

## МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОПОМІЖНИХ КОТЛІВ

О. М. Філіпчук\*, А. П. Шевцов\*\*

\*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, \*\*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

*Анотація:* Представлено результати аналітичних і експериментальних досліджень можливості підвищення ККД допоміжних котлів при спалюванні сірчистих мазутів і водомазутних емульсій на їх основі з водомісткістю до 30 % і солевмістом до 490 мг/дм<sup>3</sup>. Різде зниження інтенсивності низькотемпературної корозії дозволяє застосувати конденсаційні конвективні поверхні нагрівання з температурою стінки металу до 70 °С і підвищити ККД котлів до 98 %.

*Ключові слова:* допоміжні котли, сірчистий мазут, водомазутна емульсія, сухі і конденсаційні конвективні поверхні нагрівання, витрата теплоти з відхідними газами, ККД котлів.

## POSSIBILITIES TO INCREASE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF AUXILIARY BOILERS

O. M. Filipchuk\*, A. P. Shevtsov\*\*

\*Kherson Educational-Scientific Institute, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, \*\*Admiral Makarov National University of Shipbuilding

*Abstract:* The results of analytical and experimental studies of the possibility of increasing the efficiency of auxiliary boilers in the combustion of sulfur fuel oil and water-oil emulsions based on them with water capacity up to 30 % and salt content up to 490 mg/dm<sup>3</sup> up to 70 °C and increase the efficiency of boilers to 98 %.

*Keywords:* auxiliary boilers, sulfur fuel oil, water-oil emulsion, dry and condensing convective heating surfaces, heat consumption with exhaust gases, boiler efficiency.

Допоміжні котельні установки сучасних дизельних транспортних суден обладнують простими за конструкцією та компактними (без хвостових поверхонь нагріву) паровими котлами з ККД на рівні 80...85 % при температурах відхідних газів 450...250 °С. Аналіз конструкцій допоміжних котлів танкерів свідчить, що в основному застосовуються котли з природною циркуляцією, коефіцієнт корисної дії яких знаходиться на рівні 80...85 %, так як вони мають також пароутворюючу поверхню, і навіть при установці невеликих економайзерів через низькотемпературну корозію вдається підвищити їх ККД до 88...90 %.

При спалюванні важких сірчистих мазутів виникають проблеми, що пов'язані з ростом високотемпературної й особливо низькотемпературної корозії, що приводить до зниження працездатності котлів і їх низьких ККД. У

котлах мінімальні значення температури стінки поверхні нагрівання  $t_{ст}$  вище 130 °С, а температура відхідних газів перебуває на рівні 160...180 °С, тому що внаслідок інтенсивної низькотемпературної сірчаноокислотної корозії (в області «кислотного піку») при температурі  $t_{ст} \sim 110$  °С швидкість корозії досягає 1,2 мм/рік, що стримує можливість подальшого зростання ККД.

Інтенсивність низькотемпературної корозії обумовлена конденсацією пари  $H_2SO_4$ . Практично конденсація починається при температурах поверхонь нагрівання близько 130...140 °С (практичне значення температури точки роси пари  $H_2SO_4$ ). Зниження температури стінки нижче точки роси супроводжується різким зростанням інтенсивності низькотемпературної корозії  $K$ , яка досягає максимального значення («піку НТК») при  $t_{ст} \approx 110$  °С (крива 1) (рис. 1). При більш низьких температурах стінки металу  $t_{ст}$  із вуглецевої сталі інтенсивність низькотемпературної корозії різко знижується, а потім знову різко зростає у зв'язку з початком конденсації пари  $H_2O$ , що призводить до зниження концентрації  $H_2SO_4$ . Основними факторами, що впливають на величину температури точки роси, є вміст сірки в мазуті і коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ . Такий вид залежності  $K = f(t_{ст})$  пояснюється нерівномірністю процесу масопереносу пари  $H_2SO_4$ , що обумовлений утворенням туману пари  $H_2SO_4$  при  $t_{ст} = 90...70$  °С, (внаслідок малих розмірів крапель туману не відбувається їх осадження на поверхнях труб) [1].

