

## АНОТАЦІЯ

*Пірко́вський Д.С.* Підвищення надійності та безпеки енергоустановок шляхом запобігання гідродинамічних ударів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. - Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2020.

Питанням підвищення надійності і модернізації насосів енергетичних систем присвячено багато досліджень. Однак, питання впливу тепло-гідродинамічної нестійкості на надійність насосних систем вивчені недостатньо. Явище тепло-гідродинамічної нестійкості полягає у виникненні умов автоколивальних (самопідтримувальних) і / або аперіодичних (імпульсних) процесів зміни тепло-гідродинамічних параметрів потоків (тиску, швидкості, парозмісту і т.п.) в системах теплотехнічного обладнання теплових і ядерних енергоустановок. Виникнення умов тепло-гідродинамічної нестійкості (ТГН) призводить до додатковим гідродинамічним навантаженням на конструкції теплоенергетичного обладнання і трубопроводів (гідродари), а також знижує надійність їх експлуатації в робочих, перехідних і аварійних режимах. У випадках умов критичних по надійності гідродарів (КГУ) відбувається відмова на виконання проектних функцій експлуатації та / або руйнування конструкцій теплоенергетичного обладнання і трубопроводів (ТОіТ). Визначальними факторами виникнення гідродинамічної нестійкості і гідродарів в широких діапазонах зміни режимних параметрів можуть бути специфічні особливості витратних (мережевих) характеристик насосів, тобто залежність гідродинамічного напору від швидкості руху або витрати потоку. Все це визначає актуальність цієї роботи і вимагає додаткового вивчення і аналізу. Проведений аналіз відомих підходів моделювання гідродинамічних ударів в системах теплоенергетичного обладнання визначив необхідність удосконалення і розробки нових методів моделювання умов виникнення і

наслідків гідродинамічних ударів внаслідок різних видів тепло-гідродинамічної нестійкості одно- і двофазних потоків: коливальна нестійкість внаслідок інерційності напірно-видаткової характеристики насосів і тепло- масообмінних процесів в двофазних потоках; аперіодична нестійкість внаслідок імпульсного збільшення локального гідравлічного опору і трансзвукових режимів течії одно- і двофазних потоків. При моделюванні умов виникнення і наслідків гідродинамічних ударів необхідно враховувати, що основним визначальним параметром гідроударів є швидкість зростання імпульсу тиску при переході кінетичної енергії гальмування потоку в енергію імпульсу гідроудару. При цьому, також необхідно враховувати можливість одночасної або послідовної реалізації різних видів гідродинамічних ударів. Проведений на основі розроблених критеріїв подібності аналіз представлених в роботі умов проведення експериментів на стендах насосних систем визначив їх невідповідність за критеріями гідродинамічної подібності реальних умов основних насосних систем енергоустановок. Розроблено метод моделювання умов виникнення і наслідків гідроударів в розімкнутих контурах теплоенергетичних систем на основі загальних положень теорії тепло-гідродинамічної нестійкості. На відміну від відомих підходів в запропонованому методі умови виникнення критичних гідроударів визначаються умовами переходу коливальної тепло-гідродинамічної нестійкості в аперіодичну нестійкість. На основі розробленого методу визначені умови виникнення критичних гідроударів в розімкнутих трубопровідних системах енергоустановок при лінійної апроксимації напірно-видаткової характеристики насосів. Розроблено метод визначення умов виникнення гідроударів в замкнених контурах примусової циркуляції енергетичних систем. Метод заснований на умовах виникнення коливальної гідродинамічної нестійкості внаслідок інерційності напірно-видаткової характеристики насосів. Інерційність визначається «запізненням» в часі реакції напірно-видаткової характеристики насоса на зміну гідродинамічних параметрів потоку. Розроблено оригінальний метод

моделювання умов виникнення і наслідків гідродинамічних ударів при закритті арматури як слідства аперіодичної нестійкості. Вважається, що при певній швидкості закриття арматури відбувається різке (імпульсна) гальмування потоку, а кінетична енергія гальмування потоку переходить в енергію гідродинамічного удару. На відміну від відомих підходів запропонований метод враховує умови формування гідродинамічного удару в залежності від коефіцієнта гідродинамічного опору і швидкості закриття арматури, конструкційно-технічних характеристик всіх елементів трубопровідної системи, теплофізичних властивостей потоку та інших визначальних чинників. Розроблено оригінальний метод моделювання умов виникнення і наслідків гідродинамічних ударів при трансзвукових режимах течії двофазних потоків, що враховує перехід кінетичної енергії гальмування потоку в енергію імпульсу гідродинамічного удару. Встановлено, що модельовані гідродинамічні навантаження при трансзвукових режимах можуть значно перевищувати відповідні відомі рекомендації Н.Є. Жуковського. На основі розрахункового моделювання рівнянь запропонованого методу визначено область значень критеріїв виникнення гідродинамічних ударів внаслідок аперіодичної тепло-гідродинамічної нестійкості при трансзвукових режимах течії. Розроблено оригінальний метод моделювання умов виникнення і наслідків гідродинамічних ударів при аварійному заповненні компенсатора тиску ВВЕР. На відміну від традиційно використовуваної формули Н.Є. Жуковського запропонований метод враховує визначальні особливості / ефекти формування умов виникнення гідродинамічних ударів в компенсаторі тиску ВВЕР. Проведена верифікація розроблених методів визначення умов і наслідків виникнення гідродинамічних ударів в системах теплоенергетичного обладнання на основі відомих експериментальних даних професора А.В. Корольова. Узгодження розрахункових і експериментальних даних цілком задовільне.

