

3. Gavrilov A.F., Malkin B.M. *Zagrizazhenie i ochistka poverkhnostei nagreva kotel'nykh ustanovok* [Pollution and cleaning of boiler plants heating surfaces]. Moskow, Jenergiya Publ., 1980. 328 p. (Rus.)
4. Sinajskij H.A., Goshej T.A. Ispol'zovanie metoda tjazhelej kavitacii dlja szhiganiya mazuta i orje-mul'sii [Use of a method of heavy cavitation for burning of fuel oil and ore-mulsiya]. *Teploener-getika – Thermal Engineering*, 2003, no.5. pp. 76-81. (Rus.)
5. Gorelov Ju.G., Kazurov V.F. Jeksperimental'noe issledovanie otlozhenija solej na rabochih lopat-kah turbiny pri vpryske v gazovyj potok vody razlichnoj zhestkosti [Pilot study of adjournment of salts on working shovels of the turbine at injection in gas water flow of various rigidity]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2003, no.3. pp. 49-53. (Rus.)
6. Reshetnikov I.P. Sovremennye aspekty utilizacii neftjanyh ostatkov na neftenalivnyh sudah [Modern aspects of utilization of oil residues on oil vessels]. *Trudy TsNIIMF. Temat. vyp. «Toplivois-pol'zovanie i teplotekhnika» – Proceedings of the CNIMF. Thematic issue «Fuel Use and Heat Engineering»*, 1981, no.270, pp. 101-106. (Rus.)
7. Filipshchuk A.N. Vysokotemperaturnaja korrozija pri szhiganii vodomazutnoj jemul'sii [High-temperature corrosion when burning a water black oil emulsion]. *Naukovij visnik Hersons'koї derzhavnoї mors'koї akademii – The scientific bulletin of Kherson state maritime academy*, 2016, no.1(14), pp. 269-281. (Rus.)
8. Filipshchuk A.N. Kinetika vysokotemperaturnoj korrozii stalej pri szhiganii hlorsoderzhashhih topliv [Kinetics of high-temperature corrosion staly when burning chlorine-containing fuels]. *Zbirnik naukovih prac' NUK – NUS Journal*, 2016, no.4, pp. 47-52. (Rus.)

Рецензент: О.В. Щедролюсєв  
д-р техн. наук, проф., ХФ НУК

Стаття надійшла 13.10.2017

УДК 621.181.62:620.193.519.8

© Корнієнко В.С.\*

### ВПЛИВ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВАННЯ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В УТИЛІЗАЦІЙНИХ КОТЛАХ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ

*Наведені результати експериментально-розрахункових досліджень коефіцієнтів забруднення, теплопередачі та теплової ефективності при спалюванні водопаливних емульсій для сухих і конденсаційних поверхонь нагрівання утилізаційних котлів при температурах стінки у діапазоні 70...210°C. Перевірена достовірність отриманих результатів з опублікованими статистичними даними при спалюванні стандартних палив. Отримані значення коефіцієнтів можна використовувати при проектуванні і експлуатації конденсаційних поверхонь нагрівання.*

**Ключові слова:** водопаливні емульсії, забруднення, тепла ефективність, суха поверхня, конденсаційна поверхня.

**Корнієнко В.С. Влияние загрязнения поверхностей нагрева на интенсивность теплопередачи в утилизационных котлах при сжигании водотопливных эмульсий.** Приведены результаты экспериментально-расчетных исследований коэффициентов загрязнения, теплопередачи и тепловой эффективности при сжигании водотопливных эмульсий для сухих и конденсационных поверхностей нагрева утилизационных котлов при температурах стенки в диапазоне 70...210°C. Проверена достоверность полученных результатов с опубликованными статистическими

\* викладач, Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, [kornienkovika1987@gmail.com](mailto:kornienkovika1987@gmail.com)

данными при сжигании стандартных топлив. Полученные значения коэффициентов можно использовать при проектировании и эксплуатации конденсационных поверхностей нагрева.

**Ключевые слова:** водотопливные эмульсии, загрязнения, тепловая эффективность, сухая поверхность, конденсационная поверхность.