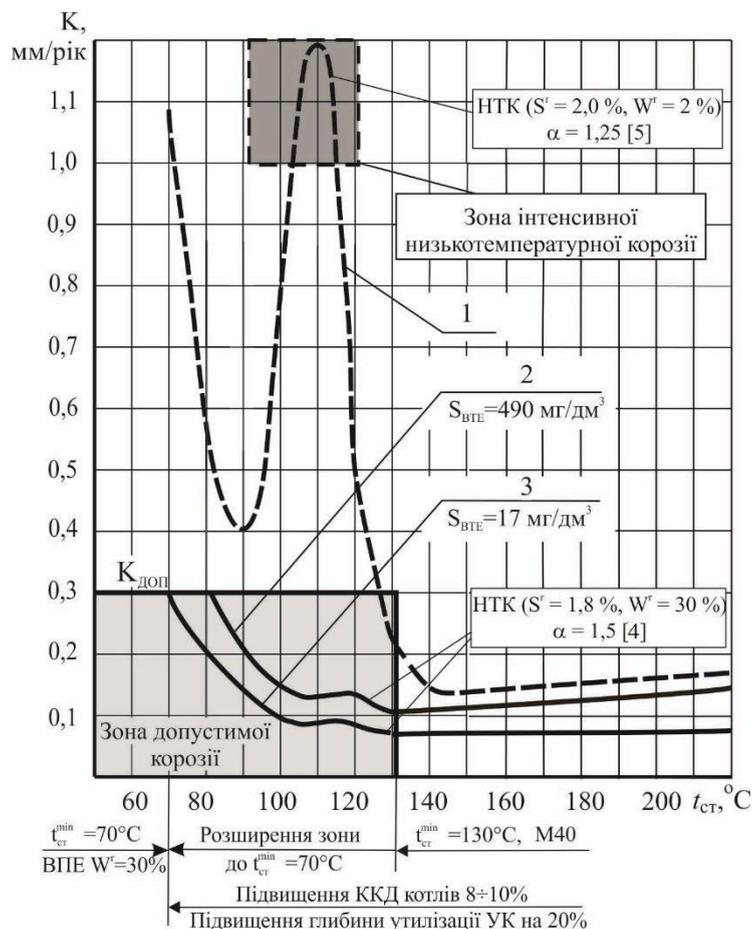


Рисунок 1 – Вплив інтенсивності низькотемпературної корозії на можливості

підвищення ККД котлів при спалюванні мазуту ( $S^r = 2,0 \%$ ,  $W^r = 2,0 \%$  при  $\alpha = 1,25$ ) водомазутної емульсії ( $S^r = 1,8 \%$ ,  $W^r = 30 \%$  при  $\alpha = 1,5$ ) з різним солевмістом  $S_{\text{ВМЕ}}$

Для запобігання низькотемпературної корозії застосовувалися різні присадки до палива, що дозволяють знизити температуру точки роси пари  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Однак досвід використання таких присадок показав їхню низьку ефективність, і в цей час у суднових котлах вони не застосовуються. У головних суднових котлах використовувалися топкові пристрої, що дозволяли спалювати паливо при низьких надлишках повітря –  $\alpha < 1,05$ . При цьому різко знижується вміст  $\text{SO}_3$  у газах, і отже, температура точки роси газів на номінальних навантаженнях може бути знижена до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Але в допоміжних котлах досягнення такого значення коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  неможливо в зв'язку з перемінними та частковими режимами роботи. Тому всі котли проектуються з мінімальною температурою стінки вище  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ . При цьому необхідно зазначити, що відсутні дані з використання поверхонь нагрівання з температурою стінки нижче  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ , тобто з використанням конденсаційних поверхонь нагрівання при спалюванні високосірчистих мазутів ( $S^r > 0,5$ ). Рекомендується використання конденсаційних поверхонь при спалюванні рідких палив з вмістом сірки менше  $0,05 \%$  [1].

Згідно теоретичних положень сірчаноокислотного виробництва за нітрозним механізмом при спалюванні сірчистих мазутів утворюється пара сірчаної кислоти, яка конденсується на поверхнях нагріву з температурою нижче  $120\dots130 \text{ }^\circ\text{C}$ . В цьому випадку можливе використання теплоти конденсації, абсорбції  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  і розчинення сірчаної кислоти, що збільшує тепловий потік приблизно на  $10 \%$  [2].

