

Войченко Т.О., Гімпель Р.М., Шевченко А.П., Маннапова О.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДКЛАДЕНЬ НА СТАН ТРУБ СУДНОВИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

Метою статті є проведення моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб для підвищення ефективності захисту від корозії і утворення окалини поверхонь нагріву суднових котельних установок. Поставлена мета досягається шляхом аналізу особливостей формування накипу та відкладень. Встановлено, що при використанні води, що містить велику кількість мінералів, у суднових котельних установках під час їх експлуатації можуть утворюватися тверді осади, які називаються накипом. Цей накип має високу міцність, проте має низьку теплопровідність, що може призвести до технічних проблем та збільшення витрат на обслуговування суднових котельних установок. При розрахунку теплового стану труб зазвичай вважають термічний опір відкладень постійним (часто нульовим), не враховуючи того факту, що на початку експлуатації поверхні труб були чистими і працювали в інших умовах, ніж на кінець терміну служби. Тому, щоб належним чином оцінювати термін служби труб, потрібно враховувати товщину шару відкладень та їх склад при розрахунку теплового стану. Найбільш суттєвим результатом є визначення залежностей коефіцієнта еквівалентної теплопровідності від товщини осадкового шару труб суднових котельних установок, різниці температур перетину труби суднових котельних установок від коефіцієнта еквівалентної теплопровідності, різниці температур по перетину труби суднових котельних установок від товщини осадкового шару та тривалості роботи труб суднових котельних установок від інтенсивності утворення накипу. Результати дослідження можуть бути використані для розробки методів контролю стану труб та планування їх заміни, що дозволить підвищити ефективність експлуатації суднових котельних установок. Запропонований підхід до моделювання відкладень може бути застосований для оцінки теплового стану не тільки труб суднових котельних установок, але й трубопроводів інших систем під час їх тривалої експлуатації. Моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб суднових котельних установок засновано на запропонованому в статті наборі математичних виразів.

Ключові слова: суднова котельна установка, моделювання, відкладення, накип, осад, нагрів, теплопровідність, труба, коефіцієнт, температура.

Постановка проблеми. Під час експлуатації при використанні жорсткої води у суднових котельних установках на поверхнях нагріву з'являються тверді відкладення, що називаються накипом. Цей накип має високу міцність, але низьку теплопровідність, що може призвести до технічних проблем та збільшення витрат на обслуговування суднових котельних установок:

- відкладення і накип призводять до збільшення споживання палива і зниження коефіцієнта корисної дії котлів, що, в свою чергу, підвищує кількість шкідливих викидів в атмосферу;
- зупинка котла вимагає складної і дорогівартісної процедури очищення від накипу та відкладень, а між очищеннями утворюється новий осад;
- тепловіддача накипу і відкладень є низькою, що викликає перегрів металевих поверхонь нагріву, що може призвести до деформацій, здуття та тріщин у трубах, аварій,

скорочення терміну між ремонтами і збільшення витрат на обслуговування суднових котельних установок;

- відкладення зменшують перетин труб, збільшуючи гідроопір, що призводить до додаткових витрат електроенергії для перекачування води через насосне обладнання суднових котельних установок;

- неправильне обслуговування та несвоєчасна чистка відкладень і накипу знижують термін служби суднових котельних установок в 2-3 рази, що призводить до непотрібних витрат на заміну тих котлів, що вийшли з ладу.

Таким чином, запобігання утворення накипу і захист від відкладень є однією з актуальних проблем, пов'язаних з експлуатацією суднових котельних установок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] визначено, що через відносно низьку ціну на дизель більшість суднових двигунів використовують дизельне паливо в якості судового палива, але його викиди містять багато вуглецю. Для скорочення викидів вуглецю Міжнародна морська організація встановила індекс енергоефективності проекту та індекс енергоефективності для існуючих суден. У теперішній час популярним способом є зниження викидів за рахунок оптимізації характеристик теплопередачі котлів з відпрацьованими газами на нових суднах, але досліджень показника викидів котлів існуючих суден проведено недостатньо. Для існуючих ємностей зафіксована теплопровідність матеріалів котла-утилізатора й інші параметри. Тому основними факторами, що впливають на коефіцієнт тепловіддачі котла-рекуператора, є температура і витрата газів. Отже, у даній статті розглядається вплив температури і витрати відпрацьованих газів двигуна на коефіцієнти теплопередачі котла. По-перше, на основі збереження маси і енергії в якості основного рівняння створюється модель теплообміну котла з використанням методу гібридного моделювання і методу концентрованих параметрів. По-друге, для даного котла, оскільки інші параметри практично не змінюються, температура на вході і витрата моделі змінюються методом змінних напруги, а температура на виході з котла моделюється за алгоритмом випробувань. Новизна даного дослідження полягає в дослідженні вхідної температури і витрати котла-утилізатора діючого судна, і отримані відповідні результати, які дають теоретичне керівництво роботою котла-утилізатора.