**V.S. Kornienko. Influence of heating surfaces pollution on the heat transfer intensity in exhaust gas boilers at water-fuel emulsion combustion.** The heating surfaces pollution layer thickness versus the wall temperature during the 1000-hour flow influence at combustion of fuel-oil and water-fuel emulsions have been obtained. The heat conductivity research for various pollution conditions on the heating surfaces with regard to the accepted pollution structure were carried out. The obtained dependences show that the value of equivalent heat conductivity factor of pollution depends on the porosity, form and size of the particles in the layer composition and properties of the medium that fills the voids between the particles at the appropriate wall temperature. The results of experimental and rated pollution factors, heat transfer and thermal efficiency at combustion water-fuel emulsion for dry and condensing heating surfaces of exhaust gas boilers at wall temperatures over the range 70 to 210°C are presented. Analysis of the research results shows that the combustion of water-fuel emulsions with water content of 30% reduces the layer of heating surfaces pollution and increases the value of heat transfer factor and thermal efficiency. The reliability of the obtained results with published statistical data for the burning standard fuels was verified. The obtained values of factors can be used both in the design and operation of condensing heating surfaces.

**Keywords:** water-fuel emulsion, pollution, thermal efficiency, dry surface, condensing surface.

**Постановка проблеми.** У зв'язку зі зниженням інтенсивності низькотемпературної корозії при спалюванні водопаливних емульсій (ВПЕ) і можливістю установки конденсаційних поверхонь нагрівання в утилізаційних котлах (УК) необхідно дослідження інтенсивності теплопередачі в цих поверхнях. Але відсутні літературні дані про значення коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3 = \delta_3 / \lambda_{екв}$  не тільки конденсаційних, а і сухих утилізаційних поверхонь при спалюванні ВПЕ при підвищених значеннях коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$ .

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В опублікованих даних [1-4] розглянуто розвиток процесів забруднення конвективних поверхонь нагрівання при спалюванні стандартних палив з  $W^r = 2\%$  і представлені значення коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3$  для сухих поверхонь нагрівання [2, 3]. На основі цих даних [2] з врахуванням результатів досліджень [3, 4] розроблені рекомендації щодо проектування конвективних поверхонь [5, 6], де вплив забруднення цих поверхонь приймається однозначно на рівні  $\varepsilon_3 = 0,005 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  [6], а в [5] значення  $\varepsilon_3$  рекомендується приймати в залежності від швидкості газів і призначення поверхні нагрівання. При цьому не розглядаються питання впливу часу дії потоку димових газів на значення  $\varepsilon_3$ .

Як показали проведені експериментальні дослідження [7], при спалюванні ВПЕ швидкість низькотемпературної корозії при  $t_{cm}$  нижче 120...130°C (аж до 70°C) суттєво знижується (до допустимих значень  $\sim 0,25$  мм/рік при  $\tau = 1000$  годин), тому з'являється можливість встановлювати конденсаційні поверхні в УК і допоміжних котлах, і значно підвищити глибину утилізації теплоти газів. Але в публікаціях відсутні дані про значення коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3$  при спалюванні ВПЕ. Ці обставини і обумовили мету роботи.

**Мета статті.** На основі експериментальних досліджень забруднення сухих і конденсаційних поверхонь нагрівання при спалюванні стандартних сірчистих рідких палив з  $W^r = 2\%$  і ВПЕ на їх основі з  $W^r = 17\%$ ,  $W^r = 30\%$ , аналітичних досліджень насипної маси відкладень і еквівалентних коефіцієнтів їх теплопровідності знайти залежності коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3$ , теплопередачі  $k_3$ , теплової ефективності  $\zeta$  від температури поверхні  $t_{cm}$  у діапазоні 70...210°C, які необхідні при проектуванні поверхонь нагрівання УК.

