

О.Акімов. Інтенсивність теплопередавання та вплив товщини шару забруднень низькотемпературних поверхонь нагріву при спалюванні водопаливних емульсій у котлах / О.Акімов // Вісник ТНТУ. — 2014. — Том 73. — № 1. — С.93-101. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 621.181

О. Акімов

Херсонська державна морська академія

ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАВАННЯ ТА ВПЛИВ ТОВЩИНИ ШАРУ ЗАБРУДНЕНЬ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ У КОТЛАХ

***Резюме.** Отримано залежності товщини шару забруднень на низькотемпературних поверхнях нагріву котлів при спалюванні водопаливних емульсій з водовмістом до 30%. З урахуванням густини, пористості й стану шару забруднень отримано залежності коефіцієнта теплопровідності шару забруднень та коефіцієнтів забруднення й теплової ефективності на низькотемпературних поверхнях нагріву котлів при спалюванні водопаливних емульсій. Аналіз отриманих залежностей показав, що у порівнянні зі спаленням у котлах стандартного палива, спалення водопаливної емульсії дозволяє знизити товщину шару забруднень, підвищити коефіцієнт теплопровідності шару, в результаті чого істотно знижується коефіцієнт забруднення та зростає коефіцієнт теплової ефективності поверхні нагріву.*

***Ключові слова:** котел, водопаливна емульсія, низькотемпературна поверхня нагріву, забруднення, теплова ефективність.*

O. Akimov

HEAT-TRANSFER RATE AND INFLUENCE OF LAYER THICKNESS OF CONTAMINATIONS OF LOW TEMPERATURE HEAT SURFACES WHILE BURNING WATER FUEL EMULSIONS IN BOILERS

***Summary.** While burning in boilers water fuel emulsions on the basis of fire-box fuel oil with 30% content of water heat-transfer rate, is of great importance caused by the thickness of the layer of contaminations on the low temperature heat surfaces and by physical and chemical processes, which take place in this layer of contaminations, which consists of particles of ash and soots deposited on low temperature heat surfaces, and from corrosion products of metallic low temperature heat surfaces. Aerodynamic resistance of low temperature heat surfaces depends on the thickness of layer contamination, that influences substantially the periodicity of their cleaning. While burning water fuel emulsions in boilers the phenomenon of «microexplosion» of emulsion drops, which is accompanied by the improvement of spraying and decreasing of ash and soot sizes deposits in the stream of smoke gases, takes place. Thus, particles of greater size, while be deposited at first on low temperature heat surfaces and smaller ones will be taken away by gases inertially or locate between particles, which deposited on low temperature heat surfaces. To study and estimate the heat transfer and testify the decrease of contamination intensity of low temperature heat surfaces while burning water fuel emulsions with content of water 30%, analytical researches were conducted taking into account the experimental data. Dependences of the contamination layer thickness on the low temperature heat surfaces of boilers while burning water fuel emulsions with contents of water 30%, taking into account the density, porosity and nature of contaminations layer, where obtained: dependences of heat-conducting coefficients of the contaminations layer and contamination coefficients and thermal efficiency of low temperature heat surfaces of boilers while burning water fuel emulsions were analysed. The analysis of obtained dependences testified that in comparing with burning in the boilers of conventional fuels, burning of water fuel emulsions allows to reduce the layer thickness of contaminations, to raise the heat-conductivity coefficients of layer, which results in sufficient decrease of the contamination coefficient and growth of thermal efficiency coefficient of heat surface.*

***Key words:** boiler, water fuel emulsion, low temperature heat surface, contamination, thermal efficiency.*

Постановка проблеми. При спалюванні в котлах водопаливних емульсій на основі топкового мазуту з умістом води до 30% важливим є інтенсивність теплопередавання, яка зумовлюється товщиною шару забруднень на

