УДК 621.431

ПРОЕКТНИЙ АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

В. В. Кузнецов, А. П. Шевцов
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Анотація: *Ресурс роботи теплопередавальних елементів суднових енергетичних установок визначає надійність їх роботи на протязі заданого проміжку часу. Представлена оцінка ресурсу елементів установки у вигляді імовірності безвідмовної роботи. Показано вплив коефіцієнтів варіації на загальне значення імовірності, обґрунтовані можливості підвищення показника імовірності безвідмовної роботи до 4,1 % абс.*

Ключові слова: *енергетична установка, надійність, теплопередавальний елемент, ресурс, запас міцності.*

RELIABILITY DESIGN ANALYSIS OF THE HEAT-TRANSFER ELEMENTS OF MARINE POWER PLANTS

V. Kuznetsov, A. Shevtsov
Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Abstract: *Service life of heat-transfer elements of marine power plants determines the reliability of their operation during a given period of time. The evaluation of the plant elements resource through the probability of no-failure operation is presented. The influence of variation coefficients on the total probability value is shown, the possibility of increasing the probability of no-failure operation up to 4.1 % abs is substantiated.*

Keywords: *power plant, reliability, heat-transfer element, resource, assurance factor.*

Аналіз відмов та несправностей теплопередавальних елементів енергетичних установок, отриманих у процесі експлуатації, свідчить, що незважаючи на достатній запас міцності, що приймається при проектних розрахунках, відбуваються їх поломки й аварії. Пояснюється це тим, що існуючі методи розрахунку не враховують цілий ряд факторів, що спостерігаються під час експлуатації. Головними з них можна виділити: розсіювання граничних напружень і механічних властивостей конструкційних матеріалів і поступову їх зміну під час експлуатації під дією змінних теплових навантажень; велике розсіювання ресурсу деталі при дії змінних напружень; появу раптових навантажень від непередбачених причин, що викликають повторні пластичні деформації; мала початкова в’язкість матеріалу деталі і наступне її зменшення в процесі експлуатації до величини, що відповідає можливості крихкої руйнації [1].

Таким чином, ресурс елемента можна оцінити імовірністю безвідмовної роботи P, тобто імовірністю того, що міцність деталі буде перевищувати на протязі часу експлуатації величину напружень матеріалу, викликаних тепловими навантаженнями.

Метою представленої роботи є оцінка зміни ресурсу теплопередавальних елементів енергетичних установок при їх проектуванні або модернізації.

В загальному вигляді для елементів, що функціонують заданий час, навантаження або напруження матеріалу, що викликане тепловими навантаженнями, можуть бути представлені у вигляді імовірної величини – амплітуди діючих напружень $\sigma_а$ – розподіл яких відомий для всього інтервалу часу, що розглядається, та температур, за яких працює теплопередавальний елемент, а характеристика міцності деталі – допустимих напружень [σ], розподіл яких відомий для фіксованого моменту часу та розподілу температур. Тоді імовірність неруйнації в обмеженому інтервалі часу можна розрахувати як

$$P_{i,t} = P([\sigma] - \sigma_а \geq 0) \quad (1)$$

Розрахунок імовірності неруйнації $P_{i,t}$ для фіксованих моментів часу здійснюється на визначенні композиції законів розподілу характеристик теплового навантаження і міцності [1].

Якщо міцність деталі [σ] і навантаження незалежні і густина імовірності цих величин буде розподілена по нормальному закону, то густина імовірності різниці

$$\overline{M} = [\sigma] - \sigma_а \geq 0$$

за правилами композиції законів розподілу також буде розподілена за нормальним законом з параметрами $(\overline{M}, S_м^2)$, де $\overline{M}$ – середнє значення *M*, $S_м$ – середнє квадратичне відхилення величини *M*, що визначаються відповідно як

$$\overline{M} = [\sigma] - \overline{\sigma_а}; \quad S_м^2 = S_{[\sigma]}^2 + S_а^2 \quad (2)$$