Ключові слова: надійність, безпека, енергоустановка, гідродинамічний удар, гідродинамічна нестійкість.

Список публікацій здобувача:

1. Мазуренко, А. С., Скалозубов, В. І., Пірковський, Д. С., Чулкін, О. А., & Хуіюй, Ч. Аналіз застосовності результатів експериментальних досліджень гідродинаміки до насосних систем теплових і ядерних енергоустановок // Ядерна енергетика та довкілля. - 2017. - №. 1. - С. 19. Дисертанту належить проведення аналізу отриманих результатів розрахункового моделювання.
2. Скалозубов, В. І., Хуіюй, Ч., Чулкін, О. А., Пірковський, Д. С. Оптимізація надійності при модернізації теплотехнічного обладнання // Питання атомної науки і техніки. - 2017. Дисертанту належить проведення аналізу отриманих результатів розрахункового моделювання.
3. Скалозубов, В. І., Хуіюй, Ч., Чулкін, О. А., Пірковський, Д. С. Метод моделювання умов виникнення критичних по надійності гідроударів на насоси теплових і ядерних енергоустановок // Питання атомної науки і техніки. - 2017. дисертанту належить розробка нових теоретичних положень методу.
4. Мазуренко, А. С., Скалозубов, В. І., Козлов, І. Л., Пірковський, Д. С., Чулкін, О. А. Визначення умов виникнення гідроударів в гідросистемах // Проблеми регіональної енергетики. - 2017. - №. 2 (34). Дисертанту належить розробка нових теоретичних положень методу.
5. Скалозубов В. І., Чулкін О. А., Пірковський Д. С. Оглядовий аналіз умов і наслідків гідродинамічних ударів в обладнанні та трубопроводах систем, важливих для безпеки ядерних енергетичних установок // Ядерна енергетика та довкілля. - 2018. - С. 20. Дисертанту належить проведення аналізу отриманих результатів розрахункового моделювання.
6. Скалозубов, В. І., Мазуренко, А. С., Пірковський, Д. С., Чулкін, О. А., Козлов, І. Л., Комаров, Ю. А. Вплив напірно-видаткової характеристики поршневих насосів на умови виникнення гідродинамічних ударів в трубопровідних системах теплотехнічного обладнання // Ядерна енергетика

та докільця. - 2018. - С. 20. Дисертанту належить проведені розрахункові обґрунтування умов і наслідків гідроударів методом Рунге-Кутта.

7. Skalozubov, V., Bilous, N., Pirkovskiy, D., Kozlov, I., Komarov, Y., Chulkin, O. Water Hammers in Transonic Modes of Steam-Liquid Flows in NPP Equipment //Nuclear and Radiation Safety. – 2019. – №. 2 (82). – С. 43-46. Дисертанту належить проведені розрахункові обґрунтування умов і наслідків гідроударів методом Рунге-Кутта.

8. Skalozubov, V.I., Chulkin, O.A., Pirkovskiy, D.S., Kozlov, I.L, Komarov, Yu.A. Method for determination of water hammer conditions and consequences in pressurizers of nuclear reactors //Turkish Journal of Physics. – 2019. – Т. 43. – №. 3. – С. 229-235. Дисертанту належить розробка нових теоретичних положень методу.

9. Skalozubov V. I., Spinov V. M., Spinov D. V., Pirkovskiy D. S., Gablaya T. V. Conditions for prevention of water hammers at start-up of emergency feed pumps with a steam driver of nuclear power plants // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія Інновац. дослідж. у наук. роботах студентів. - Харків, 2019. - № 21 (1346). - С. 15-18. Дисертанту належить проведені розрахункові обґрунтування умов і наслідків гідроударів методом Рунге-Кутта.

10. Skalozubov V., Pirkovskiy D., Spinov V., Kozlov I, & Komarov Y.,. Reliability of Steam-Operated Emergency Feed Pumps. In: Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Springer, Cham, 2019. p. 600-607. Дисертанту належить проведений аналіз отриманих результатів розрахункового моделювання.

