

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Міністерство освіти і науки України

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

БУНДЄВ Денис Степанович

УДК 621.18 : 621.039

ДИСЕРТАЦІЯ

КВАЛІФІКАЦІЯ ТЕПЛОГІДРОДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ У ЗМІШУВАЛЬНИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ ТУРБІННОГО ВІДДІЛЕННЯ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

Спеціальність 143 – Атомна енергетика

Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д. С. Бундєв

Науковий керівник:

Скалозубов Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України з науки і техніки

ОДЕСА - 2026

АНОТАЦІЯ

Бундєв Д.С. Кваліфікація теплогідродинамічної стійкості у змішувальних теплообмінниках турбінного відділення ядерних енергоустановок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 143 Атомна енергетика. – Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна, 2026.

Багаторічний досвід експлуатації змішувальних теплообмінників турбінного відділення ядерних енергоустановок з реакторами типу ВВЕР визначив виникнення в певних режимах порушення нормальних умов експлуатації та підвищеного вібраційного стану систем турбінного відділення внаслідок гідродинамічних «ударів» на внутрішньокорпусні пристрої змішувальних теплообмінників.

Негативними наслідками гідродинамічних «ударів» можуть бути:

порушення умов нормальної роботи насосів, що забезпечують подачу води до парогенераторів;

пошкодження/руйнування внутрішньокорпусних пристроїв змішувальних теплообмінників;

підвищений вібраційний стан обладнання/трубопроводів турбінного відділення ядерних енергоустановок.

Однією з домінантних причин виникнення гідродинамічних ударів та їх негативних наслідків можуть бути умови теплогідродинамічної нестійкості в системах змішувальних теплообмінників.

Визначення умов виникнення теплогідродинамічної нестійкості у системах змішувальних теплообмінників у робочих і перехідних режимах може бути проведено шляхом розрахункової та експериментальної кваліфікації (обґрунтування) теплогідродинамічної стійкості, що і визначає актуальність, мету та завдання цієї роботи.

Мета даної роботи – розрахункова та експериментальна кваліфікація умов теплогідродинамічної стійкості в робочих і перехідних режимах систем

змішувальних теплообмінників турбінного відділення ядерної енергоустановки з ВВЕР.

Досягнення зазначеної мети забезпечується вирішенням наступних задач.

1. Аналіз відомих досліджень в області моделювання умов і наслідків різних видів імпульсної (періодичної), низькочастотної та високочастотної коливальної теплогідродинамічної нестійкості в системах теплотехнічного обладнання енергоустановок.

2. Розробка детерміністського методу кваліфікації умов гідродинамічних ударів у динамічних режимах змішувальних теплообмінників внаслідок імпульсної теплогідродинамічної нестійкості.

3. Експериментальна кваліфікація (верифікація) умов гідродинамічних ударів у змішувальних теплообмінниках внаслідок імпульсної теплогідродинамічної нестійкості.

4. Розробка детерміністського методу кваліфікації умов гідродинамічних ударів у рівноважних режимах змішувальних теплообмінників внаслідок коливальної теплогідродинамічної нестійкості.

5. Розробка практичних рекомендацій щодо забезпечення умов теплогідродинамічної стійкості змішувальних теплообмінників турбінного відділення ядерної енергоустановки з ВВЕР.

Наукова новизна роботи полягає у наступному.

1. Вперше встановлено, що для систем змішувальних теплообмінників у загальному випадку актуальні:

низькочастотна коливальна теплогідродинамічна нестійкість, викликана запізненням завершення тепломасообмінних процесів при конденсації та інерційністю напірно-витратних характеристик насосів;

імпульсна теплогідродинамічна нестійкість внаслідок переходу кінетичної енергії потоку у внутрішню енергію гідродинамічних ударів.

2. Розроблено новий детерміністський метод кваліфікації умов гідродинамічних ударів у змішувальних теплообмінниках внаслідок імпульсної теплогідродинамічної нестійкості.

3. Розроблено новий детерміністський метод кваліфікації умов гідродинамічних ударів у змішувальних теплообмінниках внаслідок коливальної теплогідродинамічної нестійкості.