У статті [2] зазначено, що для підвищення теплового ККД котла і зниження викидів оксинітриду пропонується нова система рекуперації тепла димових газів. Паровий насосний котел, оснащений системою рециркуляції димових газів, вперше використовується в практичній техніці. Окислювальне повітря перед процесом горіння попередньо нагрівається і зволожується, що викликає підвищення температури точки роси димових газів. Таким чином, зворотна вода котла може рекуперувати більшу частину відпрацьованого тепла димових газів. Коефіцієнт корисної дії (ККД) утилізації тепла системи може досягати 82,6%, що призводить до збільшення ККД котла на 7-8%. Крім того, підвищення вологості окислювального повітря і рециркуляція димових газів зменшують утворення оксинітридів. У результаті викид оксинітридів знижується з 129 мг/м³ до 23 мг/м³, що дає зниження на 82,3%. Газовий котел реалізує наднизький рівень викидів оксинітриду. Для котла потужністю 1,8 МВт річне споживання природного газу можна заощадити на 7-8%. З огляду на нинішні ціни на енергоносії запропонована система є економічно вигідною зі статичним терміном окупності в 1,2 роки. Загальна продуктивність системи надається як доказ потенційних переваг. Доведено, що запропонована система має переваги у сфері енергозбереження, зменшення викидів забруднюючих речовин та економічної вигоди.

У роботі [3] допоміжні котли на теплоходах є предметом досліджень. Пар виробляється допоміжним котлом для підігріву палива і турбінами для перекачування вантажного масла. Цей морський котел являє собою водотрубний допоміжний котел зі струменевим пальником і ККД

70-80%. Метою визначення процесу і складових втрати незворотності в системі є виявлення процесу і складових енергетичних втрат. Другий закон термодинаміки і поняття виробництва необоротної ентропії лежать в основі енергетичного методу аналізу цього дослідження. Ця концепція розгляду ентропії в даному стаціонарному стані, а не як зміни процесу, також є однією з особливостей цього енергетичного аналізу суднового рідкопаливного котла. Втрати енергії в камері згоряння були розраховані і визначені як 35,024 кДж, що є максимальною незворотністю в даному морському допоміжному котлі. Проведено чисельний аналіз сучасного струменевого пальника з форсункою для оцінки вдосконалення процесу горіння. Схема температура-швидкість витрати палива, що проходить через сопло пальника цього допоміжного котла, зображує розпилення.

На основі літературних джерел в статті [4] представлений аналіз конструктивних рішень суднових головних котлів, спрямованих на підвищення їх ККД. Особлива увага приділялася утилізації скидного тепла відпрацьованих газів, що виходять з котлів. За технічною документацією і результатами експлуатаційних випробувань були визначені характерні значення і технічні параметри: параметри і обсяг виробленої пари, економічність і продуктивність в залежності від виду палива, питома витрата палива.

У роботі [5] визначено, що нафтові відходи, що виникають при експлуатації морських електростанцій, відповідно до Марпольської конвенції, повинні збиратися на судні, а екіпаж зобов'язаний вести облік їх кількості в так званій нафтовій книзі. Зібрані відходи вивозяться на сушу або можуть використовуватися в якості палива на судах. Фізико-хімічні властивості нафтових відходів, що містять різні види нафтових відходів, змішаних в різних пропорціях, важко визначити, що ускладнює вибір правильної температури нагріву для отримання необхідної в'язкості, що забезпечує належне розпилення і хорошу якість горіння. Крім того, нафтові відходи зазвичай містять велику кількість води, твердих викидів і коагулянтів, що виникають в результаті реакцій між різними типами нафтопродуктів, що входять до складу нафтових відходів. Нафтові відходи до і після гомогенізації піддавалися лабораторним випробуванням шляхом обробки мікроскопічних зображень їх проб за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми і спектрального аналізу для уточнення морфології відходів. Також були визначені фізико-хімічні властивості відходів. Результати проведених досліджень показали значну різноманітність фізико-хімічних властивостей і складу нафтових відходів, що вивозяться з суден.