**Виклад основного матеріалу.** Шар забруднень на конденсаційних поверхнях при спалюванні сірчистих мазутів і водомазутних емульсій (ВМЕ) на їх основі (а також сірчистих лег-

ких палив і ВПЕ на їх основі) визначається сумою товщин продуктів корозії (сульфатів) і шаром відкладень твердих частинок (сажі, золи і коксу), які насичені конденсатом кислоти. При визначенні товщини шару забруднень  $\delta_3$  було прийнято припущення, що маса сульфатів створює суцільний щільний шар  $\delta_{сульф}$  з реальною густиною ( $\delta_{сульф} = \Delta G_K / \zeta_{сульф}$ , значення  $\Delta G_K$  знайдені експериментальним шляхом [7]). Інша маса забруднень – це пористий шар відкладень  $\delta_{від}$  з насипною густиною твердих частинок  $\rho_n$ , значення якої визначає величину товщини шару забруднення  $\delta_3$ , що дорівнює відношенню маси всіх відкладень  $\Delta G_3$  до  $\rho_n$  ( $\delta_3 = \Delta G_3 / \rho_n$ ). Значення маси забруднень  $\Delta G_3$  були знайдені експериментальним шляхом [8]. Тоді  $\delta_3 = \delta_{від} + \delta_{сульф}$ .

Насипна густина відкладень залежить від пористості шару з врахуванням геометричних параметрів системи і розподілу твердих частинок в шарі, які осідають з потоку димових газів на корозійну поверхню нагрівання. На основі проведених досліджень та літературних даних [8-10] прийнято, що при спалюванні сухого палива пористість  $\Pi$  знаходиться на рівні 0,3 [10], а при спалюванні ВМЕ з  $W^r = 30\%$  пористість збільшується до 0,48 внаслідок істотного зменшення розмірів частинок, зміни їх форми (з'являються уламки сфер часток внаслідок мікробухвів крапель ВМЕ) і впливу звукового поля, що призводить до зміни укладання часток в шарі [10].

На основі прийнятих припущень і експериментальних даних шляхом проведення розрахункових досліджень можливих товщин шару забруднення  $\delta_3$  були знайдені залежності  $\delta_3 = f(t_{cm})$  (рис. 1) при часі впливу потоку димових газів  $\tau = 1000$  годин.

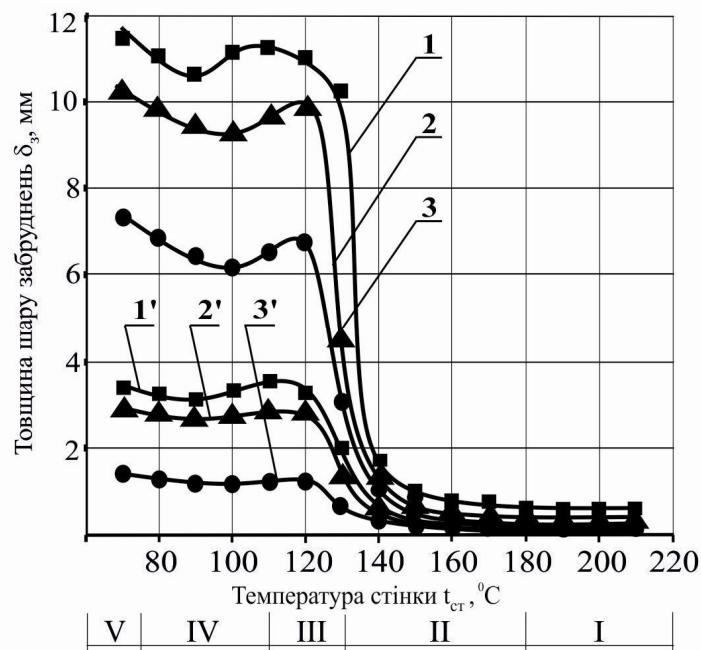


Рис. 1 – Залежність товщини забруднень  $\delta_3$  від температури стінки  $t_{cm}$  при спалюванні: 1 – мазуту ( $W^r = 2\%$ ,  $S^r = 1,8\%$ ); ВМЕ на його основі з: 2 –  $W^r = 17\%$ ; 3 –  $W^r = 30\%$ ; 1' – ДТ+ДЛ ( $W^r = 2\%$ ,  $S^r = 0,98\%$ ); ВПЕ на його основі з: 2' –  $W^r = 17\%$ ; 3' –  $W^r = 30\%$ ; I – суха зона; II – зона адсорбції пари  $H_2SO_4$ ; III – парокислотна зона; IV – зона конденсату кислоти; V – кислотна зона з урахуванням додаткової конденсації пари  $H_2O$