Розроблені обґрунтовані практичні рішення щодо запобігання гідродинамічним ударам внаслідок імпульсної та коливальної теплогідродинамічної нестійкості у змішувальних теплообмінниках турбінного відділення ядерної енергоустановки з ВВЕР можуть бути використані експлуатуючою організацією НАЕК «Енергоатом» для підвищення ефективності та безпечної експлуатації АЕС України.

У **розділі 1** проведено аналіз відомих методів моделювання гідродинамічних ударів внаслідок різних видів теплогідродинамічної нестійкості в системах теплотехнічного обладнання енергоустановок: низькочастотна коливальна теплогідродинамічна нестійкість у парогенеруючих /конденсуючих системах; високочастотна теплогідродинамічна нестійкість у нерівноважних двофазних системах; імпульсна теплогідродинамічна нестійкість у трансзвуковому середовищі та в контурах природної циркуляції та ін.

Встановлено, що в даний час відсутні досить обґрунтовані методи моделювання гідродинамічних ударів у системах змішувальних теплообмінників.

Згідно з результатами проведеного аналізу встановлено мету та завдання роботи.

У **розділі 2** розроблено новий детерміністський метод моделювання гідродинамічних ударів внаслідок імпульсної теплогідродинамічної нестійкості в динамічних (нестационарних) режимах змішувальних теплообмінників регенеративної системи турбіни. Умови виникнення гідродинамічних ударів внаслідок імпульсної теплогідродинамічної

нестійкості – імпульсне зниження швидкості потоку з перетворенням кінетичної енергії потоку в енергію імпульсу тиску гідродинамічних ударів.

Визначальними умовами теплогідродинамічної нестійкості в об'ємі змішувального підігрівача є незавершеність тепломасообмінних процесів конденсації та інерційність реакції напірно-витратної характеристики конденсатного насоса.

Амплітуди і частоти коливань теплогідродинамічних параметрів у змішувальному підігрівачі істотно залежать від витрати пари, що гріє. Максимальні відносні амплітуди коливань витрати конденсату 25 %, тиску в об'ємі підігрівача – 50 %, рівня конденсату в підігрівачі – 99 %. Максимальна частота коливань 0,1 Гц.

Імпульси тиску при гідроударах також істотно залежать від витрат пари, що гріє. Максимальний відносний імпульс тиску пари 400 %.

Для запобігання коливанням теплогідродинамічних параметрів і гідродинамічним ударам в об'ємі змішувального підігрівача доцільною є модернізація системи шляхом установки:

регуляторів подачі витрати пари, що гріє, і рівня конденсату в об'ємі підігрівача;

демпфуючих пристроїв на трубопроводі подачі конденсату в підігрівач.

У **розділі 3** проведено експериментальну кваліфікацію (верифікацію) розробленого методу моделювання теплогідродинамічної нестійкості та гідродинамічних ударів на експериментальних установках «Гідроудар» і «Насос». Конструкційно-технічні параметри експериментальних установок відповідають критеріям теплогідродинамічної подібності натурної системи.

На експериментальній установці «Гідроудар» умови гідродинамічного удару на корпус гідроємності «штучно» створювалися шляхом відкриття клапана-затвора при тисках в гідроємності 0,2, 0,45, 0,6 і 0,8 МПа.

На експериментальній установці «Насос» амплітуди реєстрованих коливань тиску в контурі створювалися шляхом зміни витрати регулюючим

клапаном. Умови гідродинамічних ударів «штучно» моделювалися різким закриттям регулюючого клапана.

Максимальні відносні амплітуди імпульсу тиску при гідродинамічних ударах на експериментальній установці «Гідроудар» не перевищували 350 %. Максимальні відносні амплітуди імпульсу тиску при гідродинамічних ударах на експериментальній установці «Насос» не перевищували 950 %. Консервативні розбіжності розрахункових і експериментальних даних визначаються прийнятими в розрахункових моделях припущеннями про ізотермічність процесу гідроудару та відсутність необоротних теплогідродинамічних втрат.