Під час процесу конденсації вивільняється прихована теплота, яку раніше не враховували при здійсненні розрахунків ККД котлів, в яких спалюються сірчисті мазути внаслідок інтенсивної низькотемпературної корозії на рівні  $1,2 \text{ мм/рік}$ . Ще й досі основним критерієм при визначенні ККД є явна теплота, величина якої залежить від типу палива, значення коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$ , мінімальної температури відхідних газів  $\vartheta_{\text{відх}}$ , яка в свою чергу залежить від мінімальної температури стінки  $t_{\text{ст}}$  і температурного натиску  $\Delta t$  на виході газів з котла.

Згідно даних [3] має місце зниження інтенсивності низькотемпературної корозії та забруднення (без вказівки конкретних значень залежності від температури стінки  $t_{\text{ст}}$  і водомісту  $W^r$ ). Тому були проведені дослідження інтенсивності низькотемпературної корозії при спалюванні водомазутних емульсій з різним водовмістом і солевмістом.

При збільшенні солевмісту водомазутних емульсій від  $17,0 \text{ мг/дм}^3$  (крива 3) до  $490 \text{ мг/дм}^3$  (крива 2) швидкість низькотемпературної корозії вуглецевої сталі (сталь 20) (рис. 1) перебуває на рівні  $0,3\dots0,12 \text{ мм/рік}$  при температурах стінки в межах  $130\dots70 \text{ }^\circ\text{C}$  навіть при  $\tau = 100 \text{ год}$ , що нижче допустимого рівня [4]. Тобто підвищення солевмісту мало впливає на швидкість низькотемпературної корозії внаслідок пасивації поверхні металу оксидами азоту і тому допустимий

солевміст водомазутних емульсій при забезпеченні швидкості корозії  $K_{\text{доп}}$  на рівні 0,25...0,3 мм/рік необхідно визначати з інтенсивності високотемпературної корозії. Ці залежності дали можливість визначити мінімальні і максимальні значення  $t_{\text{ст}}$  при спалюванні водомазутних емульсій з водовмістом  $W^r$  на рівні 30% при конкретних значеннях солевмісту  $S_{\text{ВМЕ}}$  і прийняти рішення з можливості застосування конденсаційних поверхонь при розширенні значень  $t_{\text{ст}}$  від 130 °С при спалюванні мазуту і до 70 °С при спалюванні водомазутних емульсій при забезпеченні допустимої швидкості корозії  $K_{\text{доп}}$  на рівні 0,3 мм/рік.

Таким чином, необхідно виконати аналіз можливості підвищення ККД для трьох варіантів конструкцій допоміжних котлів: 1) котли з однією пароутворюючою поверхнею з температурою відхідних газів 450...250 °С, в топках яких може спалюватися і мазут, і водомазутна емульсія; 2) котли з мінімальною температурою стінки вище 130 °С; 3) котли з мінімальною температурою стінки нижче 130 °С при спалюванні водомазутних емульсій.

У практиці вимір витрат і параметрів води, пари та палива не проводиться, і тому визначення корисно використаної теплоти і ККД котла по прямому балансу досить проблематично. Значно простіше і більш точно виміряти параметри процесів, що визначають втрати теплоти: з відхідними газами  $q_2$ ; від хімічної неповноти згоряння палива  $q_3$ ; від механічної неповноти згоряння палива  $q_4$ ; у навколишнє середовище  $q_5$ .

Тоді вираження для ККД по зворотному балансу має вигляд [1]

$$\eta_{\text{зв}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5), \%, \quad (1)$$

Втрата теплоти з відхідними газами  $q_2$  обумовлена тим, що знизити температуру димових газів в котлі до температури навколишнього середовища неможливо, тому що чим менше різниця температур  $t_r - t_{\text{п}}$ , тим менше температурний напір у поверхні нагрівання й тим більше її розміри.

При теплотехнічних випробуваннях котлів втрати з відхідними газами, визначаються по емпіричній формулі [1]

$$q_2 = 3,5\alpha \frac{t_{\text{відх}} - t_{\text{хп}}}{100} + 0,5, \%, \quad (2)$$

де  $t_{\text{відх}}$ ,  $t_{\text{хп}}$  – температури відхідних газів і холодного повітря відповідно, °С;  
 $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря.