11. В. І. Скалозубов, О. А. Чулкін, Д. С. Пірковський. Гідроудари внаслідок тепло-гідродинамічної нестійкості: монографія / LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018 Дисертанту належить розробка нових теоретичних положень методу.

12. V. Skalozubov, D. Pirkovskiy, O. Chulkin. Water hammers in systems important for safety of nuclear power plants: monograph / LAP LAMBERT

Academic Publishing, 2018. Дисертанту належить розробка нових теоретичних положень методу.

## **ABSTRACT**

Pirkovskiy D.S. Improving the reliability and safety of power plants by preventing water hammers. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 144 - Heat power engineering. - Odessa national polytechnic university, Odessa, 2020.

Much research has been devoted to improving the reliability and modernization of energy system pumps. However, the issues of the influence of heat-hydrodynamic instability on the reliability of pumping systems are not well understood. The phenomenon of thermo-hydrodynamic instability consists in the emergence of conditions for self-oscillating (self-sustaining) and / or aperiodic (pulsed) processes of changes in the thermo-hydrodynamic parameters of flows (pressure, speed, vapor content, etc.) in the systems of thermal equipment of thermal and nuclear power plants. The emergence of conditions of heat-hydrodynamic instability (HHI) leads to additional hydrodynamic loads on the construction of heat-power equipment and pipelines (water hammer), and also reduces the reliability of their operation in operating, transient and emergency conditions. In cases of critical conditions for the reliability of water hammers (CWH), the design functions of the operation and / or destruction of the designs of heat power equipment and pipelines (HPEaP) are denied. The determining factors for the occurrence of hydrodynamic instability and water hammer in a wide range of regime parameters can be specific features of the flow (network) characteristics of the pumps, that is, the dependence of the hydrodynamic pressure on the speed or flow rate. All this determines the relevance of this work and requires additional study and analysis. The analysis of the well-known approaches to simulating water hammers in heat-power equipment systems determined the need for improvement

and development of new methods for modeling the conditions of occurrence and consequences of water hammers due to various types of heat-hydrodynamic instability of single and two-phase flows: oscillatory instability due to the inertia of the pressure-discharge characteristics of pumps and heat mass transfer processes in two-phase flows; aperiodic instability due to a pulsed increase in local hydraulic resistance and transonic flow regimes of single and two-phase flows. When modeling the conditions of occurrence and consequences of water hammer, it is necessary to take into account that the main determining parameter of water hammer is the growth rate of the pressure pulse during the transition of the kinetic energy of deceleration of the flow into the energy of the pulse of water hammer. At the same time, it is also necessary to take into account the possibility of simultaneous or sequential implementation of different types of water hammers. An analysis of the experimental conditions presented in the work on the stands of pumping systems based on the developed similarity criteria determined their inconsistency according to the criteria of hydrodynamic similarity to the real conditions of the main pumping systems of power plants. A method is developed for modeling the conditions of occurrence and consequences of water hammers in open circuits of heat power systems based on the general principles of the theory of heat-hydrodynamic instability. In contrast to the known approaches in the proposed method, the conditions for the occurrence of critical water hammers are determined by the conditions for the transition of vibrational heat-hydrodynamic instability to aperiodic instability. Based on the developed method, the conditions for the occurrence of critical water hammers in open pipeline systems of power plants with a linear approximation of the pressure-flow characteristics of pumps are determined. A method has been developed for determining the conditions for the occurrence of water hammer in closed circuits of forced circulation of energy systems. The method is based on the occurrence of oscillatory hydrodynamic instability due to the inertia of the pressure-flow characteristic of the pumps. Inertia is determined by the “delay” in the reaction time of the pressure-flow characteristic of the pump to a change in the hydrodynamic parameters of the flow.

An original method has been developed to simulate the conditions of occurrence and consequences of water hammers when closing valves as a consequence of aperiodic instability. It is believed that at a certain closing speed of the valve, a sharp (pulsed) deceleration of the flow occurs, and the kinetic energy of deceleration of the flow passes into the energy of water hammer. In contrast to the known approaches, the proposed method takes into account the conditions for the formation of water hammer depending on the coefficient of hydrodynamic resistance and closing speed of the valve, structural and technical characteristics of all elements of the pipeline system, thermophysical properties of the flow, and other determining factors. An original method has been developed to simulate the conditions of the occurrence and consequences of water hammer under transonic flow regimes of two-phase flows, taking into account the transition of the kinetic energy of deceleration of the flow into the pulse energy of a water hammer. It was established that the simulated hydrodynamic loads under transonic conditions can significantly exceed the corresponding known recommendations of N.E. Zhukovsky. Based on computational modeling of the equations of the proposed method, the range of criteria for the occurrence of water hammer due to aperiodic heat-hydrodynamic instability in transonic flow regimes is determined. An original method has been developed to simulate the conditions of occurrence and consequences of water hammer during emergency filling of the VVER pressure compensator. In contrast to the traditionally used formula N.E. Zhukovsky proposed method takes into account the defining features / effects of the formation of the conditions for the occurrence of water hammer in the pressure compensator VVER. Verification of the developed methods for determining the conditions and consequences of the occurrence of water hammers in the systems of heat power equipment based on the known experimental data of prof. A.V. Korolev. The agreement between the calculated and experimental data is quite satisfactory.