низькотемпературних поверхнях нагріву та фізико-хімічними процесами, що протікають у цьому шарі забруднень. Він складається з частинок золи та сажі, що осідають на НТПН, а також з продуктів корозії металевої поверхні НТПН. Від товщини шару забруднення залежить аеродинамічний опір НТПН, що істотним чином впливає на періодичність проведення їх очищень. Частинки золи і сажі осідають на поверхню з потоку димових газів під дією різних сил, у першу чергу аеродинамічних. При спалюванні ВПЕ в котлах спостерігається явище «мікробибухів» краплин емульсії, що супроводжується покращенням розпилу та зменшенням розмірів частинок золи і сажі в потоці димових газів. Таким чином, на НТПН будуть відкладатися, в першу чергу, частинки більшого розміру, а дрібніші або інерційно виносяться з газами, або ж займають місце між частинками, що осіли на НТПН. Для вивчення та оцінювання теплопередавання й підтвердження зниження інтенсивності забруднення НТПН при спалюванні ВПЕ з водовмістом 30% були проведені аналітичні дослідження з урахуванням отриманих експериментальних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням забруднення НТПН котлів та вивчення фізико-хімічних явищ і теплових характеристик продуктів корозії металу й шару забруднень на НТПН котлів присвячені праці А.К. Внукова [1], Г.В. Проценка [2], В.Ш. Магадєєва [3], А.Ф. Гаврилова [4], а також [5]. Проте дослідження проводилися при спалюванні в котлах стандартного палива, зокрема топкових мазутів, уміст води в яких складав близько 2%. Питанням спалювання в котлах ВПЕ на основі мазутів присвячено небагато праць, однак у них відсутні конкретні кількісні дані з інтенсивності теплопередавання НТПН й товщини шару відкладень на НТПН котлів при спалюванні ВПЕ.

Мета досліджень. Визначення розрахункових залежностей товщини шару забруднень, що утворюється на НТПН котлів при спалюванні ВПЕ з умістом води до 30%. Проведення аналітичних досліджень впливу товщини шару відкладень на інтенсивність теплообміну з урахуванням особливостей фізико-хімічних процесів.

Результати досліджень. На основі отриманих результатів експериментальних досліджень кінетики забруднення НТПН [6] визначаємо товщину забруднень δ_3 за різних умов і кінетику їх зміни впродовж часу дії потоку димових газів, що містять пари сірчаної кислоти і тверді частки золи і сажі. Для цього необхідно знати реальну густину цих забруднень (так звану насипну масу) з урахуванням геометричних параметрів системи твердих часток, які осідають з потоку димових газів на поверхню металу, що кородує. Внаслідок проходження процесів корозії наростання шару відкладень супроводжується зростанням шару сульфатів. Ці два процеси визначають зростання шару забруднень.

Шар відкладень є дисперсною структурою. Відкладення можна розглядати як порошок, особливо при температурах стінки вище ТТР пари сірчаної кислоти, який складається з багатьох часток різних розмірів, що осіли з потоку димових газів, а також з продуктів корозії металу поверхні нагріву.

Як вказано в [7], будь-які порошки характеризуються пористістю, тобто об'ємом порожнин між частками. Співвідношення твердої складової і порожнин в одиниці об'єму таких матеріалів є показником міри упаковки порошку, характеристикою стану дисперсного або пористого тіла, яке часто є визначальним для знаходження реальної щільності шару забруднень, а потім їх товщини. Міра упаковки залежить від стану і розмірів часток, з яких складається шар забруднень.

Коефіцієнт упаковки монофракції сферичних часток складає $k_{v1}=0,635$ [8]. Порозність відповідно дорівнює $\Pi_1=0,365$. Від розміру частинок d_{ch} ці параметри не залежать, якщо розмір місткості, в яку засипається порошок, не менше, ніж у 10 разів більше d_{ch} [8]. Ця умова виконується при утворенні шару забруднень на конвективній поверхні нагріву при спалюванні стандартного мазуту з водовмістом $W^r=2\%$.

Коефіцієнт упаковки збільшиться, якщо в проміжках між частками основної фракції розмістяться частки другої монофракції, яку називають додатковою до першої. Подальшим кроком в утворенні шару відкладень можна розглядати розміщення третьої монофракції між частками першої і другої монофракції.

