

V. I. SKALOZUBOV, V. M. SPINOV, D. V. SPINOV, D. S. PIRKOVSKIY, T. V. GABLAYA

CONDITIONS FOR PREVENTION OF WATER HAMMERS AT START-UP OF EMERGENCY FEED PUMPS WITH A STEAM DRIVER OF NUCLEAR POWER PLANTS

A promising approach to accident management in nuclear power plants with a complete loss of long-term power supply is an emergency feed pump with a steam driver from a steam generator. The main advantages of this approach in relation to the known systems of passive heat removal with natural circulation are the fundamental possibility of fully compensating for the failure of design safety systems with electric pumps, as well as the absence of the need to remove the safety system elements to a greater height beyond the containment / container. However, the use of steam driven emergency pumps requires a deep study of their reliability. One such issue is the qualification of reliability when starting an emergency pump with a steam driver. An original method for modeling the conditions for the occurrence of a water hammer when starting a steam-driven pump is proposed. The conditions for the prevention of water hammer due to the inertia of the pressure-flow characteristics of emergency feed pumps with a steam driver from the steam generator are determined. The results obtained can be used in the design of emergency feed pumps with a steam driver from a steam generator subject to additional experimental qualifications.

Key words: emergency feed pump with steam driver; water hammer; nuclear power plant

В. І. СКАЛОЗУБОВ, В. М. СПІНОВ, Д. В. СПІНОВ, Д. С. ПІРКОВСЬКИЙ, Т. В. ГАБЛАЯ

УМОВИ ЗАПОБІГАННЯ ГІДРОУДАРАМ ПРИ ПУСКУ АВАРІЙНИХ ПОЖИВНИХ НАСОСІВ З ПАРОПРИВОДОМ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

Вихідною подією важких аварій і руйнівних вибухів на АЕС Fukushima-Daiichi в 2011 році було повна втрата тривалого електропостачання внаслідок спільного впливу позапроектних цунамі і землетрусу. Уроки Фукусімської аварії визначили необхідність подальшого розвитку систем безпеки ядерних енергоустановок, які не потребують електроживлення. Перспективним підходом управління аваріями з повною втратою тривалого електропостачання є розробка аварійних живильних насосів з пароприводом від парогенератора. Основні переваги такого підходу щодо відомих систем пасивного відведення тепла, заснованих на принципі природної циркуляції, полягають в наступному: існує принципова можливість повної компенсації відмови проектних аварійних електронасосів для виконання функцій безпеки щодо відведення тепла від реактора і підтримки необхідного рівня в парогенераторі; відсутня необхідність розташування елементів систем безпеки на великій висоті за межами гермооболонки реактора. Перспективним підходом управління аваріями на ядерних енергоустановках з повною втратою тривалого електропостачання є аварійний живильний насос з пароприводом від парогенератора. Основні переваги такого підходу по відношенню до відомих систем пасивного відведення тепла з природною циркуляцією – принципова можливість повної компенсації відмови проектних систем безпеки з електронасосами, а також відсутність необхідності виведення елементів систем безпеки на велику висоту за межі гермооболонки/контейнера. Однак, застосування аварійних насосів з пароприводом вимагає глибокого вивчення їх надійності. Одним з таких питань є кваліфікація надійності при пуску аварійного насоса з пароприводом. Запропоновано оригінальний метод моделювання умов виникнення гідроудару при пуску насоса з пароприводом. Визначено умови запобігання гідроударів і амплітуд тиску внаслідок інерційності напірної характеристики аварійних живильних насосів з пароприводом від парогенератора ядерної енергоустановки. Напір тиску в трубопроводній системі аварійного живильного насоса з пароприводом залежить від тиску в парогенераторі. Умови виникнення гідроударів відповідають перевищенню напору тиску що розвивається при пуску аварійного живильного насоса з пароприводом необхідного напору при сталому (робочому) режимі. Амплітуда тиску гідроударів визначається умовами переходу кінетичної енергії гальмування потоку в енергію імпульсу гідроудару. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні аварійних живильних насосів з пароприводом від парогенератора за умови додаткової експериментальної кваліфікації.