Максимальні відносні амплітуди коливань тиску в замкнутому контурі експериментальної установки «Насос» при варіюванні витрати не перевищували 50 %.

У **розділі 4** розроблено детерміністський метод кваліфікації теплогідрравлічної стійкості в рівноважному стані змішуючих теплообмінників.

Розроблений метод засновано на аналізі впливу незалежних флуктуаційних відхилень тиску та швидкості потоку на умови теплогідродинамічної нестійкості, що дозволило визначити розрахункову мережу параметрів теплогідродинамічної нестійкості.

Згідно зі встановленими результатами розрахункової кваліфікації теплогідродинамічної стійкості розроблено практичні рекомендації щодо запобігання умовам і наслідкам теплогідродинамічної нестійкості та гідродинамічних ударів.

Ключові слова: гідродинаміка, тепло масообмін, теплотехнічне обладнання, надійність, ядерна енергоустановка.

ABSTRACT

Bundiev D.S. Qualification of thermal hydrodynamic stability in mixing heat exchangers of the turbine house of nuclear power plants. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree by specialty 143 Nuclear Power. – Odessa Polytechnic National University, Odessa, Ukraine, 2026.

Many years of experience in operating mixing heat exchangers of the turbine house of nuclear power plants with VVERs have determined the occurrence of violation of normal operating conditions and increased vibration of turbine house systems due to "water hammers" on the internals of mixing heat exchangers in certain modes.

The negative consequences of "water hammers" can be:

violation of the normal operating conditions of pumps that provide water supply to steam generators;

damage/destruction of internals of mixing heat exchangers;

increased vibration of equipment/pipelines of the turbine house of nuclear power plants.

One of the dominant causes of "water hammers" and their negative consequences can be conditions of thermal hydrodynamic instability in the mixing heat exchanger systems.

Determination of the conditions for the occurrence of thermal hydrodynamic instability in mixing heat exchanger systems in operating and transient modes can be realised with calculation and experimental qualification (substantiation) of thermal hydrodynamic stability that determines the relevance, purpose and tasks of this work.

The purpose of this work is the calculation and experimental qualification of the conditions for thermal hydrodynamic stability of mixing heat exchanger systems of the turbine house of a nuclear power plant with VVER in operating and transient modes.

The achievement of this purpose is ensured by solving the following tasks.

1. Analysis of known research in modelling the conditions and consequences of various types of pulsed (periodic), low-frequency and high-frequency oscillatory thermal hydrodynamic instability in systems of thermal equipment of power plants.

2. Development of a deterministic method for qualifying the conditions of "water hammers" in dynamic modes of mixing heat exchangers due to pulsed thermal hydrodynamic instability.

3. Experimental qualification (verification) of the conditions of "water hammers" in mixing heat exchangers due to pulsed thermal hydrodynamic instability.

4. Development of a deterministic method for qualifying the conditions of "water hammers" in equilibrium modes of mixing heat exchangers due to oscillatory thermal hydrodynamic instability.

5. Development of practical recommendations for ensuring the conditions of thermal hydrodynamic stability of mixing heat exchangers of the turbine house of a nuclear power plant with VVER.

The scientific novelty of the work is in the following.

1. It was found for the first time that for mixing heat exchanger systems in the general case the following are relevant:

low-frequency oscillatory thermal hydrodynamic instability caused by the delay in the completion of heat and mass exchange processes during condensation and the inertia of the pressure-flow characteristics of pumps;

pulsed thermal hydrodynamic instability due to the transition of the kinetic energy of the flow into the internal energy of "water hammers".

2. A new deterministic method for qualifying the conditions of "water hammers" in mixing heat exchangers due to pulsed thermal hydrodynamic instability has been developed.

3. A new deterministic method for qualifying the conditions of "water hammers" in mixing heat exchangers due to oscillatory thermal hydrodynamic instability has been developed.