Необхідно відзначити, що розрахункові значення середньої товщини шару забруднень  $\delta_3$  за насипною густиною для режиму спалювання мазуту з  $W^r = 2\%$  відповідають опублікованим даним [2-4] при часі впливу потоку газів  $\tau = 1000$  годин при спалюванні стандартного палива, що підтверджує правомірність прийнятої методики оцінки пористості і визначення  $\delta_3$ , які, крім того, були проконтрольовані шляхом прямих вимірювань товщин. Тому вважаємо, що достовірним є визначення товщини шару забруднень при тих же значеннях  $t_{cm}$  при спалюванні ВМЕ, що розраховані за тією ж методикою при прийнятих припущеннях з урахуванням можливості прямого контролю товщини забруднень.

Змінний характер залежності  $\delta_3$  від  $t_{cm}$ , обумовлений різним станом шару забруднень (від сухого до мокрого з проміжною ділянкою парокислотної суміші), вказує на необхідність визначення значень  $\delta_3$  для кожного відповідного діапазону значень  $t_{cm}$  і вимагає, відповідно, проведення розрахунків конвективних поверхонь по зонах в залежності від значення  $t_{cm}$ . Зменшення  $\delta_3$  в діапазоні температур  $t_{cm} = 105 \dots 80^\circ\text{C}$  зв'язано з появою аерозолу  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , що зменшує інтенсивність конденсації пари кислоти.

З огляду на складну структуру і багатокомпонентний склад забруднень на низькотемпературних поверхнях нагрівання (НТПН), для визначення значень коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3$  конвективних НТПН необхідно знаходження еквівалентних коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda_{екв}$  для кожної зони температур стінки, від яких залежить розподіл температур по товщині шару забруднення і значення  $\varepsilon_3$ .

Були проведені розрахункові дослідження теплопровідності при різних варіантах станів забруднень на поверхні нагрівання з урахуванням прийнятої структури забруднень: 1) сухий шар відкладень на шарі сульфатів (простір між частинками заповнений димовими газами) при  $t_{cm}$  вище  $180^\circ\text{C}$ ; 2) шар відкладень з перегрітими парами кислоти при  $140^\circ\text{C} \leq t_{cm} \leq 180^\circ\text{C}$ ; 3) шар відкладень з парокислотною сумішшю (конденсат і пари сірчаної кислоти); 4) шар відкладень, заповнений конденсатом сірчаної кислоти різної концентрації при  $t_{cm}$  нижче  $110^\circ\text{C}$ ; 5) шар відкладень з конденсатом сірчаної кислоти меншою концентрації внаслідок абсорбції і конденсації пари  $\text{H}_2\text{O}$ .

При визначенні  $\lambda_{екв}$  для ділянки шару з парокислотною сумішшю необхідно враховувати ступінь сухості  $x$  цієї суміші в шарі, а також залежність концентрації  $\text{H}_2\text{SO}_4$  від температури стінки [11]. При температурі стінки  $t_{cm} = 140^\circ\text{C}$  ступінь сухості приймалася рівною 1, при  $t_{cm} = 110^\circ\text{C}$  рівною 0, а при  $t_{cm} = 130^\circ\text{C}$  (кінець зони адсорбції) дорівнює 0,9. Значення  $\lambda_{екв}$  для цього діапазону температур визначалося за формулою:

$$\lambda_{екв} = \lambda_{\kappa} + (\lambda_{н.к.} - \lambda_{\kappa}) \cdot x, \quad (1)$$

де  $\lambda_{\kappa}$  – теплопровідність кислоти, що залежить від  $t_{cm}$ , Вт/(м·К);

$\lambda_{н.к.}$  – теплопровідність пари сірчаної кислоти, що залежить від  $t_{cm}$ , Вт/(м·К).

Значення коефіцієнтів теплопровідності конденсату сірчаної кислоти  $\lambda_{\kappa}$  і її пари  $\lambda_{н.к.}$  приймалися за даними [11] в залежності від температури і концентрації кислоти.