Ключові слова: аварійний живильний насос з пароприводом; гідроудари; ядерна енергоустановка

В. В. СКАЛОЗУБОВ, В. М. СПІНОВ, Д. В. СПІНОВ, Д. С. ПІРКОВСКИЙ, Т. В. ГАБЛАЯ

УСЛОВИЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГИДРОУДАРОВ ПРИ ПУСКЕ АВАРИЙНЫХ ПИТАЮЩИХ НАСОСОВ С ПАРОПРИВОДОМ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Перспективным подходом к управлению авариями на атомных электростанциях с полной потерей долгосрочного энергоснабжения является аварийный питающий насос с паровым приводом от парогенератора. Основными преимуществами этого подхода по отношению к известным системам пассивного отвода тепла с естественной циркуляцией являются принципиальная возможность полной компенсации отказа конструкции систем безопасности с електронасосами, а также отсутствие необходимости удаления системы безопасности элементы на большую высоту за пределы защитной оболочки/контейнера. Однако использование паровых аварийных насосов требует глубокого изучения их надежности. Одним из вопросов является квалификация надежности при запуске аварийного насоса с паровым приводом. Предложен оригинальный метод моделирования условий возникновения гидравлического удара при запуске парового насоса. Условия для предотвращения гидравлического удара за счет инерции характеристик давления потока аварийного питательного насоса с водителем пара из парогенератора определяются. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании аварийных подающих насосов с паровым приводом от парогенератора при условии дополнительной экспериментальной квалификации.

Ключевые слова: аварийный питающий насос с пароприводом; гидроудары; ядерная энергоустановка.

Relevance.

The initial event of severe accidents and destructive explosions at Fukushima-Daiichi NPPs in 2011 was the complete loss of long-term power supply (CLLPS) due to the combined effects of beyond-design tsunamis and an earthquake [1, 2]. The lessons of the Fukushima accident determined the need for further development of the safety systems of nuclear power plants (NPPs) that do not require electrical power.

A promising approach to managing accidents with CLLPS is the development of emergency feed pumps with a steam driver from a steam generator (EFPSDSG) [3]. A schematic diagram of the connection EFPSDSG is shown in Fig. 1.

Steam from the steam generator enters the steam driver of the central pump, which feeds the feed water

© Skalozubov V.I., Spinov V.M., Spinov D.V., Pirkovskiy D.S., Gablaya T.V., 2019

from the hydraulic containers of the design emergency electric pumps directly to the steam generator. Exhaust steam enters the deaerator. The main advantages of this approach with respect to the known systems of passive heat removal based on the principle of natural circulation are as follows:

- The principal possibility of fully compensating for the failure of the design of emergency electric pumps to fulfill the safety functions of removing heat from the reactor and maintaining the required level in the steam generator.
- No need to locate security system elements at high altitude outside the containment of the reactor.

However, the design and implementation of EFPSDSG requires a deep study of their performance and reliability. One of these questions is the analysis of the conditions for the occurrence of water hammers (WH) during the launch of the EFPSDSG.

The occurrence of WH is accompanied by a pulsed high-amplitude hydrodynamic effect and can significantly affect the performance and reliability of the safety systems of nuclear power plants. A lot of research has been devoted to the study of state-owned facilities in heat engineering equipment and pipelines (for example, [4-10] [1, 2] [1, 2] and others). However, the issues of causes and effects of WH caused by the operation of pumping equipment have not been studied enough.

Using the example of reciprocating electric pumps, the authors of [11] showed that the inertia of the pressure-flow characteristics of pumps, which leads to aperiodic or oscillatory hydrodynamic instability in the system, can be a possible cause of the hydraulic pump.

The purpose of the proposed work is to analyze the conditions for the occurrence of the WH when the EFPSDSG is launched due to the inertia of its pressure-flow characteristics.

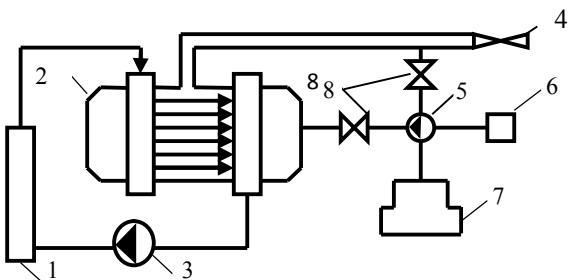


Fig.1. Connection diagram of the emergency feed pump with steam driver: 1 – reactor; 2 – steam generator; 3 – the main circulation pump; 4 – quick-closing check valve of the turbine; 5 – feed pump with steam driver; 6 – hydraulic capacity; 7 – deaerator; 8 – valve

Basic provisions of the method of modeling a water hammer when starting an emergency feed pump with a steam driver from a steam generator (EFPSDSG).

At the initial moment of the start-up of the EFPSDSG ($t = 0$), the feed water mass flow rate is: $G = 0$ and the pump pressure is maximum: $\Delta P = \Delta P_m$ (Fig. 2).

