

10.31653/smf50.2025.15-25

Веретеннік О.М., Сандлер А.К.

Національний університет "Одеська морська академія"

ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ СИСТЕМ УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННОГО ТЕПЛА

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасні суднові енергетичні установки зустрічаються з гострою необхідністю підвищення енергоефективності. Це вимагає не тільки поліпшення тепло-технічних параметрів, але й впровадження більш досконалих систем теплового регулювання. Завдання підвищення надійності та довговічності роботи встаткування також стоїть на першому плані. Ефективне управління тепловими потоками є ключовим чинником у досягненні цих цілей.

Один з найпоширеніших викликів – це виділення надлишкового тепла в процесі роботи різних енергетичних об'єктів. У переважній більшості випадків це тепло є побічним продуктом, не що бере участь у корисній роботі. Напроти, його накопичення приводить до порушення теплових режимів і може привести до ушкодження встаткування. Тому відвід та утилізація надлишкового тепла є критично важливим завданням. В інших випадках, навпаки, необхідно забезпечити підведення тепла до об'єкта для підтримки його працездатності. Складність завдання багаторазово зростає при роботі в екстремальних умовах. До них ставляться, наприклад, мінімальна різниця температур між джерелом тепла й навколишнім середовищем (тепlostоком), жорсткі вимоги до надійності та терміну служби встаткування, а також обмеження по масі й габаритам.

У таких ситуаціях традиційні методи теплообміну виявляються недостатньо ефективними.

Одним з перспективних розв'язків даної проблеми є застосування систем терморегулювання на основі теплопередаючих пристроїв з капілярним прокачуванням теплоносія. Особлива увагу заслуговують теплові труби (ТТ), які являють собою замкнені системи, що працюють по випарно-конденсаційному циклу. В основі принципу роботи лежить капілярний тиск, що забезпечує циркуляцію теплоносія усередині труби без використання зовнішніх насосів. Ключова перевага ТТ – їх висока ефективна теплопровідність. Відсутність частин, які механічно рухаються, робить їх винятково надійними й довговічними.

ми. Вони не споживають додаткової енергії на прокачування теплоносія, що суттєво знижує енергоспоживання всієї системи. Компактність і мала вага ТТ дозволяють використовувати їх в обмежених просторах. На відміну від інших методів теплопередачі, ТТ характеризуються значно більш високої теплопередаючою здатністю і адаптивністю до різноманітних умов експлуатації. Вони демонструють меншу чутливість до зміни орієнтації в просторі в порівнянні з іншими системами.

Найважливішою властивістю ТТ є їхня здатність до саморегулювання. Це означає, що інтенсивність процесів тепло- і масопереносу усередині труби автоматично підбудовується під мінливі зовнішні умови без необхідності зовнішнього управління. Це суттєво спрощує конструкцію й експлуатацію системи. Автоматичне регулювання забезпечує стабільну роботу теплової труби в широкому діапазоні змін зовнішніх факторів. Серед найбільш істотних факторів, що впливають на роботу теплової труби, можна виділити теплове навантаження на випарник та його стабільність, температуру навколишнього середовища, умови охолодження конденсатора, а також орієнтацію пристрою в просторі. Здатність адаптуватися до цих змін робить теплові труби незамінними в різних додатках.

ТТ відкривають широкі перспективи застосування в самих різних областях. Вони особливо ефективні при утилізації низкопотенційного тепла, тобто тепла з низькою температурою, яке звичайно губиться. Крім того, ТТ можуть бути використані для нагрівання й охолодження різних об'єктів, забезпечуючи точний контроль температурного режиму. Можливості використання ТТ постійно розширюються у зв'язку зі зростаючими вимогами до енергоефективності та надійності роботи енергетичних систем і інших технічних об'єктів. Їхнє застосування дозволяє значно вдосконалити теплотехнічні характеристики встаткування, знизити енергоспоживання, підвищити надійність і збільшити термін служби. Це робить ТТ одним з найбільш перспективних напрямків розвитку сучасних технологій терморегулювання. Постійні дослідження й розробки в цій області спрямовані на розширення діапазону робочих температур, підвищення ефективності теплопередачі й створення нових типів ТТ, адаптованих до специфічних умов експлуатації в різних галузях суднової енергетики [1 - 5].