Умовою міцності при імовірності неруйнації *P*, що характеризується квантилем u_p, буде вираз [2]

$$M_p = \overline{M} + u_p S_м = 0 \quad (3)$$

З рівняння (6) квантиль визначиться як

$$u_p = -\frac{\overline{M}}{S_м}.$$

Підставляючи замість $\overline{M}$ і $S_м$ їх значення з рівняння (2), отримано

$$u_p = \frac{[\sigma] - \overline{\sigma_а}}{\sqrt{S_{[\sigma]}^2 + S_а^2}}. \quad (4)$$

Для подальшого перетворення останнього рівняння введені наступні коефіцієнти:

– запасу міцності $n_{пр} = \dfrac{[\sigma]}{\sigma_а}$;

– варіації $\theta_{[\sigma]} = \dfrac{S_{[\sigma]}}{[\sigma]}$ та $\theta_{\text{а}} = \dfrac{S_{\text{а}}}{\sigma_{\text{а}}}$.

Тоді, з урахуванням зазначених коефіцієнтів, рівняння для розрахунків квантілю (4) можна представить у вигляді

$$u_p = \frac{1 - n_{\text{пр}}}{\sqrt{n_{\text{пр}}^2 \theta_{[\sigma]}^2 + \theta_{\text{а}}^2}}. \qquad (5)$$

Розрахувавши квантіль u_p, по таблицях [2, 3] знаходять імовірність P неруйнування теплопередавальних елементів.

Для оцінки зміни ресурсу теплопередавальних елементів енергетичних установок у вигляді імовірності безвідмовної роботи P прийняті вихідні дані, що відповідають показникам газотурбінних та дизельних енергетичних установок [4–16] щодо діапазонів змін коефіцієнтів варіації у рівняннях (5). Матеріал поверхонь теплопередачі Ст12К, коефіцієнти запасу міцності $n_{\text{пр}}$ та допустимі напруження для якого визначені за даними [17, 18].

Аналіз отриманих результатів показує, що більший вплив на імовірність безвідмовної роботи оказують коливання коефіцієнту $\theta_{[\sigma]}$, що призводить до підвищення імовірності безвідмовної роботи у межах 2,9…4,1 %. Вочевидь, це викликано постійно діючими тепловими навантаженнями в обраному інтервалі температур, а також прийнятому при проектних розрахунках значеннях коефіцієнту запасу міцності. Досягнення більших значень імовірності можливе за рахунок зниження температурного рівня, в якому працюють теплопередавальні елементи, що в свою чергу призведе до підвищення значень допустимих напружень [σ].