У статті [6] встановлено, що дуже важливо точно досліджувати поведінку компонента морської води, особливо жорсткість Mg, контролювати якість бойлерної води морських котлів. А також важливо дослідити поведінку PO_4^{3-} , особливо коли з ним співіснують Mg^{2+} і OH^- , щоб зробити авторський метод автоматичного управління більш здійсненним і надійним. Відповідно, у даній статті експериментально вивчається поведінка жорсткості Mg у співіснуванні OH^- та/або PO_4^{3-} та при змішуванні кремнезему. Експерименти проводилися в умовах однакового рівня розчину з критеріями якості води, прийнятими для реальних котлів, з використанням автоклава, температура і тиск якого регулювалися на тому ж рівні, що і реальні допоміжні котли.

У роботі [7] розглянуто розрахунок теплового балансу, який є основою для розрахунку термодинамічних характеристик турбованих суднових котлів. Оскільки турбокомпресор бере участь в термодинамічному процесі роботи котла, це може привести до більш складного розрахунку теплового балансу турбованого суднового котла. Запропоновано секційний метод розрахунку теплового балансу турбованого котла, а також аналіз і попереднє дослідження прямого теплового балансу і секційний метод розрахунку теплового балансу. Представлена загальна формула тепловтрат, яка може бути застосована до розрахунку змінного навантаження турбованого котла. Наведено формулу розрахунку наявної кількості теплоти палива, що

використовується для виконання робіт у допоміжній паровій турбіні, а також виконано розрахунок і аналіз конкретних випадків.

У статті [8] визначається, що в результаті технічного прогресу у 21 столітті судна з паровим двигуном з ККД від 36 до 38% були замінені суднами з дизельним двигуном з ККД до 55%. Відповідно, виробники головних котлів і парових турбін на судах боролися за те, щоб їх продукція залишалася на ринку, модернізуючи їх конструкцію з метою підвищення конкурентоспроможності по відношенню до дизельних приводів. На основі огляду літературних даних у даній статті представлений аналіз підвищення ККД судових котлів при використанні скидного тепла газів, що відходять з котлів. Розглядається корисність використання цього тепла для нагріву води, що подається в котли, а також використання нагрітого повітря у процесі горіння. При аналізі враховуються різні типи теплообмінників, що використовуються для цієї мети, а також різна ефективність котлів провідних виробників котлів. Використовувані розрахункові формули і методики використовуються при подальшому аналізі впливу використання скидного тепла на підвищення ККД котла.

Але у відомій літературі не розглянуті в повному обсязі саме питання дослідження впливу відкладень на стан труб судових котельних установок.

Мета дослідження – проведення моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб для підвищення ефективності захисту від корозії і утворення окалини поверхонь нагріву судових котельних установок.

Основні результати дослідження. У ході функціонування судових котельних установок з використанням жорсткої води на поверхні труб відкладаються речовини, які мають високу міцність, але низьку теплопровідність. Накопичення цих відкладень призводить до перегріву труб, що скорочує їх термін експлуатації на судах. При розрахунку теплового стану труб зазвичай термічний опір відкладень приймають за постійну величину (часто нульову), не враховуючи того факту, що поверхні труб у початковий момент експлуатації є чистими і працюють в інших умовах, ніж у кінці періоду експлуатації. Тому, щоб правильно оцінювати термін служби труб, необхідно враховувати товщину шару відкладень і їх склад при розрахунку теплового стану.

Для визначення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності α_{egv} для труб з відкладеннями (рис. 1) використовується вираз (1) (труба з відкладеннями розглядається як багат шарова циліндрична стінка)

$$\alpha_{egv} = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1} + \ln \frac{d_1}{d_{def}}}{\frac{1}{\alpha_t} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{def}} \ln \frac{d_1}{d_{def}}} \quad (1)$$

На рис.2 показана залежність коефіцієнта еквівалентної теплопровідності труби судових котельних установок від товщини шару і значення коефіцієнта теплопровідності відкладень.