Частка кожної наступної фракції має бути визначеною, інакше ефект заповнення порожнеч буде неповним. У [7] прийнято, що кожна наступна додаткова фракція заповнюватиме в порошок порожнину, що залишилася, з одним і тим же коефіцієнтом упаковки $k_{v1}=0,635$.

Реальні порошки мають полідисперсний склад, часто з нормальним розподілом часток за розмірами. Їх упаковка вища, ніж у монодисперсного порошку. Методики точних розрахунків міри упаковки полідисперсних порошоків за відомим розподілом часток порошку немає [7]. Були проведені аналітичні дослідження [9] порівняння даних експериментальних досліджень [7] насипної густини порошку і результатів напівемпіричних розрахунків міри упаковки того ж порошку з урахуванням зіставлення реальних розмірів твердих часток у відкладеннях при водовмісті ВПЕ W^r до 30%. Результати досліджень [9] показали, що насипна густина сумішей без ущільнення практично не залежить від фракційного складу порошку. При полідисперсному характері розподілу часток, які мають форму кулі (розміщення часток меншого діаметру між частками більших діаметрів) при початковій кубічній упаковці часток і чотирьох значеннях діаметрів часток максимальне значення пористості при дотичних порах складе $K_1=0,809$, а за наявності перегородок $K_1=0,737$ [8]. У разі ідеального розподілу часток у чотиривимірній гексагональній решітці досягається межа пористості $K_1=0,812$ [8].

На основі проведених досліджень і літературних даних [10] прийнято, що при проведенні розрахунків густини відкладень при спалюванні стандартного мазуту з $W^r=2\%$, коли утворюються крупні тверді частки, міра упаковки знаходиться на рівні 0,67, а при спалюванні ВПЕ з $W^r=30\%$, коли розміри часток істотним чином зменшуються, міра упаковки поступово збільшується до 0,89. Достовірність прийнятих допущень оцінювали за остаточними результатами визначення коефіцієнта забруднення ε_3 , який являє собою відношення товщини шару забруднень δ_3 до їх еквівалентного коефіцієнта теплопровідності λ_{ε_3} .

Проведені розрахункові дослідження густини забруднень різного складу залежно від водовмісту ВПЕ W^r з урахуванням їх насипної густини, представлені в [9], дають можливість визначати середні значення товщини шару забруднень при відомій масі забруднень. Характер отриманих залежностей пояснюється зростанням міри упаковки часток у шарі зі збільшенням водовмісту спалюваного палива.

При визначенні товщини шару забруднень δ_3 було прийнято допущення, що маса сульфатів є суцільним щільним шаром з реальною густиною. Інша маса забруднень – це пористий шар відкладень з насипною густиною. Таке рішення підтверджується зовнішнім виглядом шару забруднень при спалюванні ВПЕ, що спостерігалось при проведенні експериментів.

Згідно з результатами, отриманим в [9], зростання товщини шару забруднень при температурі стінки 110°C показує, що при переході на спалювання ВПЕ з $W^r=30\%$ значення товщини шару забруднень (при розрахунку за насипною густиною шару відкладень) збільшуються в порівнянні з товщиною шару, визначеною за теоретичною густиною. Необхідно відзначити, що розрахункові значення середньої товщини шару забруднень δ_3 (що складається з підшарів сульфатів, відкладень і продуктів корозії металу НТПН) за насипною густиною для режиму спалювання мазуту з $W^r=2\%$, відповідають опублікованим даним при $\tau=1000$ годин [11, 12], що підтверджує достовірність отриманих даних при спалюванні ВПЕ і стандартного палива, оскільки методика оцінювання однакова.

На підставі отриманих експериментальних даних з інтенсивності забруднень при різних значеннях температури стінки $t_{ст}$ [13] і розрахованих значеннях насипної густини шару забруднень при відповідних станах шарів, які враховують зміни кількості H_2SO_4 , шару сульфатів з урахуванням валентності заліза і концентрації кислоти у відкладеннях, отримано залежність δ_3 від $t_{ст}$ при $\tau=1000$ годин (рис.1).