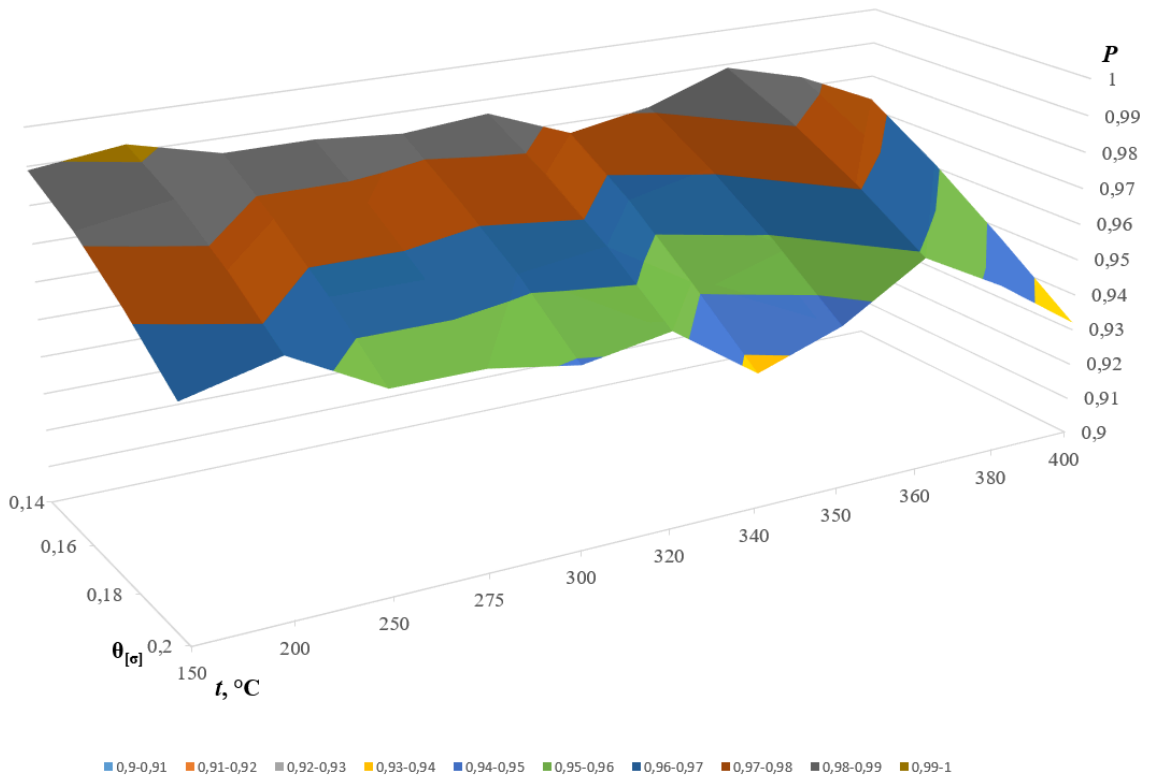

Рисунок 1 – Результати оцінки зміни імовірності безвідмовної робота за умови θ_a = const = 0,15