Прийнято рішення визначати величину  $\lambda_{екв}$  за формулою [12], так як вона враховує наявність рідини в пористому шарі і дає значення  $\lambda_{екв}$ , відповідні  $\lambda_{екв}$  за формулами Максвелла [9]:

$$\lambda_{екв} = \frac{2\lambda_{д} + \lambda_{н} - 2P(\lambda_{д} - \lambda_{н})}{2\lambda_{д} + \lambda_{н} + P(\lambda_{д} - \lambda_{н})} \lambda_{д}, \quad (2)$$

де  $P$  – пористість;

$\lambda_{д}$  – коефіцієнт теплопровідності твердих частинок, Вт/(м·К);

$\lambda_{н}$  – коефіцієнт теплопровідності середовища, яке заповнює простір між частинками, Вт/(м·К).

Таким чином надається можливість з урахуванням наведеної залежності визначати значення  $\lambda_{екв}$  для прийнятих варіантів стану шару забруднень в залежності від  $t_{cm}$ .

В результаті проведених розрахункових досліджень отримані значення еквівалентного коефіцієнта теплопровідності в залежності від  $t_{cm}$  для варіантів стану шару відкладень при спалюванні стандартних палив (мазуту і легких палив ДТ+ДЛ) при  $W^r = 2\%$  і ВПЕ на їх основі з  $W^r = 17$  і  $30\%$  (рис. 2).

Отримані залежності показують, що значення еквівалентного коефіцієнта теплопровідності забруднень залежить від пористості, форми і розмірів частинок в шарі, складу і властивостей середовища, що заповнює порожнечі між частинками, при відповідних температурах стінки. Зі збільшенням вологості відкладень в парокислотній зоні теплопровідність збільшується.

Отримані залежності середньої товщини забруднень  $\delta_3$  від температури стінки (рис. 1), а також значення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності  $\lambda_{екв}$  від стану забруднень, які також залежать від величини  $t_{cm}$  (рис. 2), надали можливість побудувати залежності коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3$  від температури стінки  $\varepsilon_3 = f(t_{ст})$  при  $\tau = 1000$  годин (рис. 3), які показують, що при однакових температурах стінки  $t_{cm}$  при спалюванні ВМЕ з  $W^r = 30\%$  на основі мазуту М40

значення коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3$  істотно нижчі, ніж при спалюванні мазуту з  $W^r = 2\%$ : в зоні мокрих забруднень – в 2,6 рази; в зоні сухих забруднень – в 2 рази. Таке ж співвідношення значень  $\varepsilon_3$  за вказаними зонами отримані і при спалюванні легких палив (ДТ+ДЛ) і ВПЕ на їх основі, але абсолютні значення  $\varepsilon_3$  істотно нижчі.

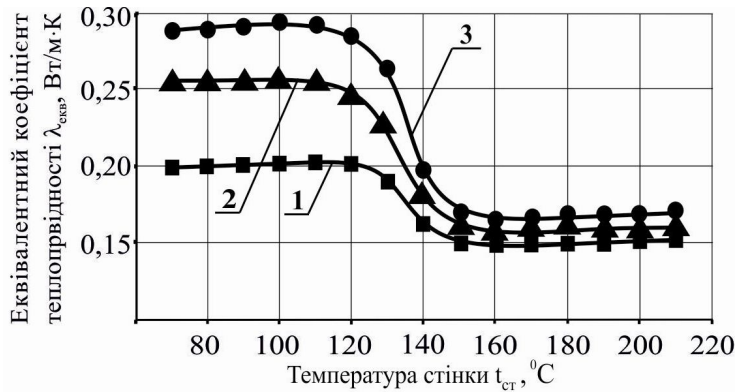


Рис. 2 – Залежності еквівалентної теплопровідності шару забруднень  $\lambda_{екв}$  від температури стінки  $t_{cm}$  при спалюванні рідкого палива і ВПЕ: 1 –  $W^r = 2\%$ ; 2 –  $W^r = 17\%$ ; 3 –  $W^r = 30\%$