Постановка завдання. Мета дослідження – вдосконалення теплоенергетичного суднового обладнання в напрямку підвищення його

енергоефективності, зменшення вартість та габаритів та одночасного збереження простоти та надійності відомих систем.

Викладення матеріалу дослідження. Для пошуків вдосконалення проаналізовані найбільш поширені конструкції ТТ, які застосовуються в енергетиці.

Відомою є ТТ, яка виконана у вигляді окремого металевого корпусу, що відрізняється тим, що в металевий корпус, виконаний з нержавіючої сталі з відшліфованою внутрішньою поверхнею й герметично запаятий по обидва боки, у якості теплопровідника заповнена під вакуумом теплопровідна незамерзаюча рідина етанол або метанол з температурним діапазоном $-40 \dots 150^{\circ}\text{C}$ (рис. 1) [6].

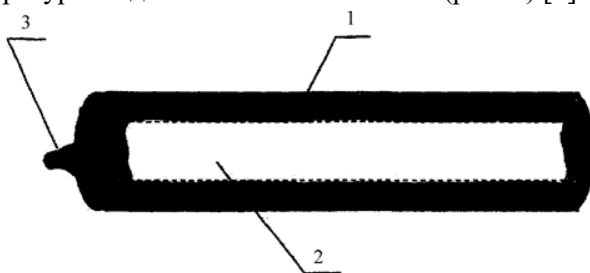


Рис. 1. Теплова труба: 1 – корпус; 2 – незамерзаюча рідина;
3 – місце герметизації

Досвід експлуатації ТТ такої схеми виявив ряд недоліків, які суттєво обмежують потенційні можливості при застосуванні у суднових енергетичних установках:

- використання у якості робочої рідини метанолу – небезпечної для людини речовини;
- відсутність системи "гніт", що знижує рівномірність розігріву труби по зонах;
- порушення режиму теплопередачі на перехідних неусталених режимах роботи первинного джерела теплоти.

Найбільш вільною від перелічених недоліків є теплова труба, яка складається з робочого корпусу з полірованою внутрішньою поверхнею, яка відрізняється тим, що система капілярних каналів виконана у вигляді перфорованої отворами пластини, що має ширину більше довжини діаметра отвору корпусу, і пластина розташована в корпусі, у перетині поперек довжини корпусу, у серповидном виді. Причому кінці пластини щільно прилягають до стінок корпусу й мають кут між стінкою корпусу та пластини до 1° , а корпус має з одного кінця

загальну заглушку в нероз'ємнім з'єднанні, а с іншої сторони корпуса розташований клапан у вигляді гвинтової пари для заливання рідини. До складу зазначеної рідини входять: етиловий ефір – 20%, етиловий технічний спирт – 60%, ацетон – 20% [7].