In the absence of the influence of the inertia of the pressure-flow characteristics of the pump (PFC) on the change of parameters for some time (t_s), the EFPSDSG system will turn into a stable steady state with flow G_s and a corresponding pressure of the pump $\Delta P_s(G_s)$. By inertia of PFC is meant the delay in the response time of the pump head pressure to the change in the flow rate in the system: with an increase in flow rate (G), the corresponding changes in the pump head pressure (ΔP) do not occur instantaneously, but with a certain delay time Δt (Fig. 2).

The parameter Δt is determined by the design and technical characteristics of the system EFPSDSG and the pressure in the steam generator (P_v). In general, the parameter Δt can be determined on the basis of operational tests and / or on experimental installations that meet the criteria for hydrodynamic similarity [12].

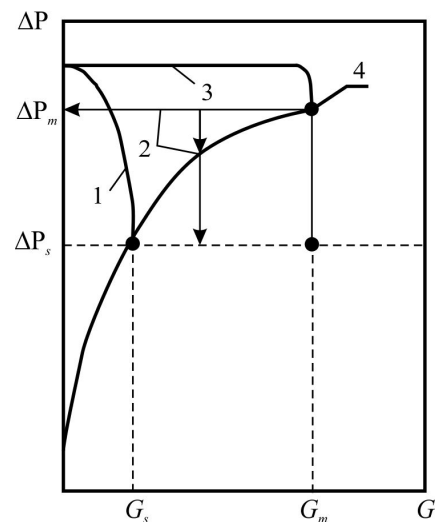


Fig. 2. Formation of the hydraulic impact conditions at the start-up of the EFPSDSG: $\Delta P, \Delta P_m, \Delta P_s$ – current, maximum, stable pressure of the pump pressure; G, G_m, G_s – current, maximum, stable mass flow rate of feed water; 1 – design PFC pump; 2, 3 – changes in the flow rate and pressure head of the pump, respectively, during the inertial delay of the PFC reaction; 4 – water hammer conditions.

If $\Delta t > t_s$, then the flow after reaching a stable value G_s continues to increase under the influence of the maximum pressure ΔP_m (Fig. 2). The system EFPSDSG goes into an unstable hydrodynamic state. When the maximum possible flow rate is reached (G_m), the system tends to move to a steady state (Fig. 2). The value G_m is determined by the conditions for achieving the loss of pressure on the hydraulic resistance (proportional G^2) and the counter-pressure in the steam generator to the pressure head ΔP_m . As a result, the feed water flow is braked. The kinetic energy of the flow deceleration is

transformed into the energy of the pressure impulse of the water hammer (WH).

The main conservative assumptions in modeling the conditions for occurrence of WH in the EFPSDSG system are as follows:

1. It is considered that the time of the inertial lag of PFC is longer than the time to achieve a stable state:

$$\Delta t > t_s \quad (1)$$

2. The characteristic time of pressure change P_V , determined by emergency processes directly in the steam generator, is much less Δt :

$$\frac{\Delta P_V}{dt} \Delta t \ll P_{Vo}, \quad (2)$$

where P_{Vo} - the initial pressure in the volume of the steam generator.

3. Processes rely isothermal.

4. The feed water in the pipeline of the EFPSDSG system is considered as a concentrated hydrodynamic system. The effects of the distribution of hydrodynamic parameters is neglected.

5. When the flow is braked, the kinetic energy is transferred to the energy of the impulse of pressure PG. When estimating the maximum amplitude of the pressure of the PG, it is conservatively assumed that the flow is completely braked.

Taking into account the accepted assumptions of the equation of motion and conservation of energy of feed water during the start-up of EFPSDSG

$$\frac{L}{\Pi} \cdot \frac{dG}{dt} = \Delta P - \Delta P_{VG} - \frac{\xi}{\rho \Pi^2} \cdot G^2 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{G^2}{2\rho \Pi^2} + i \right) = 0 \quad (4)$$

$$G(t=0) = 0; i(t=0) = i_0, \quad (5)$$

where L , Π - the length and area of the bore of the pipeline system EFPSDSG; $\Delta P_{VG} = P_V - P_G$ - pressure drops in the steam generator and hydraulic tanks of feed water; ξ - coefficient of total hydraulic resistance of the system; ρ - density of feed water; i - specific (per unit mass) feed water enthalpy.