Втрата теплоти від механічної неповноти згоряння  $q_4$  при розрахунках суднових котлів на рідкому паливі звичайно не враховується, тобто  $q_4 \approx 0$ . Однак у реальних умовах частина крапель палива коксується, не встигає згоріти й осаджується на поверхнях нагрівання у вигляді часточок сажі. Втрати  $q_4$  так само, як і  $q_3$ , пов'язані з досконалістю топкового процесу й тому відносяться до топкових втрат.

Якщо при спалюванні стандартних сірчистих мазутів у котлах, що мають

тільки пароутворювальну поверхню, значення основної (найбільшої) втрати теплоти  $q_2$  перебуває на рівні (рис. 2) 16...22 %, а сума втрат теплоти ( $q_2 + q_3$ ) на рівні 24 %, то ККД таких котлів буде перебувати на рівні 80 % [1]. І тільки за рахунок зменшення температурного натиску  $\Delta t$  до 10 °С можна збільшити ККД вище 80 %.

Зменшення величини  $q_3$  відбувається при застосуванні альтернативних палив і особливо при спалюванні водопаливних емульсій.

Згідно даних [1] особливості фізико-хімічних процесів, що протікають у топці при спалюванні водопаливних емульсій, забезпечують зниження теплових втрат (рис. 3): з відхідними газами на 10 %; від хімічної неповноти згоряння на 30 %; від механічної неповноти згоряння на 50 %.

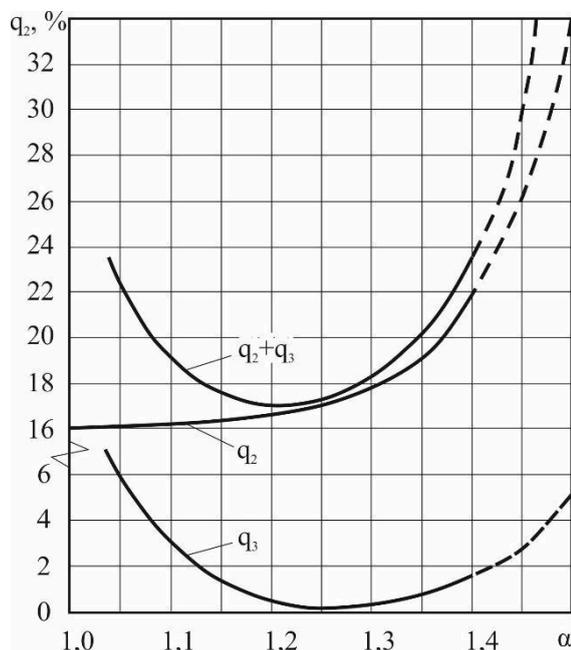


Рисунок 2 – Залежність втрат теплоти  $q_2$  і  $q_3$  від коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  [1]

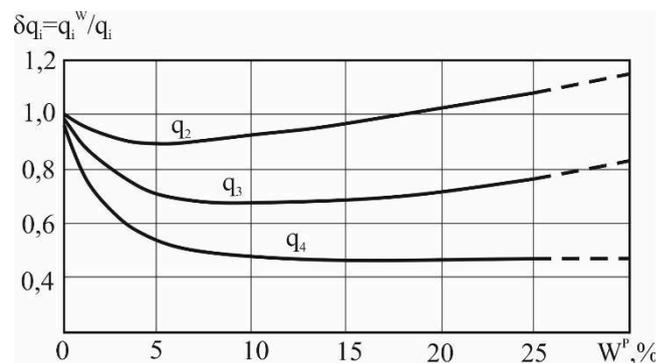


Рисунок 3 – Зниження втрат теплоти при спалюванні водопаливних емульсій [1]

Необхідно відмітити суттєву різницю в значеннях втрати теплоти  $q_2$  при спалюванні мазуту ( $q_2 = 22$  % при  $\alpha = 1,4$  (рис. 2)) і при спалюванні водопаливної емульсії з водовмістом  $W^r = 25$  % при не вказаному значенні  $\alpha$  (рис. 3). Різниця між ними означає зростання економічності на 20,9 % при переході на спалювання водопаливної емульсії, що відповідає опублікованим даним [5–7].