Змінний характер залежності δ_3 від $t_{ст}$, зумовлений різним станом шару забруднень (від сухого до мокрого з проміжною ділянкою з парокислотною сумішшю), вказує на необхідність визначення значень δ_3 для кожного відповідного діапазону значень $t_{ст}$ і вимагає відповідно проведення розрахунків по зонах конвективних поверхонь залежно від значення $t_{ст}$.

Для розрахунків інтенсивності теплопередавання необхідно визначити величину середнього значення коефіцієнта забруднень ϵ_3 , який входить у рівняння коефіцієнта теплопередавання і визначається з урахуванням термічного опору шару (δ_3/λ_{e3}), тобто відносно товщини шару забруднень δ_3 до еквівалентної теплопровідності шару λ_{e3} . Отримані експериментальні інтенсивності забруднень при різних температурах стінки $t_{ст}$ [13], за якими розраховані середні значення δ_3 і побудовані залежності товщини шару забруднень δ_3 від $t_{ст}$ при $W^r=2\%$ і $W^r=30\%$ (рис.1), дають можливість визначити значення коефіцієнтів забруднень ϵ_3 при різних температурах стінки, якщо будуть визначені значення теплопровідності забруднень за цих же умов.

Враховуючи складну структуру і багатокомпонентний склад забруднень на НТПН, для визначення значень коефіцієнтів забруднення ϵ конвективних НТПН потрібне знаходження еквівалентних коефіцієнтів теплопровідності λ_{e3} для кожної зони температур стінки, від яких залежить розподіл температур по товщині шару.

Проведені розрахункові дослідження теплопровідності для трьох випадків станів забруднень на поверхні нагріву з урахуванням прийнятої фізичної моделі структури забруднень: шар відкладень на шарі оксидів і сульфатів сухий (простір між частками заповнений димовими газами); шар відкладень заповнений конденсатом сірчаної кислоти; шар відкладень з перегрітими парами, парорідинною сумішшю і конденсатом сірчаної кислоти [14]. У результаті проведених розрахункових досліджень [14] отримано значення еквівалентного коефіцієнта теплопровідності λ_{e3} залежно від $t_{ст}$ для трьох варіантів стану шару відкладень при спалюванні стандартного палива з $W^r=2\%$ і ВПЕ з $W^r=30\%$ (рис.2).

Отримані залежності показують, що значення еквівалентного коефіцієнта теплопровідності забруднень залежить від упаковки і розмірів часток у шарі, складу й властивостей середовища, що заповнює порожнини, при відповідних температурах стінки і пористості. Зі збільшенням вологості відкладень теплопровідність зростає.

При спалюванні ВПЕ теплопровідність шару вище у зв'язку зі збільшенням упаковки відкладень і зменшенням концентрації кислоти (при зменшенні концентрації теплопровідність кислоти збільшується [15]).

Отримані залежності середньої товщини забруднень δ_3 від часу впливу потоку димових газів [9] і від температури стінки (рис.1), а також значення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності λ_{e3} від стану забруднень, які також залежать від величини $t_{ст}$ (рис.2), дають можливість побудови залежностей коефіцієнтів забруднення ϵ_3 від $t_{ст}$ (рис.3). Отримані залежності показують, що при однакових значеннях $t_{ст}$ при спалюванні ВПЕ з $W^r=30\%$ значення коефіцієнтів забруднення ϵ_3 істотно нижче, ніж при спалюванні стандартного палива з $W^r=2\%$: в зоні мокрих забруднень – у 5 разів; у зоні сухих забруднень – у 6 разів.