The maximum pressure amplitude at a water hammer follows from equation (4):

$$\delta P_A = \int_0^{t_0} \frac{dt}{d\tau} \cdot d\tau = \int_0^{t_0} \frac{dP}{di} \cdot \frac{di}{d\tau} \cdot d\tau = - \int_0^{t_0} \frac{dP}{di} \cdot \frac{G}{\rho \Pi^2} \cdot \frac{dG}{d\tau} \cdot d\tau, \quad (6)$$

where P is the pressure at the pump inlet; t_0 - time of full flow deceleration.

The maximum possible flow G_m follows from the solution of equation (3) under conditions (5) and $\Delta P = \Delta P_m$ over the time interval $t \in \{0, \Delta t\}$:

$$G_m = \sqrt{\frac{a(\Delta P_m)}{b}} \cdot \frac{\exp\left[2\sqrt{a(\Delta P_m) \cdot b} \cdot \Delta t\right] - 1}{\exp\left[2\sqrt{a(\Delta P_m) \cdot b} \cdot \Delta t\right] + 1}, \quad (7)$$

where $a = \Pi \cdot (\Delta P - \Delta P_{VG}) / L$; $b = \xi / (\rho \Pi \cdot L)$ (8)

In the general case, the time of complete deceleration of the flow with WH, taking into account (3) and $\Delta P = \Delta P_s$, follows from the solution of the equation:

$$G_m = a(\Delta P_s) \cdot t_0 - a(\Delta P_s) \cdot \int_0^{t_0} \left\{ \frac{\exp\left[2\sqrt{a(\Delta P_s) \cdot b} \cdot \tau\right] - 1}{\exp\left[2\sqrt{a(\Delta P_s) \cdot b} \cdot \tau\right] + 1} \right\} d\tau \quad (9)$$

Approximate solution (9):

$$t_0 \approx G_m / a(\Delta P_s) \quad (10)$$

Then, the maximum pressure amplitude WH (6) at full flow braking:

$$\delta P_A = \frac{1}{\rho \Pi^2} \cdot \frac{dP}{di} \cdot \sqrt{\frac{a(\Delta P_s)}{b}} \cdot \int_0^{t_0} G(\Delta P_s, \tau) \cdot [b \cdot G^2(\Delta P_s, \tau) - a(\Delta P_s)] \cdot d\tau \quad (11)$$

Analysis of the above results showed that the conditions for the absence of WH with the maximum pressure amplitude in the EFPSDSG system are:

$$\frac{\Delta t}{t_s} < 1 \text{ и } \frac{\Delta P_m}{\Delta P_s} < 1,3 \quad (12)$$

The obtained conditions (12) are proposed to be taken into account when designing EFPSDSG nuclear power plants.

Conclusions.

1. A promising approach to managing accidents on nuclear power plants with complete loss of long-term power supply is an emergency feed pump with a steam driver from a steam generator. The main advantages of this approach in relation to the known systems of passive heat removal with natural circulation are the fundamental possibility of fully compensating for the failure of design safety systems with electric pumps, as well as the absence of the need to remove the safety system elements to a greater height beyond the containment / container. However, the use of steam driven emergency pumps requires a deep study of their reliability. One such issue is the qualification of reliability when starting an emergency pump with a steam driver.

2. An original method for modeling the conditions for the occurrence of a water hammer when starting a steam-driven pump is proposed. The conditions for the prevention of water hammer due to the inertia of the pressure-flow characteristics of emergency feed pumps with a steam driver from the steam generator are determined.

3. The obtained results can be used in the design of emergency feed pumps with a steam driver from a steam generator, subject to additional experimental qualifications.

References

1. IAEA. International Fact Finding Expert Mission Of The Fukushima Daiichi NPP Accident Following The Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report. – IAEA. 2011, 160 p.
2. Скалозубов В.И., Оборский Г.А., Козлов И.Л., Ващенко В.Н. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме // Монография. – Одесса: Астропринт. 2013, – 244 с.
3. Королев А.В., Деревянко О.В. Композиционная конструкция турбоприводов насосного агрегата для резервной подпитки парогенераторов АЭС // Праці Одеського політехнічного університету. - № 1 (43). 2014, с. 93–97
4. Brennen C.E. Hydrodynamics of pumps. Cambridge University Press, 2011.
5. Jelali M., Kroll A. Hydraulic servo-systems: modelling, identification and control. Springer Science & Business Media, 2012.
6. Paszota Z. The operating field of a hydrostatic drive system parameters of the energy efficiency investigations of pumps and hydraulic motors. Polish Maritime Research, 2009, Vol. 16, № 4, pp. 16-21.
7. Johansson A., Ovander J., Palmberg J.O. Experimental verification of cross-angle for noise reduction in hydraulic piston pumps/Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2007, Vol. 221, № 3, pp. 321–330.
8. Zettel A. M. et. al. Method and apparatus to monitor operation of an auxiliary hydraulic pump in a transmission. U.S. Patent, no. 7544151, 2009.
9. Tianyi Z., Jili Z., Liangdong M. On-line optimization control method based on extreme value analysis for parallel variable-frequency hydraulic pumps in central air-conditioning systems. Building and Environment. 2012, Vol. 47, pp. 330–338.
10. Derakhshan S., Nourbakhsh A. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse

operation. Experimental Thermal and Fluid Science. 2008, Vol. 32, № 8, pp. 1620-1627.