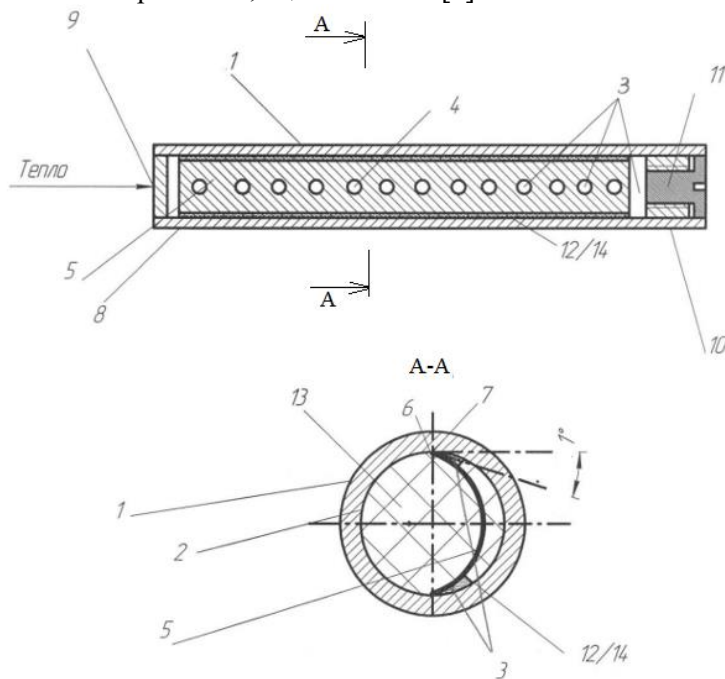


Рис. 2. Теплова труба з пластиною: 1 – корпус; 2 – внутрішня поверхня; 3 – капілярний канал; 4 – отвір; 5 – пластина; 6 – кінець пластини; 7 – стінка; 8 – один кінець; 9 – заглушка; 10 – інша сторона корпусу; 11 – клапан; 12 – рідина; 13 – пара; 14 – конденсат

В умовах застосування у суднових енергетичних установках, які характеризуються великою кількістю теплових неусталених перехідних процесів, зазначена конструкція не завжди дозволяє ефективно застосовувати її у системах глибокої утилізації тепла. Це обумовлено такими факторами як:

використанням у якості компонента робочої рідини ацетону – пожеже небезпечної речовини;

порушенням режиму теплопередачі на перехідних неусталених режимах роботи первинного джерела теплоти.

У реаліях, що склалися, доцільним та актуальним є створення теплової труби з підтримкою стабільності режиму теплопередачі на перехідних неусталених режимах роботи зовнішнього джерела теплоти.

Поставлена задача вирішується тим, що тепла труба з акумулюванням теплоти, що складається з робочого корпусу з полірованою внутрішньою поверхнею, системи капілярних каналів, виконаної у вигляді перфорованої отворами пластини, розташованої у перетині поперек довжини корпусу з кінцями, які щільно прилягають до стінок корпусу та мають кут між стінкою корпусу й пластини до 1° , та яка має ширину більше довжини діаметра отвору корпусу, загальної заглушки та клапана.

Основна відмінність запропонованої конструкції полягає у тому, що навколо робочого корпусу, коаксіально до нього, розташований вторинний корпус, а у зазорі між робочим та вторинним корпусом містяться мідна сітка та термоакуюлючий матеріал на основі фазового переходу, у якості робочої рідини у робочому корпусі застосовано рідину з низькою температурою кипіння флуорінол-85, робочий та вторинний корпуси обладнані мідними заглушками, а зазор між корпусами обладнано клапаном для поповнення термоакуюлючого матеріалу.

Суть схемотехнічного рішення пояснюється кресленням (рис. 3).

ТТ складається з робочого корпусу 1 з полірованою внутрішньою поверхнею та вторинного корпусу 2, які сполучені загальною заглушкою 5. Окрім того, протилежні кінці робочого та вторинного корпусів обладнано мідними заглушками 3 та 4 відповідно. У робочому корпусі міститься система капілярних каналів, яка виконана у вигляді перфорованої отворами пластини 8, що має ширину більше діаметра отвору робочого корпусу (рис. 4), розташованої у перетині поперек довжини корпусу, у серповидном вигляді, причому кінці пластини щільно прилягають до стінок робочого корпусу і мають кут між стінкою робочого корпусу і пластини в межах до 1 градуса.

У місці сполучення перфорованої отворами пластини і робочого корпусу утворюється капілярний канал 11. Робочий та вторинний корпуси мають клапани 6 та 7 відповідно для поповнення робочої рідини 12 з низькою температурою кипіння та термоакуюлючого матеріалу 10 на основі фазового переходу.