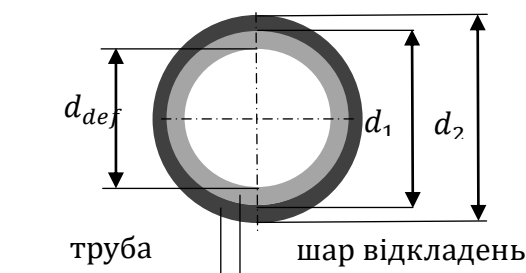


Рисунок 1 – Труба судової котельної установки з шаром накипу та відкладень

Аналіз графіків на рис. 2 показує, що зі збільшенням товщини шару відкладень значення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності труб суднових котельних установок зменшується. Зниження коефіцієнта теплопровідності відкладень викликає додаткове зниження коефіцієнта еквівалентної теплопровідності.

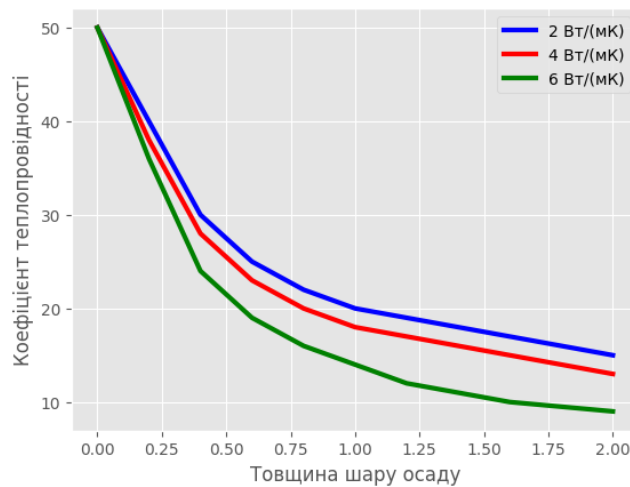


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта еквівалентної теплопровідності від товщини осадового шару труб суднових котельних установок

Практично незалежно від температури зовнішніх поверхонь труб, тепловий потік, який проходить через них в суднових котельнях, залежить в основному від конструкції котельні, умов контакту фаз та інших факторів, що не пов'язані зі станом їх внутрішніх поверхонь. Тому тепловий потік, що проходить через труби в суднових котельнях, буде майже однаковим, якщо порівняти чисту трубу та трубу з накипом. Отже, кількість тепла, передається по поверхні труб, в обох випадках буде однаковою; зміниться тільки значення температури напору Δt . Для чистої труби суднових котельних установок це значення буде значно менше, ніж для труби, що містить накип.

Щільність теплового потоку q , що залежить від коефіцієнта теплопровідності α_{egv} і температури напору між зовнішньою і внутрішньою поверхнями труби суднових котельних установок з відкладеннями, можна визначити за виразом

$$q = \frac{2\alpha_{egv}\Delta t}{d_2 \ln \frac{d_2}{d_{def}}} \quad (2)$$

При постійному зовнішньому діаметрі труби d_2 і незначно мінливому співвідношенні $\frac{d_{def}}{d_2} \approx \frac{d_1}{d_2}$ підтримується сталість значення теплового потоку при постійному значенні продукту $\alpha_{egv}\Delta t$. З огляду на цю обставину, легко визначити, наскільки буде змінюватися температура між зовнішньою і внутрішньою поверхнею зі збільшенням товщини осадового шару труби суднових котельних установок

$$\Delta t = \frac{d_2 \ln \frac{d_2}{d_{def}}}{2\alpha_{egv}} q \quad (3)$$

На рис. 3 наведена залежність різниці температур Δt від теплового навантаження і коефіцієнта еквівалентної теплопровідності. З рис. 3 видно, що зі збільшенням товщини шару відкладень і зменшенням коефіцієнта їх теплопровідності різниця температур в товщині стінки труби суднових котельних установок збільшується. Збільшення теплового навантаження на зовнішню поверхню труби також призводить до збільшення різниці температур по товщині стінки труби.

