застосування методу суперпозиції і перевірено експериментально.

Встановлено закономірності регулярних усталених поверхневих хвиль у рідині в прямокутному басейні скінченних розмірів з хвилепродуктором. Показано існування регулярних режимів коливань вільної поверхні рідини при одномодових параметричних резонансах. Наведено параметри, при яких можливі хаотичні стійкі коливання в усередненій динамічній системі, що описує динаміку амплітуд хрестоподібних хвиль.

Побудовано новий чисельний алгоритм для систем із запізнюванням. Це явний гібридний метод для систем диференціальних рівнянь з запізнюванням на основі поліномів Ньютона і формули Тейлора для наближення на наступний крок чисельного інтегрування і класичних методів Рунге-Кутти. Отриманий таким чином явний гібридний метод п'ятого порядку для систем диференціальних рівнянь з запізнюванням, наприклад, з коефіцієнтами Кутти-Нюстрема або коефіцієнтами методу Дормана-Принса, з оцінкою похибки чисельного інтегрування, підходить для дослідження актуальних на даний момент систем з запізнюванням на досить великі, порівняно з запізнюванням, проміжки часу.

Числовий розрахунок старшого показника Ляпунова із використанням класичного алгоритму Бенеттіна не завжди є задовільним у випадку динамічної системи з дисипацією енергії. Зроблено модифікацію цього

алгоритму що дає змогу підвищити точність розрахунків і розширити область застосування методу. Застосування цієї модифікації для моделі збудження хрестоподібних хвиль на вільній поверхні рідини у прямокутному каналі скінченної довжини і глибини дало змогу точніше ідентифікувати динамічні режими.

Чисельний розрахунок старшого показника Ляпунова на основі класичного алгоритма Бенеттіна не враховує збігання та розбігання траєкторій на хаотичному аттракторі. В роботі розроблено універсальний алгоритм, точність якого не залежить від цієї та інших особливостей хаотичних аттракторів, таких як форма, розмір та структура, їх кількість та розташування у фазовому просторі. Новий алгоритм дозволяє збільшити точність розрахунків та розширити область застосування зазначеного методу. Застосування запропонованої модифікації для моделі збудження хрестоподібних хвиль на вільній поверхні рідини у прямокутному каналі скінченної довжини і глибини дозволяє більш точно ідентифікувати динамічні режими.

Вперше досліджено вплив запізнювання на динаміку хрестоподібних хвиль. Встановлено суттєвість врахування факторів запізнювання при дослідженні на регулярну і хаотичну динаміку системи що описує хрестоподібні хвилі в басейні скінчених розмірів з хвилепродуктором.

Ключові слова: Чисельне моделювання, апроксимація, нестислива течія, крапельна рідина, деформація поверхні, вимушені частоти коливань, чисельне диференціювання, коливання, періодичні коливання, власні коливання, власні частоти та форми коливань, стійкість, динамічна стійкість, гідродинамічна система, хрестоподібні хвилі, хвилі, чисельні методи, хаос, динамічні системи, диференціальні рівняння з запізнюванням, методи Рунге-Кутти, показники Ляпунова, алгоритм Бенеттіна.

SUMMARY

Pechuk V. D. Regular and chaotic dynamics in mechanics of cross-waves. – Qualifying scientific works on rights for a manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of Ph.D. by speciality a 131 «Applied mechanics»(13 Mechanical engineering). - Kyiv national university of building and architecture, Kyiv 2024.

In this work possibility of pumping over of energy is first shown from wavemaker to the cruciform superficial waves in an ideal liquid in the rectangular pool of eventual sizes from wave maker. It is shown analytically on the basis of application of method of superposition and it is tested experimentally.

Conformities to the law of regular withstand superficial waves are set in a liquid in the rectangular pool of eventual sizes from wavemaker. Existence of the regular modes of vibrations of free surface of liquid is shown at one modes parametrical resonances. Parameters, at which chaotic proof vibrations are possible in the averaged dynamic system which describes the dynamics of amplitudes of cruciform waves, are resulted.