Key words: reliability, safety, power plant, water hammer, hydrodynamic instability.



List of publications of the applicant:

1. Mazurenko, A. S., Skalozubov, V. I., Pirkovskiy, D. S., Chulkin, O. A., & Huiyuy, Ch. Analysis of the applicability of the results of experimental studies of hydrodynamics to pumping systems of thermal and nuclear power plants // Nuclear Power Engineering and Environment. - 2017. - No. 1. - P. 19. The dissertator owns the analysis of the obtained results of computational modeling.
2. Skalozubov, V.I., Huiyuy, Ch., Chulkin, O.A., Pirkovskiy, D.S Optimization of reliability in the modernization of heating equipment // Problems of Atomic Science and Technology. - 2017. The dissertator owns the analysis of the obtained results of computational modeling.
3. Skalozubov, V. I., Huiyuy, Ch., Chulkin, O. A., Pirkovskiy, D.S. A method of modeling the conditions for the occurrence of critical in terms of reliability water hammers on pumps of thermal and nuclear power plants // Problems of Atomic Science and Technology. - 2017. The dissertator is responsible for the development of new theoretical principles of the method.
4. Mazurenko, A. S., Skalozubov, V. I., Kozlov, I. L., Pirkovskiy, D. S., Chulkin, O. A. Determination of conditions for the occurrence of water hammer in hydraulic systems // Problems of regional energy. - 2017. - No. 2 (34). The dissertator is responsible for the development of new theoretical principles of the method.
5. Skalozubov V. I., Chulkin O. A., Pirkovskiy D. S. A survey analysis of conditions and consequences of water hammers in equipment and pipelines of systems important for the safety of nuclear power plants. Nuclear Power Engineering and Environment. - 2018 .-- P. 20. The dissertator owns the analysis of the obtained results of computational modeling.
6. Skalozubov, V. I., Mazurenko, A. S., Pirkovskiy, D. S., Chulkin, O. A., Kozlov, I. L., Komarov, Yu. A. Influence of the pressure-flow characteristics of piston pumps on the conditions for the occurrence of water hammers in pipeline systems of heat engineering equipment // Nuclear energy tadovkilla. - 2018. - P. 20. The dissertator is the author of the computational justifications for the conditions and consequences of water hammering by the Runge-Kutta method.

7. Skalozubov, V., Bilous, N., Pirkovskiy, D., Kozlov, I., Komarov, Y., Chulkin, O. Water Hammers in Transonic Modes of Steam-Liquid Flows in NPP Equipment //Nuclear and Radiation Safety. – 2019. – №. 2 (82). – C. 43-46. The dissertator is the author of the computational justifications for the conditions and consequences of water hammering by the Runge-Kutta method.
8. Skalozubov, V.I., Chulkin, O.A., Pirkovskiy, D.S., Kozlov, I.L, Komarov, Yu.A. Method for determination of water hammer conditions and consequences in pressurizers of nuclear reactors //Turkish Journal of Physics. – 2019. – T. 43. – №. 3. – C. 229-235. The dissertator is responsible for the development of new theoretical principles of the method.
9. Skalozubov V. I., Spinov V. M., Spinov D. V., Pirkovskiy D. S., Gablaya T. V. Conditions for prevention of water hammers at start-up of emergency feed pumps with a steam driver of nuclear power plants // Visn. Nats. tech. un-ty "KhPI". - Kharkiv, 2019. - No. 21 (1346). - S. 15-18.The dissertator is the author of the computational justifications for the conditions and consequences of water hammering by the Runge-Kutta method.
10. Skalozubov V., Pirkovskiy D., Spinov V., Kozlov I, & Komarov Y., Reliability of Steam-Operated Emergency Feed Pumps. In: Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Springer, Cham, 2019. p. 600-607. The dissertator owns the analysis of the obtained results of computational modeling.
11. V. I. Skalozubov, O. A. Chulkin, D. S. Pirkovskiy. Water hammer due to thermal and hydrodynamic instability: monograph /LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. The dissertator is responsible for the development of new theoretical principles of the method.
12. V. Skalozubov, D. Pirkovskiy, O. Chulkin. Water hammers in systems important for safety of nuclear power plants: monograph / LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. The dissertator is responsible for the development of new theoretical principles of the method.