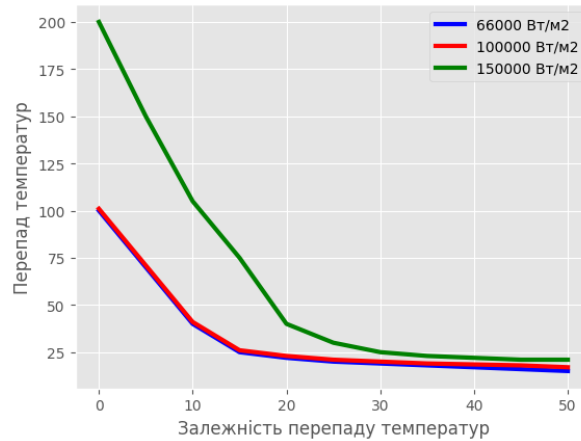


Рисунок 3 – Залежність різниці температур перетину труби суднових котельних установок від коефіцієнта еквівалентної теплопровідності

На рис. 4 показано вплив товщини осадового шару на різницю температур по товщині стінки труби суднових котельних установок. З рис. 4 видно, що зі збільшенням товщини осадового шару різниця температур товщини стінки труби збільшується. Тому, щоб підвищити температуру внутрішньої поверхні труби суднових котельних установок, яка знижується в результаті утворення відкладень, необхідно своєчасно збільшувати інтенсивність теплообміну, а при досягненні різниці температур по товщині стінки труби певного критичного значення – виводити з експлуатації.

З урахуванням співвідношень (1), (3) отримується залежність тривалості експлуатації труби суднових котельних установок перед очищенням внутрішньої поверхні від шару опадів

$$\tau_t = \frac{1.929 \cdot 10^3 d_1}{a} \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^b \right], \quad (4)$$

де a – інтенсивність утворення накипу;

b – const, що залежить від теплофізичних властивостей відкладень, матеріалу труб суднових котельних установок і різниці температур в товщині стінки труби.

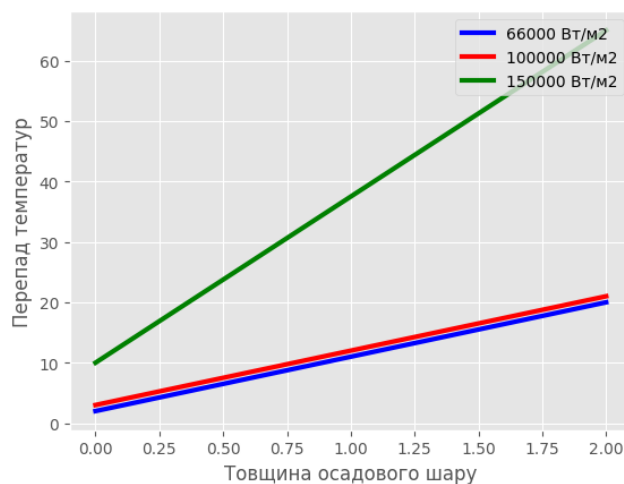


Рисунок 4 – Залежність різниці температур по перетину труби суднових котельних установок від товщини осадового шару

Коефіцієнт, що було розраховано, використовується для визначення терміну служби труб в суднових котельних установках до очищення їх внутрішньої поверхні від осадового шару. Залежності між тривалістю експлуатації труб та інтенсивністю утворення накипу та допустимою різницею температур в товщині стінок труб були отримані за допомогою кореляції (4). На рис. 5 зображена залежність тривалості експлуатації труб у суднових котельних установках перед очищенням внутрішньої поверхні від інтенсивності утворення накипу. З рис. 5 можна зрозуміти, що зі збільшенням інтенсивності утворення накипу термін служби труб в суднових котельних установках до очищення скорочується.