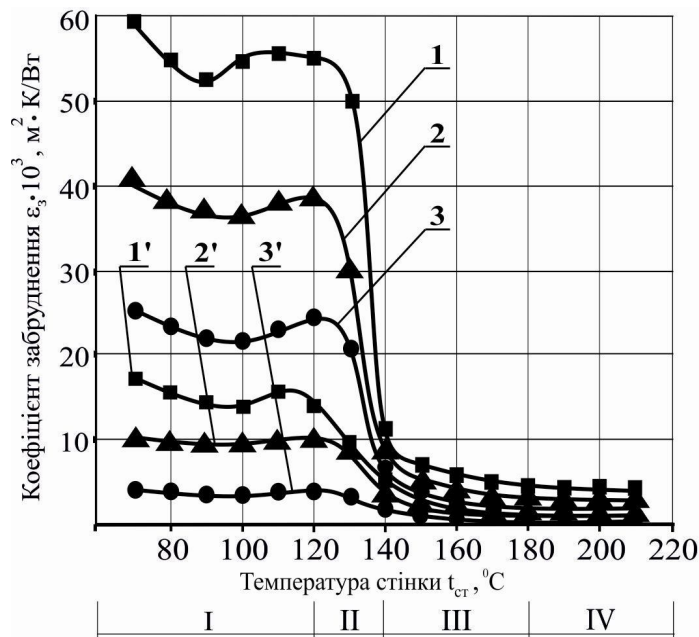


Рис. 3 – Залежність коефіцієнта забруднень  $\varepsilon_3$  від температури стінки  $t_{cm}$  (по зонах поверхонь нагріву УК) при спалюванні: (позначення позицій див. рис. 1); I – конденсаційна поверхня; II – економайзер; III – випарник; IV – пароперегрівач

З урахуванням застосовуваних параметрів пари і середовищ по поверхнях нагріву УК на рис. 3 представлені значення  $\varepsilon_3$  по зонах  $t_{cm}$ , що відповідають поверхням нагріву УК.

З метою перевірки адекватності (достовірності) отриманих результатів розрахунково-експериментальних досліджень здійснено порівняння отриманих значень  $\varepsilon_3$  з опублікованими статистичними даними [5, 6] при спалюванні стандартних палив, а також даними [13, 14], де представлені якісні характеристики забруднення при спалюванні ВПЕ (кількісні дані відсутні).

Достовірність прийнятих припущень при визначенні рівня пористості шару забруднень і його  $\lambda_{екв}$  при спалюванні стандартних рідких палив і ВПЕ на їх основі оцінювалася шляхом порівняння зі значеннями коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3$  для практично сухих поверхонь, що пред-

ставлені в [5] і нормативних документах [6] (рис. 4). Порівняння даних по сухій зоні підтверджує достовірність проведених на експериментальній установці досліджень процесів забруднення при спалюванні палив з  $W^r = 2\%$  і методики визначення пористості  $II$  і  $\lambda_{екв}$ , так як отримане значення  $\varepsilon_3$  при швидкості газів 8 м/с знаходиться в зоні рекомендованих значень ([5], рис. 4, б) і  $\varepsilon_3 = 0,005 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  [6]. При цьому необхідно відмітити, що при  $t_{cm}$  вище  $140^\circ\text{C}$  при швидкості газів вище 20 м/с при спалюванні ВМЕ поверхні нагрівання практично чисті ( $\varepsilon_3 \approx 0,001 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ), що підтверджується даними експлуатації котлів при спалюванні ВПЕ [13].