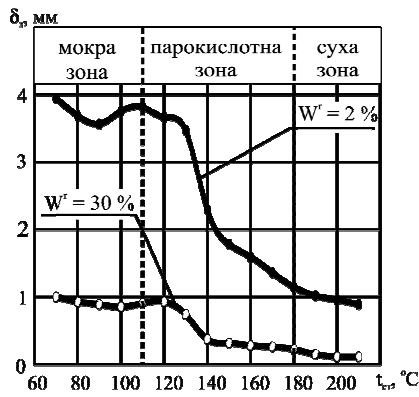


Рисунок 1
Figure 1

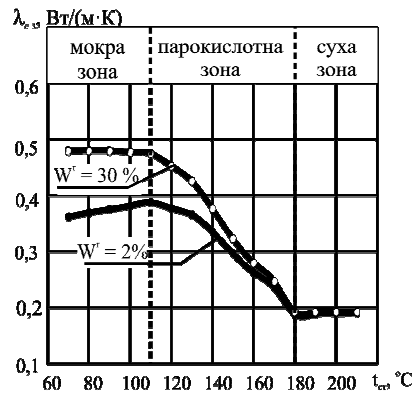


Рисунок 2
Figure 2

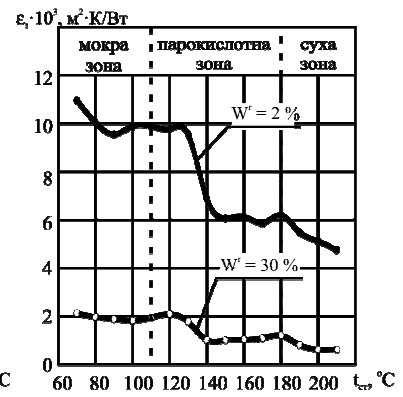


Рисунок 3
Figure 3

Рисунок 1. Залежність товщини забруднень δ_3 від температури стінки при спалюванні стандартного мазуту ($W^f=2\%$) і ВПЕ ($W^f=30\%$)

Figure 1. Dependence of thickness of contaminations δ_3 from wall temperature at incineration of standard fuel oil ($W^f=2\%$) and WFE ($W^f=30\%$)

Рисунок 2. Залежність еквівалентної теплопровідності шару забруднень λ_3 від температури стінки при спалюванні стандартного мазуту ($W^f=2\%$) і ВПЕ ($W^f=30\%$)

Figure 2. Dependence of equivalent layer heat-conducting of contaminations λ_3 from wall temperature at incineration of standard fuel oil ($W^f=2\%$) and WFE ($W^f=30\%$)

Рисунок 3. Залежність коефіцієнта забруднень ϵ_3 від температури стінки при спалюванні стандартного мазуту ($W^f=2\%$) і ВПЕ ($W^f=30\%$)

Figure 3. Dependence of contaminations coefficient ϵ_3 from wall temperature at incineration of standard fuel oil ($W^f=2\%$) and WFE ($W^f=30\%$)

Усі дослідження процесів забруднення НТПН проводилися на експериментальній установці при швидкості димових газів у пучках труб-зразків близько 7 м/с. Тому трапляється нагода зіставити значення ϵ при цій швидкості, отримані при спалюванні необводненого рідкого палива з $W^f=2\%$, з нормативними даними [16], представленими на рис.4 (точками показані значення ϵ , отримані за результатами експериментально-розрахункових досліджень).

Порівняння даних підтверджує достовірність проведених експериментальних досліджень процесів забруднення при спалюванні палива з $W^f=2\%$, оскільки отримані значення ϵ_3 при швидкості газів 7 м/с знаходяться в зоні значень, рекомендованих у [16]. Отже, слід вважати достовірними і результати аналогічних досліджень при спалюванні ВПЕ з $W^f=30\%$, проведених на одній експериментальній установці за однаковою методикою, по яких немає даних в науковій і технічній літературі. Отримані значення ϵ_3 підтверджують достовірність прийнятої методики розрахунку пористості шару забруднень, а також набутої форми твердих часток, що прийняті в [14].