Reasoned practical solutions have been developed to prevent "water hammers" due to pulsed and oscillatory thermal hydrodynamic instability in mixing heat exchangers of the turbine house of a nuclear power plant with VVER that can be used by the operating organization NNEGC Energoatom to increase the efficiency and safe operation of Ukrainian nuclear power plants.

The First Chapter analyses known methods for modelling "water hammers" due to various types of thermal hydrodynamic instability in systems of thermal equipment of power plants: low-frequency oscillatory thermal hydrodynamic instability in steam-generating/condensing systems; high-frequency thermal hydrodynamic instability in non-equilibrium two-phase systems; pulsed thermal hydrodynamic instability in a transonic environment and in natural circulation circuits, etc.

It is found that at present there are no sufficiently substantiated methods for modelling "water hammers" in mixing heat exchanger systems.

According to the results of the analysis, the purpose and tasks of the work are established.

The Second Chapter develops a new deterministic method for modelling "water hammers" due to pulsed thermal and hydrodynamic instability in dynamic (non-stationary) modes of mixing heat exchangers of a regenerative turbine system. The conditions for the occurrence of "water hammers" due to pulsed thermal and hydrodynamic instability are a pulsed decrease in the flow velocity with the conversion of the kinetic energy of the flow into the energy of the pressure pulse of "water hammers".

The determining conditions for thermal hydrodynamic instability in the volume of the mixing heater are the incompleteness of the heat and mass transfer processes of condensation and the inertia of the reaction of the pressure-flow characteristic of the condensate pump.

The amplitudes and frequencies of oscillations of thermal hydrodynamic parameters in the mixing heater significantly depend on the flow rate of the heating steam. The maximum relative amplitudes of condensate flow rate fluctuations are

25%, pressure in the heater volume is 50%, and condensate level in the heater is 99%. The maximum oscillation frequency is 0.1 Hz.

Pressure pulses during water hammer also significantly depend on the heating steam flow rate. The maximum relative steam pressure pulse is 400%.

To prevent fluctuations in thermal hydrodynamic parameters and water hammers in the volume of the mixing heater, it is advisable to modernize the system with installing:

regulators of the heating steam flow rate and the condensate level in the heater volume;

damping devices on the condensate supply pipeline to the heater.

The Third Chapter carries out the experimental qualification (verification) of the developed method for modelling thermal hydrodynamic instability and "water hammers" on the experimental installations "Water hammer" and "Pump". The design and technical parameters of the experimental installations meet the criteria for thermal hydrodynamic similarity of the full-scale system.

On the experimental installation "Water hammer", the conditions for water hammers on the body of the hydraulic tank were "artificially" created by opening the valve-gate at pressures in the hydraulic tank of 0.2, 0.45, 0.6 and 0.8 MPa.

On the experimental installation "Pump", the amplitudes of the registered pressure fluctuations in the circuit were created by changing the flow rate with a control valve. The conditions for water hammers were "artificially" simulated by abruptly closing the control valve.

The maximum relative amplitudes of the pressure pulse during water hammers on the experimental installation "Water hammer" did not exceed 350%. The maximum relative amplitudes of the pressure pulse during water hammers on the experimental installation "Pump" did not exceed 950%. Conservative discrepancies between the calculated and experimental data are determined by the assumptions made in the calculation models about the isothermality of the water hammer process and the absence of irreversible thermal hydrodynamic losses.

The maximum relative amplitudes of pressure fluctuations in the closed circuit of the experimental installation "Pump" when varying the flow rate did not exceed 50%.

The Fourth Chapter develops a deterministic method for qualifying the thermal hydraulic stability in the equilibrium state of mixing heat exchangers.

The developed method is based on the analysis of the influence of independent fluctuation deviations of pressure and flow velocity on the conditions of thermal hydrodynamic instability that made it possible to determine the calculation network of parameters of thermal hydrodynamic instability.

According to the found results of the calculation qualification of thermal hydrodynamic stability, practical recommendations have been developed for preventing the conditions and consequences of thermal hydrodynamic instability and water hammers.

Keywords: hydrodynamics, heat and mass transfer, heat engineering equipment, reliability, nuclear power plant.