A new numeral algorithm is built for the differential systems with a delay. This is an explicit hybrid method for the systems of differential equations with a delay on the basis of polynomials of Newton and formula of Teylora for approaching on the next step of numeral integration and classic methods of Runge-kutti. The explicit hybrid method of fifth order is got thus for the systems of differential equations with a delay, for example, with the coefficients of Kutti-nyustrema or coefficients of method of Dormana-prinsa, with the estimation of error of numeral integration, befits for research of the actual now systems with a delay on the large enough, comparatively with a delay, intervals of time.

Numerical calculation of maximum exponent of Lyapunov from usage classic algorithm of Benettin not always is satisfactory in case of the dynamic system with dissipation of energy. It is done modification of this algorithm that gives opportunity to promote exactness of calculations and extend an application of method domain.

Application of this modification for the model of excitation of cross-waves on the free surface of liquid in the rectangular channel of eventual length and depth enabled more precisely to identify the dynamical modes.

The numeral calculation of maximum exponent of Lyapunov on the basis of classic algorithm of Benettina does not take into account running back and running approach of trajectory on chaotic attractor. An universal algorithm exactness of which does not depend on it and other features of chaotic аттракторів is developed in work, such as a form, size and structure, their amount and location in phase space. A new algorithm allows to increase exactness of calculations and extend an application of the noted method domain. Application of the offered modification for the model of excitation of cross-waves on the free surface of liquid in the rectangular channel of eventual length and depth allows more exactly to identify the dynamic modes.

First probed influencing of delay on the dynamics of cross-waves. Importance of account of factors of delay is set at research on the regular and chaotic dynamics of the system that describes cross-waves in the pool of complete sizes from wave maker.

Keywords: numerical simulation, approximation, incompressible flow, droplet liquid, surface deformation, forced vibration frequencies, numeric differentiation, oscillations, periodic oscillations, natural vibration, natural frequency and vibrational patterns, stability, dynamical stability, hydrodynamic system, cross-waves, waves, numerical methods, chaos, dynamical systems, differential equations with a delay, methods of Runge-kutti, exponents of Lyapunov, algorithm of Benettin.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

а) статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (в т.ч. включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «А»):

1. Печук В.Д. Про оцінку старшого показника Ляпунова моделі хрестоподібних хвиль у прямокутному каналі скінченних розмірів / В.Д. Печук, Т.С. Краснопольська // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2022. - Т. 65, № 1-2. - С. 209-215. <https://doi.org/10.15407/mmpmf2022.65.1-2.209-215>. *Особисто автором виконано суттєве покращення алгоритму Бенеттіна, чисельна реалізація, чисельне дослідження.*

2. Pechuk V.D. Estimation of the largest Lyapunov exponent for a model of cross-shaped waves in a rectangular channel of finite size/ V.D. Pechuk, T.S. Krasnopolskaya // Journal of Mathematical Sciences, Springer. - 2024. - Vol. 282, No. 5. - P. 862 – 869. <https://doi.org/10.1007/s10958-024-07221-x> (Видання включено до міжнародних наукометричних баз). *Особисто автором виконано суттєве покращення алгоритму Бенеттіна, чисельна реалізація, чисельне дослідження.*

б) статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «Б» :

3. Бондаренко Н.В. Моделювання динамічних систем з запізнюванням за допомогою узагальнених методів Рунге-Кутта / Н.В. Бондаренко, В.Д. Печук // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 2019. – № 96. - С. 3- 11. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2019.96.3-11>. *Особисто автором виконано узагальнення методів Рунге-Кутти на випадок скінченної кількості змінних запізнювань, сформульовано і доведено відповідні теореми.*