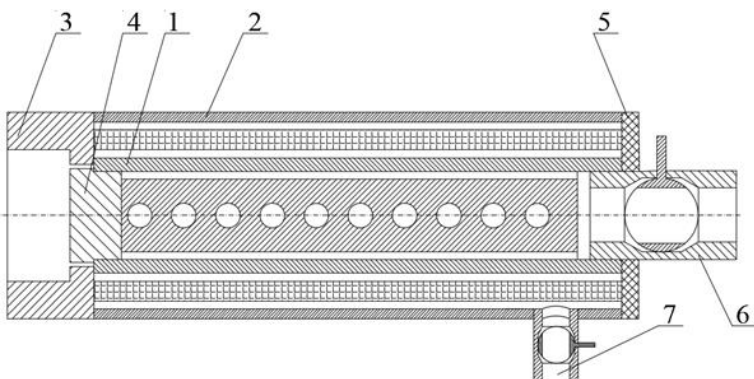


Рис. 3. Теплова труба з акумулюванням теплоти: 1 – робочий корпус; 2 – вторинний корпус; 3 – мідна заглушка вторинного корпусу; 4 – мідна заглушка робочого корпусу; 5 – загальна заглушка теплової труби; 6 – клапан поповнення робочої рідини; 7 – клапан поповнення рідини з низькою температурою кипіння

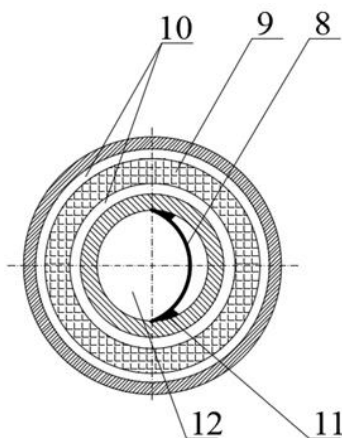


Рис. 4. Теплова труба з акумулюванням теплоти: 8 – перфорована отворами пластина; 9 – мідна сітка; 10 – термоакумулюючий матеріал на основі фазового переходу; 11 – капілярний канал; 12 – рідина з низькою температурою кипіння

У зазорі між робочим та вторинним корпусами міститься мідна сітка 9.

У статичному режимі з зовнішнім джерелом тепла сполучена тільки мідна заглушка вторинного корпусу. Таким чином тепло сприяє підтримці у робочому стані термоакумулюючого матеріалу на

основі фазового переходу. Мідна сітка застосовується для протидії осаджування матеріалу у нижній частині вторинного корпусу.

У динамічному режимі з зовнішнім джерелом тепла сполучається мідна заглушка робочого корпусу та відбувається випар робочої рідини з низькою температурою кипіння. Ця пара переміщається по робочому корпусу і конденсується на холодній частині корпусу. Відбувається виділення теплової енергії. Щільно притиснуті кінці серповидно зігнутої перфорованої отворами пластини до стінки корпусу з кутом менше 1 градуса створюють, як мінімум, два капілярні канали, по яких конденсат переміщається в зону нагрівання. Її склад забезпечує екологічну безпеку, більш низький по температурі початок кипіння рідини, чим у відомих аналогів. Вторинний корпус з розігрітим термоакумулюючим матеріалом на основі фазового переходу використовується як демпфер коливань температурного режиму зовнішнього джерела тепла [8 - 10].

У той же час існує критична проблема контролю технічного стану ТТ, які експлуатуються у агресивному морському середовищі. Це середовище, у комбінації зі специфічними характеристиками самого встаткування, приводить до поступового накопичення незворотних дефектів. Комплексі дефектів, якщо його вчасно не виявити та не усунути, може привести до виходу з ладу енергетичного встаткування судна, що, у свою чергу, чревате катастрофами і загрожує безпеці судноплавства.

Сучасні підходи до експлуатації технічних систем, такі як концепція "експлуатації до передвідмовного стану", вимагають точної й своєчасної діагностики. Ця концепція припускає прогнозування технічного стану встаткування на основі виявлення дефектів і ушкоджень, ще на початковій стадії їх розвитку. Однак, практична реалізація подібної концепції сполучена із про значними труднощами. Вона вимагає впровадження новітніх, високоефективних, зручних у використанні автоматизованих засобів технічної діагностики й прогнозування. Процедури діагностування при цьому суттєво ускладнюються.