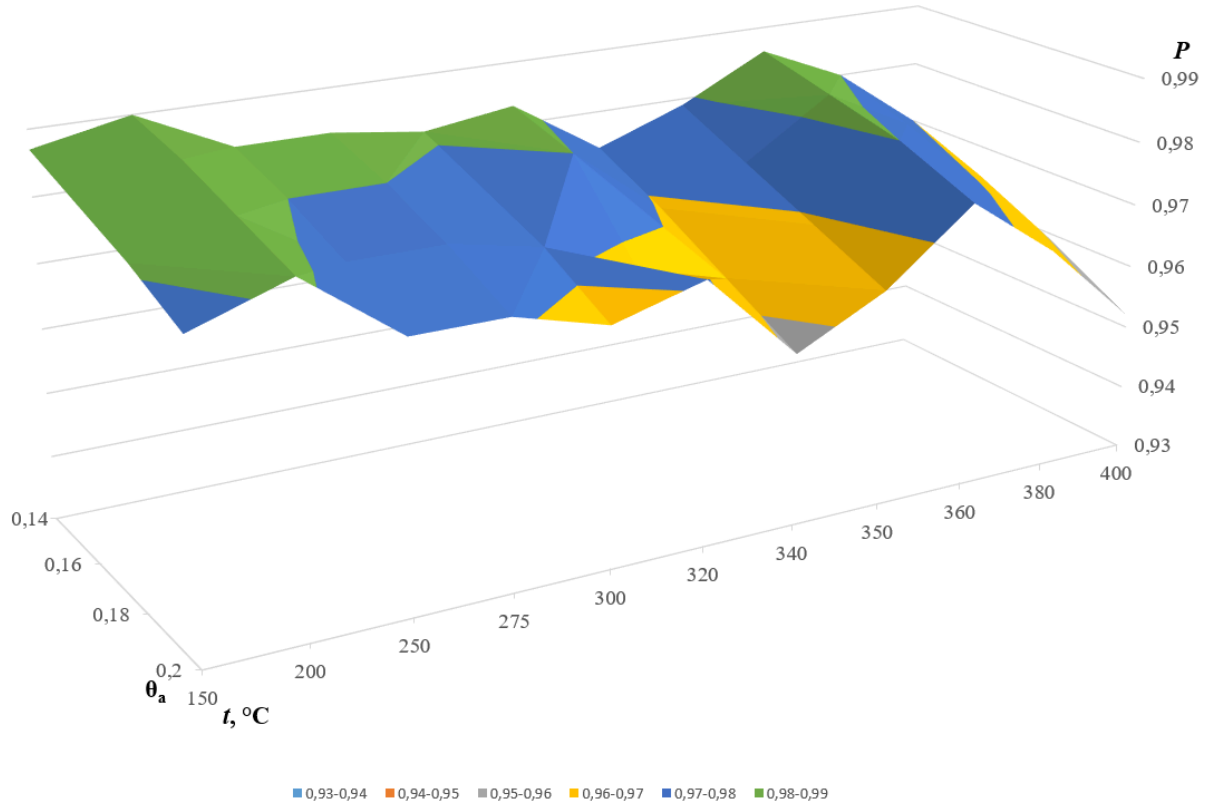

Рисунок 2 – Результати оцінки зміни імовірності безвідмовної робота за умови $\theta_{[\sigma]}$ = const = 0,15

Зміна амплітудних значень навантажень призводить до підвищення імовірності безвідмовної роботи у межах 1,0…1,8 % абс., що показує незначний вплив короткочасних теплових навантажень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Астахов С. В., Ватипко Б. А., Холяво Л. П. Оценка надежности судовых механизмов при проектировании и эксплуатации. Л.: Судостроение, 1979. 200 с.

2. Решетов Д. Н. Работоспособность и надежность деталей машин. М.: Высшая школа, 1974. 206 с.

3. Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надежности. М. Советское радио, 1968. 288 с.

4. Reliable gas turbines: веб-сайт. URL: https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines.html (дата звернення: 03.02.2022).

5. ДП НВКГ «Зоря»- «Машпроект»: веб-сайт. URL: https://zmturbines.com/ru/serial-production/engines/ (дата звернення: 03.02.2022).

6. MT30 Marine Gas Turbine: веб-сайт. URL: www.rolls-royce.com/products-and-services/defence/naval/gas-turbines/mt30-marine-gas-turbine.aspx (дата звернення: 03.02.2022).

7. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI 2018. URL: https://mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/waste-heat-recovery-system.pdf (дата звернення: 03.02.2022).

8. Marine engine programme. MAN Energy Solutions 2015-2020. URL: https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/marine-engine-programme (дата звернення: 03.02.2022).

9. Marine Diesel Engines and Generator Sets: веб-сайт. URL: https://www.cat.com/en_US/by-industry/marine.html (дата звернення: 03.02.2022).

10. Engines for commercial marine: веб-сайт. URL: https://www.mtu-solutions.com/au/en/applications/commercial-marine/commercial-marine-solutions.html (дата звернення: 03.02.2022).

11. Marine defense: naval engines: веб-сайт. URL: https://www.mtu-solutions.com/cn/en/applications/defense/marine-defense-solutions.html (дата звернення: 03.02.2022).

12. RTA and RT-flex low-speed engines: веб-сайт. URL: https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/rta-and-rt-flex-low-speed-engines (дата звернення: 03.02.2022).

13. Diesel engines: веб-сайт. URL: https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/diesel-engines (дата звернення: 03.02.2022).

14. Marine Engine: веб-сайт. URL: http://www.hyundai-engine.com/engine/engine02_01.asp (дата звернення: 03.02.2022).

15. Reliable Mitsubishi Marine Engines: веб-сайт. URL: https://engine-genset.mhi.com/marine-engines (дата звернення: 03.02.2022).

16. Анкудинова М. С., Ларин Е. А., Сандалова Л. А. Методы расчета и учета показателей надежности котла-утилизатора при выборе рациональных параметров схем отопительных ПГУ. Весник СГТУ. 2015. № 2 (79). С. 133–141.

17. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1988. Т. 5.: Проектный анализ надежности / Под ред. В. И. Патрушева и А. И. Рембезы. 316 с.

18. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. / Ред. Совет: В. С. Авдуевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1988. Т. 7.: Качество и надежность в производстве / Под ред. И. В. Апполонова. 280 с.

Кузнецов Валерій Валерійович *к.т.н., доцент кафедри «Технічна теплофізика і суднові паровиробні установки» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв. ORCID:http://orcid.org/0000-0002-3678-595X; valeriy.kuznetsov@nuos.edu.ua.*

Шевцов Анатолій Павлович *д.т.н., професор Навчально-наукового центру морської інфраструктури Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8692-6458; anatoliy.shevtsov@nuos.edu.ua.*