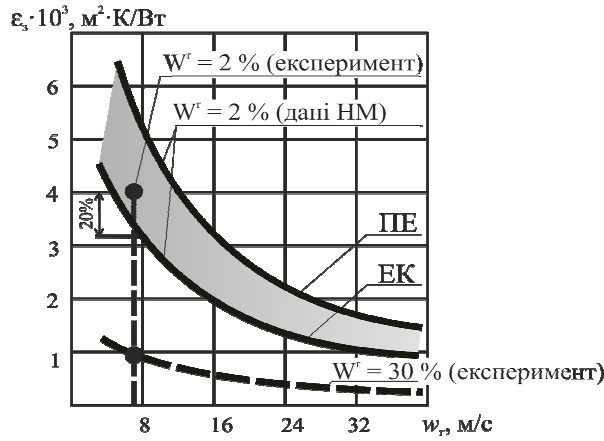


Рисунок 4. Залежність коефіцієнта забруднень від швидкості газів: НМ – нормативний метод [16]; ПЕ – зона пароперегрівача; ЭК – зона економайзера

Figure 4. Dependence of contaminations coefficient on speed of gases: NM – normative method [16]; PE – an area of superheater; ЭК – an area preheater

При однаковій температурі стінки і швидкості газів коефіцієнт забруднення ϵ_3 при спалюванні ВПЕ менше в 3,4 раза в порівнянні з режимом спалювання стандартного палива при $W^r=2\%$, що відповідно повинно збільшити величину коефіцієнта теплопередавання k .

Знайдені залежності коефіцієнтів забруднення ϵ_3 (рис.3 і 4), розглянуті рекомендації за визначенням коефіцієнтів тепловіддавання по газовій стороні, дають можливість визначати значення коефіцієнтів теплопередавання k .

За допомогою комп'ютерного моделювання проведено розрахункові дослідження і побудовано залежності коефіцієнтів теплопередачі k від температури поверхні нагріву (рис.5). Для отримання значень коефіцієнтів теплової ефективності визначено значення коефіцієнта теплопередавання k для чистої поверхні нагріву і поверхні нагріву з шаром забруднень.

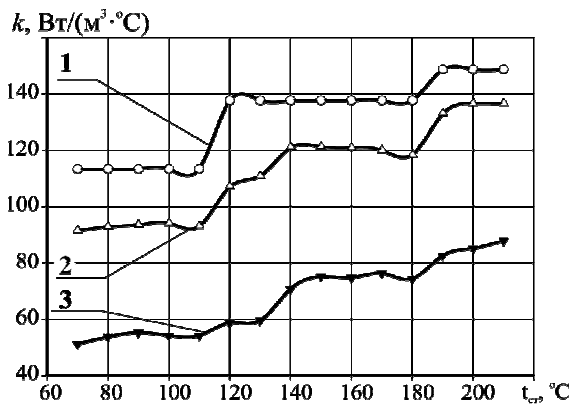


Рисунок 5. Залежність коефіцієнта теплопередачі k чистої (лінія 1) і забрудненої поверхні нагріву від температури стінки $t_{ст}$ при спалюванні стандартного палива ($W^r=2\%$) (лінія 3) і ВПЕ ($W^r=30\%$) (лінія 2)

Figure 5. Dependence of heat transfer coefficient k by clean (line 1) and muddy heating surface from the wall temperature $t_{ст}$ at incineration of standard fuel ($W^r=2\%$) (line 3) and WFE ($W^r=30\%$) (line 2)

Отримані за однакових умов розрахункові залежності коефіцієнтів теплової ефективності ζ (відношення коефіцієнтів теплопередавання забрудненої і чистої поверхонь) [17, 18, 19] наведено на рис.6.

Отримані залежності показують, що при спалюванні ВПЕ з $W^r = 30\%$ значення інтенсивності теплопередавання на НТПН вище практично в 2 рази у порівнянні зі спалюванням стандартного палива з $W^r = 2\%$.