На рис. 2. не представлено значення втрати механічної неповноти згоряння палива  $q_4$ , хоча на рис. 2 при спалюванні мазуту з водовмістом  $W^r = 0$  % ця втрата дорівнює 1,0 %. При  $W^r = 2$  % втрата  $q_4$  дорівнює 0,75 %. Це означає, що при проведенні експериментів втрату від механічної неповноти згоряння палива  $q_4$  треба враховувати. Таким чином ККД котла при значеннях коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha = 1,4$  (рис. 2) при однаковому значенні  $q_5$  складе

$$\eta_{зб} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4) = 100 - (22,0 + 1,8 + 1,0) = 75,2 \text{ \%}.$$

Згідно даних рис. 3 при спалюванні водопаливних емульсій з водовмістом  $W^r = 25 \text{ \%}$ , при значеннях втрат  $q_2 = 1,1 \text{ \%}$ ,  $q_3 = 0,75 \text{ \%}$  і  $q_4 = 0,45 \text{ \%}$  ККД котла дорівнює

$$\eta_{зб} = 100 - (1,1 + 0,75 + 0,45) = 97,7 \text{ \%}.$$

Таким чином при спалюванні водопаливної емульсії з водовмістом  $W^r = 25 \text{ \%}$  в порівнянні з мазутом ККД котла зростає на 22,5 %.

Результати розрахункових досліджень значень ККД  $\eta$  і приросту ККД  $\Delta\eta$  представлені на рис. 4. Згідно яких для котлів з однією пароутворюючою поверхнею при температурі відхідних газів  $\vartheta_{\text{від}} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$  ККД котла дорівнює  $\eta = 74,2 \text{ \%}$ , при температурі  $\vartheta_{\text{від}} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\eta = 76,9 \text{ \%}$ , при температурі  $\vartheta_{\text{від}} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\eta = 79,57 \text{ \%}$ , при температурі  $\vartheta_{\text{від}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\eta = 82,1 \text{ \%}$ , при температурі  $\vartheta_{\text{від}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\eta = 84,7 \text{ \%}$ , тобто при зниженні температури відхідних газів  $\vartheta_{\text{від}}$  від  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  приріст ККД котла дорівнює  $\Delta\eta_1 = 10,5 \text{ \%}$ .

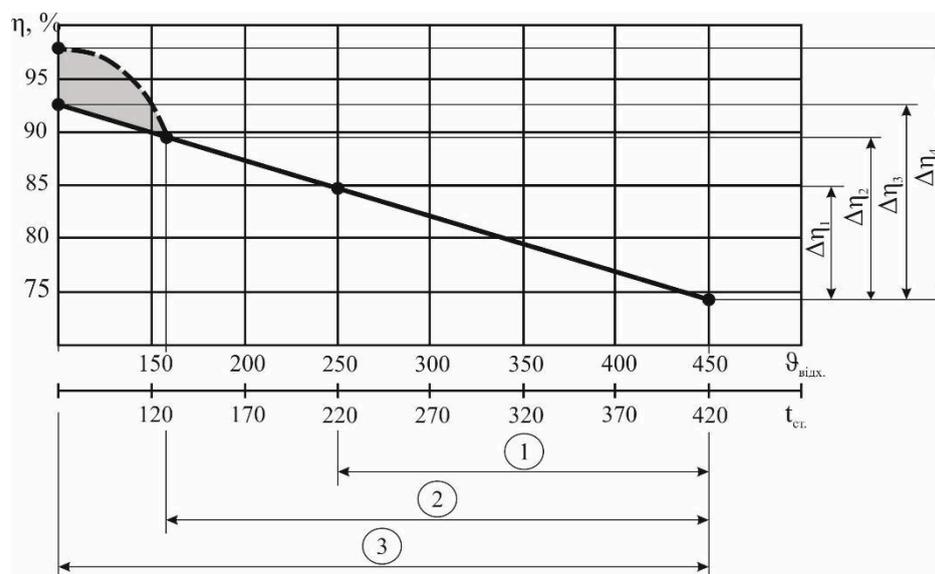


Рисунок 4 – Залежності значень ККД котлів і приросту ККД для різних конструкцій котлів при спалюванні мазуту і водомазутної емульсії з  $W^r = 30 \text{ \%}$  при  $\alpha = 1,5$  від температури відхідних газів і температури стінки металу: 1 – котли з пароутворюючою поверхнею; 2 – котли з сухим економайзером при спалюванні мазуту; 3 – котли з сухим і конденсаційним економайзером при спалюванні водомазутних емульсій