4. Бондаренко Н.В. Побудова явних методів Рунге-Кутти для моделювання динамічних систем з запізнюванням / Н.В. Бондаренко, В.Д. Печук // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 2020. - № 99. - С. 16-27. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.99.16-27>. *Особисто автором розроблено явний гібридний метод Рунге-Кутта п'ятого порядку збіжності для динамічних систем з запізнюванням, а також розроблено основні принципи побудови даних методів старших порядків збіжності.*

5. Печук В.Д. Явні гібридні методи п'ятого порядку збіжності для динамічних систем з запізнюванням / В.Д. Печук, Н.В. Бондаренко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 2021. - № 101. – С. 168-180. <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2021.101.168-180>. *Особисто автором розроблено явний гібридний метод Рунге-Кутта п'ятого порядку збіжності для динамічних систем з запізнюванням, для змінного кроку чисельного інтегрування. А також отримана оцінка локальної похибки даного методу.*

6. Печук В.Д. Універсальний алгоритм оцінки старшого показника Ляпунова в дисипативній динамічній системі/ В.Д. Печук, Т.С. Краснопольська, Є.Д. Печук // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 2023. - № 105. – С. 190-199. <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2023.105.190-199>. *Особисто*

автором розроблено новий алгоритм оцінки старшого показника Ляпунова в дисипативній динамічній системі, виконані чисельна реалізація та чисельне дослідження.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Pechuk V.D. Accuracy Improvement of the Highest Lyapunov Exponent Estimation / V.D. Pechuk, T.S. Krasnopolskaya, E.D. Pechuk. // The 14-th CHAOS 2021 International Conference, [Crete], 8-11 June, 2021. - P.92.

2. Pechuk V.D. Maximum Lyapunov Exponent Calculation / V.D. Pechuk, T.S. Krasnopolskaya, E.D. Pechuk. // CHAOS 2021 International Conference, [Crete], 8-11 June, 2021 / Proceedings. - P. 351-359.

3. Pechuk V.D. Maximum Lyapunov Exponent Calculation / V.D. Pechuk, T.S. Krasnopolskaya, E.D. Pechuk //materials CHAOS 2021: 14th Chaotic Modeling and Simulation International Conference. - Springer Proceedings in Complexity. Springer. – 2022. - P. 327–335.

4. Pechuk V.D. Modeling of time-delay dynamical systems by explicit hybrid methods of the fifth order of convergence / V.D. Pechuk, N.V. Bondarenko // The 2st International Conference on Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things, "TTSIIT-2023" 24-25 January, Ukraine-Iraq-Poland. - P. 78-82.

5. Pechuk V.D. Chaos in hydrodynamic system with delay / V.D. Pechuk, N.V. Bondarenko, E.D. Pechuk, T.S. Krasnopolskaya // 16th Chaotic Modeling and Simulation International Conference Heraklion, [Crete], 13 – 16 June, 2023 Hybrid.

6. Pechuk V.D. A Universal Algorithm for Estimating the Lyapunov Exponent in a Dissipative Dynamical System / V.D. Pechuk, T.S. Krasnopolskaya, E.D. Pechuk // 16th Chaotic Modeling and Simulation International Conference Heraklion, [Crete], Greece, 13 – 16 June, 2023 Hybrid.

7. Краснопольська Т.С. Хрестоподібні хвилі у прямокутних басейнах / Т.С. Краснопольська, В.Д. Печук // Комп'ютерна гідромеханіка: Матеріали дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції, [Київ], 1-2 жовтня 2024р. - Київ: ІГМ НАН України. – 2024. - С. 47-48

Особистий внесок здобувача: розробка нового та покращеного алгоритмів оцінки старшого показника Ляпунова в дисипативній динамічній системі, побудова явних гібридних методів Рунге-Кутти для динамічних систем з запізнюванням, оцінка локальної похибки даного методу п'ятого порядку збіжності, чисельне моделювання, чисельне дослідження. Розвинення системи, що описує хрестоподібні хвилі.