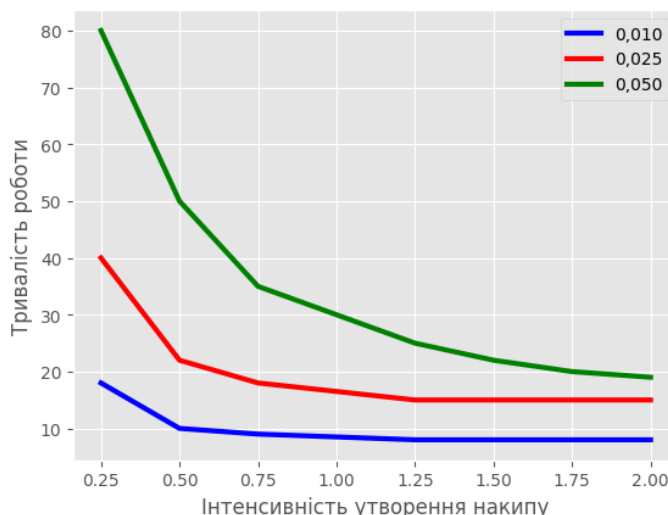


Рисунок 5 – Залежність тривалості роботи труб суднових котельних установок від інтенсивності утворення накипу

При визначенні допустимої різниці температур в стінці труби суднових котельних установок необхідно враховувати процес утворення накипу всередині труб. Для опису методів дослідження був використаний метод регулярного теплового режиму першого роду, який відрізняється простотою залежностей розрахунку, вимірювальної апаратури та експериментів. При застосуванні цього методу основною вимірюваною величиною є швидкість охолодження, яка характеризує відносну швидкість зміни температури тіла в часі.

Розрахункова залежність для експериментального визначення швидкості охолодження виглядає таким чином

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_1 - \tau_2}, \quad (5)$$

де ϑ – надлишкова температура;

τ – поточний час.

Щоб визначити тепловий опір плівки, використовується формула

$$R_{\alpha_{egv}} = \frac{F'}{C'm} - \frac{1}{\omega}, \quad (6)$$

де m – швидкість охолодження досліджуваного зразка;

F' - площа поверхні зразка;

C' - теплоємність зразка;

ω – коефіцієнт теплопередачі зразка.

Коефіцієнт тепловіддачі плівки розраховується за виразом

$$k_{egv} = \frac{1}{Ra_{egv}}. \quad (7)$$

Таким чином, проведене моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб суднових котельних установок базується на сукупності виразів (1) – (7).

Висновки. У даній статті було проведено дослідження впливу накипу на термін служби труб суднових котельних установок. Для цього було створено математичну модель теплообміну в залежності від товщини шару та складу відкладень на внутрішній поверхні труб. Було досліджено вплив товщини шару на тепловий стан труб та встановлено, що з метою зниження температури поверхні труби, необхідно підвищувати інтенсивність теплообміну. Було отримано залежності для визначення температурного ресурсу експлуатації труб в умовах наявності накипу на їх внутрішніх поверхнях у складних умовах суднових котельних установок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jiang D., Yu H., Wang Z. et al. Influence of Exhaust Temperature and Flow Velocity of Marine Diesel Engines on Exhaust Gas Boiler Heat Transfer Performance. *Sustainability*. 2022. Vol. 15. P. 753. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010753>. (date of access: 15.12.2023).
2. Men Y., Liu X., Zhang T. Performance research and application of the vapor pump boiler equipped with flue gas recirculation system. *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 254. P. 115201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115201>. (date of access: 05.12.2023).
3. Pal J., Sapali S., Anil T.R. et al. Exergy Criteria of Performance of Waste Heat Recovery Applied for Marine Auxiliary Boiler. *International Journal of Heat and Technology*. 2022. Vol. 40. P. 297–303. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.400135>. (date of access: 19.12.2023).
4. Behrendt C. Development of main marine boilers' structures. In : GEOLINKS2019. 2019. B1/VI/13. (date of access: 11.12.2023).
5. Behrendt C., Jasiewicz R., Szczepanek M., Szmukała M. Combustion of petroleum waste in the marine boilers – Waste preparation technologies and exhaust emission. Part 1: *Preparation technologies and their influence on waste morphology*. *Fuel*. 2021. Vol. 305. P. 120966. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120966>. (date of access: 07.12.2023).
6. Itami Y., Nishikawa E., Kamata T. et al. Behavior of Mg hardness in Boiler Water of Marine Auxiliary Boilers. *Journal of the marine engineering society in japan*. 1998. Vol. 33. P. 759–763. DOI: <https://doi.org/10.5988/jime1966.33.759>. (date of access: 02.12.2023).
7. Wang J.-Z., Wu S.-H., Ji Q.-Z. Heat balance calculation of a turbo-charged marine boiler. 2006. P. 470–472. (date of access: 17.12.2023).
8. Behrendt C., Szczepanek M. Effect of Waste Heat Utilization on the Efficiency of Marine Main Boilers. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 9203. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15239203>. (date of access: 12.12.2023).