При установці сухого економайзера з температурою стінки металу не нижче  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  ККД зростає до  $89,5 \text{ \%}$  тобто приріст ККД складає  $\Delta\eta_2 = 15,3 \text{ \%}$ . При установці економайзера з температурою стінки металу  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  без урахування теплоти конденсації пари  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ККД котла складе  $92,5 \text{ \%}$ , а приріст ККД –  $\Delta\eta_3 = 18,3 \text{ \%}$ . З урахуванням теплоти конденсації пари  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ККД котла складе  $97,7 \text{ \%}$ , тобто приріст ККД –  $\Delta\eta_4 = 23,5 \text{ \%}$ .

Таким чином, приріст ККД має різне значення, що відповідає літературним даним з підвищення ККД, який коливається в межах від 5 до 31 % [6–8].

**Висновки.** 1. При спалюванні сірчистих мазутів можливе підвищення ККД котлів до рівня  $\eta_k = 89,5\%$  за рахунок використання сухих конвективних поверхонь нагрівання з температурами стінки металу вище  $130^\circ\text{C}$ .

2. При спалюванні водомазутних емульсій на основі сірчистих мазутів з водовмістом до 30 % і солевмістом від 17 до  $490\text{ мг/дм}^3$  має місце різке зниження інтенсивності низькотемпературної корозії, що дозволяє застосувати конденсаційні конвективні поверхні нагрівання з вуглецевої сталі в межах температури стінки металу  $130\dots 70^\circ\text{C}$  і підвищити ККД котлів до 98 %.

3. В залежності від бази порівняння котлів однією пароутворюючою поверхнею з розглянутими варіантами конструкцій котлів приріст ККД може мати різне значення від 10,5 % до 23,5 %.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Денисенко Н. И., Костылев И. И. Судовые котельные установки: Учеб. для вузов // СПб.: Элмор. 2005. 245 с.
2. Амелин А. Г. Производство серной кислоты // М.: Химия. 1967. 472 с.
3. Якубовский Ю. В., Суменков В. М., Селезнев Ю. С. [и др.]. Эксплуатация производственных котлов КВГ-34К на водотопливной эмульсии // Рыбное хозяйство. 1991. № 3. С. 57–60.
4. Филиппук А. Н. Влияние солевого содержания воды водомазутной эмульсии на скорость низкотемпературной коррозии / А. Н. Филиппук // Водный транспорт: Зб. наукових праць Київської державної академії водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного. – Київ: КДАВТ, 2016. – № 2 (25). – С. 70–77.
5. Філіппук О. М., Колбасенко О. В. Підвищення техніко-економічної ефективності суднових котельних установок при спалюванні водопаливних емульсій // Збірник наукових праць НУК. 2020. Миколаїв: НУК. № 1 (479). С. 51–60.
6. Allaa M., Soulayman S., Abdelkarim T., Walid Z. Water/Heavy Fuel Oil Emulsion Production, Characterization and Combustion. Int. Journal of Renewable Energy Development, 2021, vol. 10, no 3, pp. 597–605. Available at: <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.34873>.
7. Soulayman S., El-Khatib R. The Effect of Fuel Emulsion on Fuel Saving in Fire Tube Boilers of Tartous Company for Cement and Construction Materials. Journal of Solar Energy Research Updates, 2020, vol. 7, pp. 1–6. Available at: <http://dx.doi.org/10.15377/2410-2199.2020.07.01>.
8. Филиппук А. Н., Колбасенко О. В., Шевцов А. П., Димо Б. В. Технология повышения технико-экономической и экологической эффективности котельных установок физико-химической коррекцией состава водотопливных эмульсий PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE. 2021. Кишнев: Институт энергетики Академии наук Молдовы. № 3 (51). С. 62–77. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.06>

**Філіппук Олександр Миколайович** старший викладач кафедри «Автоматика та електроустаткування» Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4061-7577>; [filipschuk5@gmail.com](mailto:filipschuk5@gmail.com).

**Шевцов Анатолій Павлович** д.т.н., професор, професор навчально-наукового центру морської інфраструктури Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8692-6458>; [aootnet@ukr.net](mailto:aootnet@ukr.net).