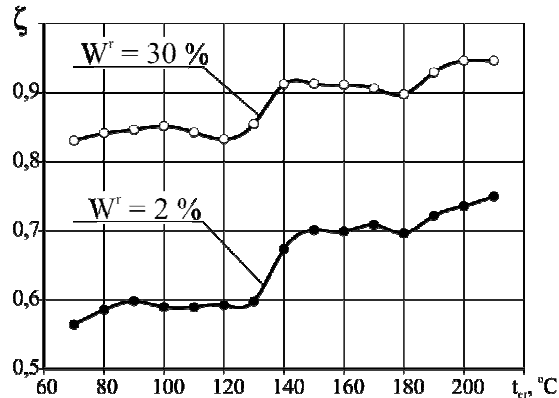


Рисунок 6. Залежність коефіцієнта теплової ефективності ζ від температури стінки t_{ct} при спалюванні стандартного палива ($W^r = 2\%$) і ВПЕ ($W^r = 30\%$)

Figure 6. Dependence of thermal efficiency coefficient ζ from the wall temperature t_{ct} at incineration of standard fuel ($W^r = 2\%$) and WFE ($W^r = 30\%$)

Отже, при однаковій швидкості газів ефективність теплопередавання при спалюванні ВПЕ вища, що при однаковій тепловій потужності призведе до зменшення поверхні нагріву, а значить числа рядів труб (по ходу газів) і величини аеродинамічного опору.

Результати розрахунків величин δ_3 при температурі стінки $100 \dots 110^\circ\text{C}$ (в області «кислотного піку»), наведено на рис.1, показують, що зі зростанням умісту води у ВПЕ до 30% унаслідок зменшення концентрації в газовому потоці твердих частинок (одній зі складових забруднення) в 3 рази [13], зниження швидкості корозії в 3,5 рази, яка визначає товщину шару сульфатів [14], має місце зменшення товщини забруднення (по насипній густині) майже в 4 рази. Цей ефект формується також під впливом акустичних хвиль, постійно генерованих завдяки «мікробибухам» крапель ВПЕ, що забезпечує постійне (за визначенням в [14]) «слабке» очищення НТПН і збільшує період між проведеннями чищення поверхонь нагріву котлів, які працюють на ВПЕ.

Висновки. Для отримання розрахункових залежностей товщини шару забруднень отримано дані з урахуванням густини шару забруднення на НТПН котлів при спалюванні ВПЕ з умістом води до 30%. Проведені аналітичні дослідження впливу товщини шару відкладень на інтенсивність теплообміну з урахуванням фізико-хімічних процесів, що відбуваються у шарі відкладень дали можливість отримати залежності еквівалентного коефіцієнта теплопровідності шару та коефіцієнта забруднення поверхні. За результатами цих досліджень отримано значення коефіцієнтів теплопередавання НТПН, а також коефіцієнтів теплової ефективності поверхонь, які показали збільшення інтенсивності теплопередавання при спалюванні ВПЕ практично у 2 рази у порівнянні зі спаленням стандартного палива. Отримані планується використовувати при теплових розрахунках котлів на ВПЕ, а також для коригування графіків чищення котлів за тепловою ефективністю та аеродинамічним опором НТПН.

Conclusions. Calculation dependences of contaminations layer thickness taking into account the density of contamination layer on boilers low-temperature heat surfaces (LTHS) while burning water-fuel emulsion (WFE) with content of water to 30% have been obtained. Analytical researches of the layer thickness deposits influence on the intensity of heat exchange, taking into account physical and chemical processes, which take place in the layer of deposits, have been carried out which enabled to get dependences of equivalent heat-

conducting coefficient of the layer, and contaminations coefficient of surface. According to these researches the values of heat transfer coefficients of LTHS and coefficients of thermal efficiency of surfaces were obtained, which testified the increase of the heat-transfer rate while burning WFE in 2 times compared with those of burning conventional fuel. These data is to be used in thermal calculations of boilers on WFE, and to correct schedules of boilers cleaning according to the thermal efficiency and aerodynamic resistance of LTHS.