Існуючі системи діагностики ТТ зустрічаються із серйозними проблемами, обумовленими специфікою морської експлуатації. Потужне, компактно розташоване суднове енергетичне встаткування створює інтенсивні вібрації та потужні термічні поля, які значно спотворюють результати діагностики й перешкоджають її ефективному проведенню. Ці дестабілізуючі фактори знижують точність вимірів і

утрудняють прогнозування технічного стану. Таким чином, засоби, що існують, не завжди відповідають сучасним вимогам експлуатації, та не забезпечують необхідної точності й надійності прогнозів.

Аналіз існуючих рішень показує гостру необхідність у розробці нових засобів діагностики й прогнозування, здатних працювати в умовах екстремальних навантажень і не підданих впливу дестабілізуючих факторів. Оптимальним варіантом у цій ситуації представляється використання волоконно-оптичних вимірювальних пристроїв. Волоконній оптиці притаманний ряд переваг, таких як висока стійкість до електромагнітних перешкод, вібрацій і екстремальним температурам. Це робить її ідеальним інструментом для діагностики ТТ в умовах суднової енергетики. Впровадження волоконно-оптичних датчиків у комбінації з удосконаленими алгоритмами обробки даних може значно підвищити ефективність діагностики. Застосування принципів часткової інваріантності дозволить мінімізувати вплив дестабілізуючих факторів на результати вимірювань, забезпечуючи більш точний і надійний прогноз технічного стану. Це, у свою чергу, дозволить перейти до більш ефективного планування технічного обслуговування, скоротивши число аварійних ситуацій і підвищивши загальну надійність і ефективність експлуатації ТТ.

Таким чином, рішення проблеми зводиться до розробки й впровадженню інтегрованої системи діагностики, заснованої на волоконно-оптичних технологіях [12 - 20].

Ця система здатна надійно працювати в жорстких умовах морської експлуатації. Впровадження волоконно-оптичної інформаційно-вимірювальної системи дозволить перейти до принципів превентивної діагностики, вчасно виявляючи потенційні несправності і запобігати аварійним ситуаціям, тим самим гарантуючи безпеку судноплавства та ефективність використання ТТ протягом усього її життєвого циклу. Це забезпечить не тільки економію ресурсів за рахунок зниження числа позапланових ремонтів, але й приведе до істотного підвищення рівня безпеки й енергоефективності суден.

Пристрій є простим у виготовленні та застосуванні, бо для його створення застосовуються освоєні промисловістю компоненти та елементи. Техніко-економічні показники значно вище прототипу, тому що дотримуються екологічні норми й не потрібні додаткові засоби захисту від витоку рідини та втрати тепла [11].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Технічний результат досягається завдяки тому, що застосування вторинного

корпусу з термоакумуючим матеріалом та робочої рідини з низькою температурою кипіння забезпечить:

- можливість стабільності режиму теплопередачі на перехідних неусталених режимах роботи первинного джерела теплоти;
- можливість застосування низькопотенційних джерел теплоти;
- підвищену захищеність елементів;
- високий рівень швидкодії.

Перелік використаних джерел

1. Веретеннік О. М., Сандлер А. К. Технічне діагностування об'єктів суднових енергетичних установок: довідник. Одеса: Фенікс, 2019. 167 с.

2. Дмитрин В. И., Майданик Ю. Ф., Чернышёва М. А. Контурная тепловая труба с бинарным теплоносителем // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5, № 3. С. 131-135.

3. Сандлер А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р. Одеса: НУ "ОМА". 2019. С. 27 – 33. [dx.doi.org/10.31653/2706-7874](https://doi.org/10.31653/2706-7874).

4. Косторнов А. Г., Шаповал А. А., Мороз А. Л., Фролов Г. А., Шаповал И. В. Тепловые трубы с капиллярными структурами на основе композиционных градиентных материалов для теплообменных систем космического и авиационного назначения // Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15, № 2. С. 69 – 79.