11. Mazurenko A.S., Skalozubov V.I., Kozlov I.L., Pirkovskiy D.S. Determining The Conditions For The Hydraulic Impacts Emergence At Hydraulic Systems. // Problemele Energetichi Regionale. Termoenergetica. - № 2 (34). 2017.
12. Мазуренко А.С., Скалозубов В.И., Пирковский Д.С., Чулкин О.А. Анализ применимости результатов экспериментальных исследований гидродинамики к насосным системам тепловых и ядерных энергоустановок // Ядерная энергетика та довілля. - № 1 (19). 2017, – с. 49–52.

References (transliterated)

1. IAEA. Fukushima Daiichi NPP: International Facts Finding Expert Review: Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report. - IAEA. 2011, 160 p.
2. Skalozubov V.I., Oborsky G.A., Kozlov I.L., Vashchenko V.N. The complex of methods for the reassessment of the safety of nuclear energy taking into account the lessons of environmental disasters in Chernobyl and Fukushima // Monograph. - Odessa: Astroprint. 2013, 244 p.
3. Korolev A.V., Derevyanko O.V. Composite design of turbodrivers pumping unit for backup powering of steam generators of nuclear power plants // Pratsi Odessa National Polytechnic University. - № 1 (43). 2014, pp. 93–97
4. Brennen C.E. Hydrodynamics of pumps. Cambridge University Press, 2011.
5. Jelali M., Kroll A. Hydraulic servo systems: modeling, identification and control. Springer Science & Business Media, 2012.
6. Paszota Z. Polish Maritime Research, 2009, Vol. 16, No. 4, pp. 16–21.
7. Johansson A., Ovander J., Palmberg J.O. Investigation of the Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 221, No. 3, pp. 321–330.
8. Zettel A.M. Method of hydraulic pump in a transmission. U.S. Patent, no. 7544151, 2009.
9. Tianyi Z., Jili Z., Liangdong M. On-line air-conditioning systems. Building and Environment. 2012 Vol. 47, pp. 330–338.
10. Derakhshan S., Nourbakhsh A. Theoretical, numerical pumps for reverse operation. Experimental Thermal and Fluid Science. 2008 Vol. 32, No. 8, pp. 1620–1627.
11. Mazurenko A.S., Skalozubov V.I., Kozlov I.L., Pirkovskiy D.S. Determining The Conditions For The Emergency At Hydraulic Systems. // Problemele Energetichi Regionale. Termoenergetica. - № 2 (34). 2017.
12. Mazurenko A.S., Skalozubov V.I., Pirkovskiy D.S., Chulkin O.A. Analysis of the applicability of the results of experimental studies of hydrodynamics to pump systems of thermal and nuclear power plants // Nuclear power engineering and technology. No. 1 (19). 2017, pp. 49–52.

Received 17.07.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Скалозубов Володимир Іванович (Скалозубов Владимир Иванович, Skalozubov Volodymyr Ivanovich) – доктор технічних наук, професор, Науковий керівник, Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2361-223X>, e-mail: skalozubov@opu.ua

Спінов Владислав Михайлович (Спинов Владислав Михайлович, Spinov Vladislav Mykhailovich) – кандидат технічних наук, Науковий співробітник, Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, м. Одеса, Україна; ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8597-4153>, e-mail: sssvm@ukr.net

Спінов Дмитро Владиславович (Спинов Дмитрий Владиславович, Spinov Dmitriy Vladislavovich) – молодший науковий співробітник, Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3184-5674>, e-mail: sssvm@ukr.net

Пірко́вський Денис Сергійович (Пирковский Денис Сергеевич, Pirkovskiy Denis Sergeevich), аспірант, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6638-9499>, e-mail: boume92@ukr.net

Габляя Таїсія Володимирівна (Габляя Таисия Владимировна, Gablaya Taisiya Vladimirovna) – завідувач лабораторією центра безпеки атомної енергетики, Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3184-5674>, e-mail: gablaiya@i.ua