REFERENCES

1. Jiang, D., Yu, H., Wang, Z., et al. (2022). Influence of exhaust temperature and flow velocity of marine diesel engines on exhaust gas boiler heat transfer performance. *Sustainability*, 15, 753. <https://doi.org/10.3390/su15010753>
2. Men, Y., Liu, X., & Zhang, T. (2022). Performance research and application of the vapor pump boiler equipped with flue gas recirculation system. *Energy Conversion and Management*, 254, 115201. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115201>
3. Pal, J., Sapali, S., Anil, T. R., et al. (2022). Exergy criteria of performance of waste heat recovery applied for marine auxiliary boiler. *International Journal of Heat and Technology*, 40, 297–303. <https://doi.org/10.18280/ijht.400135>
4. Behrendt, C. (2019). Development of main marine boilers' structures. In GEOLINKS2019 (B1/VI/13).

5. Behrendt, C., Jasiewicz, R., Szczepanek, M., & Szmukała, M. (2021). Combustion of petroleum waste in the marine boilers – Waste preparation technologies and exhaust emission. *Part 1: Preparation technologies and their influence on waste morphology*. *Fuel*, 305, 120966. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120966>
6. Itami, Y., Nishikawa, E., Kamata, T., et al. (1998). Behavior of Mg hardness in boiler water of marine auxiliary boilers. *Journal of the Marine Engineering Society in Japan*, 33, 759–763. <https://doi.org/10.5988/jime1966.33.759>
7. Wang, J.-Z., Wu, S.-H., & Ji, Q.-Z. (2006). Heat balance calculation of a turbo-charged marine boiler (pp. 470-472).
8. Behrendt, C., & Szczepanek, M. (2022). Effect of waste heat utilization on the efficiency of marine main boilers. *Energies*, 15, 9203. <https://doi.org/10.3390/en15239203>

Voichenko T.O., Himpel R.M., Shevchenko A.P., Mannapova O.V.

MODELLING AND STUDYING THE EFFECT OF DEPOSITS ON THE CONDITION OF PIPES OF SHIP BOILER SYSTEMS

The purpose of the article is to carry out modeling and research of the impact of deposits on the condition of pipes to increase the effectiveness of protection against corrosion and the formation of scale on the heating surfaces of ship boilers. The goal is achieved by analyzing the features of scale formation and deposits. It has been established that when using water containing a large amount of minerals, solid sediments, called scale, can form in ship boilers during their operation. This scale has high strength, but has low thermal conductivity, which can lead to technical problems and increased maintenance costs for ship boilers. When calculating the thermal state of pipes, the thermal resistance of deposits is usually considered constant (often zero), not taking into account the fact that at the beginning of operation, the surfaces of the pipes were clean and worked in different conditions than at the end of their service life. Therefore, in order to properly estimate the service life of pipes, it is necessary to take into account the thickness of the layer of deposits and their composition when calculating the thermal state of the pipes. The most significant result is the determination of the dependences of the coefficient of equivalent thermal conductivity on the thickness of the sediment layer on the pipes of ship boiler plants, the difference in temperature of the pipe section of ship boiler plants from the coefficient of equivalent thermal conductivity, the difference in temperature across the pipe section of ship boiler plants from the thickness of the sediment layer and the duration of operation of the pipes of ship boiler plants from scale formation intensity. The results of the research can be used to develop methods for monitoring the condition of pipes and planning their replacement, which will increase the efficiency of operation of ship boiler plants. The proposed approach to sediment modeling can be applied to assess the thermal state of not only the pipes of ship boiler plants, but also the pipelines of other systems during their long-term operation period. Modeling and research of the effect of deposits on the condition of pipes of ship boilers is based on the set of mathematical expressions proposed in the article.

Keywords: ship boiler plant, modelling, deposits, scale, sediment, heating, thermal conductivity, pipe, coefficient, temperature.