5. Сандлер А. К. Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу. Автоматизація суднових технічних засобів. 2023. Вып. 28. Одесса: НУ "ОМА". С. 79 – 89. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-79-89.

6. Патент України № 146258. МПК (2006) G01M 11/08 (2006.01), G02B 6/00. Волоконно-оптичний датчик зношування. А.К. Сандлер, М.О. Опришко, Г.О. Кузнецова, заявник та володар патенту Національний університет "Одеська морська академія". u202005716. заявл. 04.09.2020. опубл. 03.02.2021. бюл. № 5/2021. 3 с.

7. Патент України № 78611, МПК (2011) G01M 11/02 (2006.1). Волоконно-оптичний газоаналізатор. Заявники та володарі патенту: Сандлер А.К., Цюпко Ю.М. u201210906. заявл. 18.09.2012. опубл. 25.03.2013, бюл. № 6. 3 с.

8. Сандлер А. К., Бондаренко А. В. Системи глибокої утилізації тепла – альтернативний шлях вдосконалення // Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the VIII International Scientific

and Practical Conference, Cambridge, May 9, 2025. Cambridge-Vinnitsia: P.C. 2025. P. 269 - 276. DOI 10.36074/logos-09.05.2025.055.

9. Sandler A., Budashko V. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. №. 5 (119). P. 25 - 33.

10. Jain M. I., Demirgian J. C., Cole R. L. Organic Rankine-Cycle Power Systems Working Fluids Study: Topical Report No, 1 – Fluorinol 85. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc.1097062>.

11. Сандлер А. К., Шестопалов К. О., Єрін В. О. Глибока утилізація вторинних енергоресурсів суднових компресорних установок // *Суднові енергетичні установки*. 2023. Вип. 47. Одеса: НУОМА. – С. 191-196. DOI: 10.31653/smf47.2023.191 - 196.

12. Сандлер А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Київський університет інфраструктури та технологій, 2021. 20 с.

13. Данчук Д. П., Долومانжи Г. Д., Сандлер А. К. Волоконна оптика в задачах технічного діагностування суднових компресорних машин // XII міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 21.11.2022 - 23.11.2022 р. Одеса: НУ "ОМА". 2022. С. 160 - 164. DOI: 10.31653/2706-7874.SEEEA-2022.11.1-203.

14. Сандлер А. К., Будашко В. В., Карпілов О. Ю. Волоконно-оптичний засіб визначення теплоти згоряння газу який застосовується в суднових енергетичних установках // *Automation of Technological and Business Processes*. 2025. № 17 (1). P. 53 - 59. DOI <https://doi.org/10.15673/atbp.v17i1.3019>.

15. Сандлер А. К., Макачук Є. В. Схемотехнічне рішення високо-температурного датчику тиску // XI міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 23.11.2021 - 24.11.2021 р. Одеса: НУ"ОМА". 2021. С. 90 - 194. DOI: 10.31653/2706-7874.SEEEA-2021.11.1-238.

16. Сандлер А. К., Опрышко М. О. Волоконно-оптический датчик контроля состояния технических жидкостей и газов // X міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 24.11.2020 - 25.11.2020 р. Одеса: НУ "ОМА". 2020. С. 63 - 68. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245.

17. Sandler A., Budashko V., Khniunin S., Bogach V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // *Eastern-European*

Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 5. №. 5(125). P. 24 – 31. DOI: 10.15587/1729-4061. 2023. 289773.

18. Сандлер А. К., Сандлер А. А. Волоконно-оптический датчик давления для высокотемпературных систем топливоподготовки // Судовые энергетические установки. 2009. Вып. 23. Одесса: ОНМА. С. 17 - 22.

19. Сандлер А. К., Батинський А. І. Волоконно-оптичний пристрій контролю рівня для високотемпературних систем паливопідготовки // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2020. Т. 12, №. 2. Одеса: ОНАХТ. С. 9 - 13.

20. Сандлер А. К., Логишев И. В. Разработка волоконно-оптических устройств для систем контроля и управления СЭУ // Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. Одеса: ОНМА. 2012. С. 19 - 22.