Список використаної літератури

1. Внуков, А.К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов [Текст] / А.К. Внуков. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
2. Проценко, Г.В. Характер отложений на поверхностях нагрева судовых утилизионных котлов [Текст] / Г.В. Проценко // Судостроение. – 1989. – №7. – С. 25 – 28.
3. Магадеев, В.Ш. Коррозия газового тракта котельных установок [Текст] / В.Ш. Магадеев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
4. Гаврилов, А.Ф. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева котельных установок [Текст] / А.Ф. Гаврилов, Б.М. Малкин. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
5. Проектирование судовых парогенераторов [Текст]: учеб. для студ. вузов, обуч. по спец. «Парогенераторостроение» / К.С. Дементьев, В.А. Романов, А.С. Турлаков, Д.И. Волков. – Л.: Судостроение, 1986. – 336 с.
6. Акимов, А.В. Динамика снижения выбросов золы и сажи при сжигании водомазутных эмульсий в котлах [Текст] / А.В. Акимов // Наукові праці: Науково-методичний журнал. – Т.95. – Вип. 82. – Техногенна безпека. — Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. П.Могили, 2008. – С. 39 – 46.
7. Сапелин, Н.А. Влияние геометрических параметров структуры на плотность пористых материалов [Электронный ресурс] / Н.А. Сапелин. – Режим доступа: <http://www.techros.ru/text/3220>.
8. Локтев, И.И. Модель упаковки полидисперсных материалов [Электронный ресурс] / И.И. Локтев. – Режим доступа: http://www-dev.niia.ru/rus/doc/gm_7/19.doc.
9. Акимов, А.В. Определение толщины слоя загрязнений на низкотемпературных поверхностях нагрева судовых котлов при сжигании водотопливных эмульсий [Текст] / А.В. Акимов // Матеріали 4-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО-2013)». – Херсон: ХДМА, 2013. – С. 5 – 8.
10. Волков, А.А. Исследование теплопроводности отложений на низкотемпературной поверхности утилизионного котла [Текст] / А.А. Волков, В.А. Романов, В.И. Щербинкин. – Судостроение. – 1995. – № 6. – С. 22 – 23.
11. Горячкин, В.Ю.. Исследование динамики загрязнений и низкотемпературной коррозии поверхности нагрева в потоке дымовых газов [Текст] / В.Ю. Горячкин, В.В. Судиловский, С.А. Яновский // Вопросы судостроения: Промышленная энергетика, охрана окружающей среды и энергоснабжение судов: ЦНИИ «Румб». – 1980. – Вып. 5. – С. 12 – 15.
12. Цирульников, Л.М. К вопросу прогнозирования загрязнения некорродирующих низкотемпературных поверхностей нагрева парогенераторов при сжигании сернистого мазута [Текст] / Л.М. Цирульников, К.М. Абдуллаев, В.А. Горохов // Изв. вузов: Энергетика. 1978. – №5. – С. 60 – 66.
13. Акимов, А.В. Загрязнение поверхностей нагрева котлов и экологические показатели при сжигании водотопливной эмульсии [Текст] / А.В. Акимов // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Т.73. Вип. 60. Техногенна безпека. — Миколаїв: Вид-во МДТУ ім. П.Могили, 2007. – С. 116 – 125.
14. Половец, Ю.А. Влияние состава отложений на тепловые характеристики низкотемпературных поверхностей нагрева судовых котлов [Текст] / Ю.А. Половец, А.В. Акимов // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2005. – №5 (404). – С. 68 – 77.
15. Амелин, А.Г. Производство серной кислоты [Текст] / А.Г. Амелин. – М.: Химия, 1967. – 472 с.
16. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) [Текст] / Изд. 3-е перераб. и доп. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
17. Промышленные теплообменные процессы и установки: учебник для вузов [Текст] / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов и др.; под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоатомиздат, - 1986. – 328 с.
18. Теплотехнические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник [Текст] / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
19. Рыжков, С.В. К вопросу об определении термического сопротивления слоя отложений на поверхности нагрева [Текст] / С.В. Рыжков // Судостроение и морские сооружения: Судовые

енергетические установки. – 1968. – Вып. 8. – С. 11 – 14.

Отримано 10.02.2014