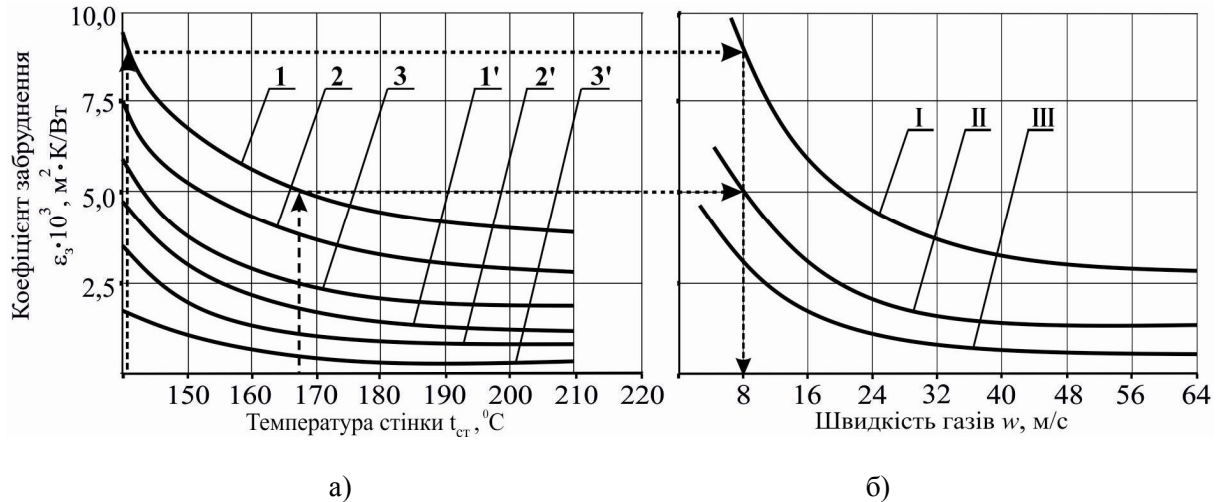


Рис. 4 – Порівняння залежностей коефіцієнтів забруднень від швидкості газів для зони  $t_{cm} = 210 \dots 140^\circ\text{C}$ : а) – отримані експериментально-розрахункові дані при  $w = 8 \text{ м}/\text{с}$  (позначення позицій див. рис. 1); б) – рекомендовані дані [5] для поверхонь УК; I – економайзера; II – випарника; III – пароперегрівача

Достовірність отриманих значень  $\varepsilon_3$  для конденсаційних поверхонь при спалюванні стандартних мазутів можна оцінити, порівнявши з даними [3], де представлена зміна коефіцієнта забруднення  $\varepsilon_3$  економайзера, розрахованого на роботу з температурами стінки нижче точки роси пари кислоти (на вході температура води  $66^\circ\text{C}$ , на виході –  $105^\circ\text{C}$ ) в залежності від тривалості його роботи (коефіцієнт забруднення збільшується вже в перші години роботи і практично стабілізується на постійному рівні  $\varepsilon_3 = 0,55 \dots 0,58 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  після 300...400 годин впливу потоку газів). Порівняння показує, що отримані в результаті експериментально-розрахункових досліджень значення  $\varepsilon_3$  для конденсаційної зони при значеннях  $t_{cm}$  нижче  $120^\circ\text{C}$  при спалюванні мазуту (рис. 3) практично співпадають з експлуатаційними даними [3].

Отже, слід вважати достовірними і результати аналогічних досліджень коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3$  конденсаційних і сухих поверхонь при спалюванні ВМЕ з  $W^r = 30\%$ , проведених на одній експериментальній установці за однаковою методикою.

Згідно з результатами досліджень при однаковій температурі стінки і швидкості газів коефіцієнт забруднення  $\varepsilon_3$  при спалюванні ВМЕ в 2...2,6 рази менше в порівнянні з режимом спалювання стандартного палива при  $W^r = 2\%$  внаслідок впливу безперервно діючого звукового поля, створюваного мікровибухами крапель ВМЕ.

Знайдені залежності коефіцієнтів забруднення  $\varepsilon_3$  (рис. 3) дають можливість визначати значення коефіцієнтів теплопередачі  $k_3$ . Були проведені розрахункові дослідження і побудовані залежності коефіцієнтів теплопередачі  $k_3$  при температурах поверхні нагрівання в діапазоні  $70 \dots 210^\circ\text{C}$  при спалюванні ВМЕ і стандартного мазуту (рис. 5).

Згідно рекомендацій [5] при проектуванні поверхонь нагрівання краще оцінювати вплив забруднень за значеннями теплової ефективності  $\zeta$ , бо вони дозволяють виявити спільний вплив на величину коефіцієнта  $k_3$  забруднення труб і нерівномірності їх омивання.

Отримані при однакових умовах розрахункові дані залежності коефіцієнтів теплової ефективності  $\zeta$  (відношення коефіцієнтів теплопередачі забрудненої і чистої поверхонь) (рис. 6)

показують, що при спалюванні ВМЕ з  $W' = 30\%$  значення інтенсивності теплопередачі НТПН вище практично в 2 рази в порівнянні зі спалюванням стандартного палива з  $W' = 2\%$  при  $t_{cm}$  нижче  $130^\circ\text{C}$ .

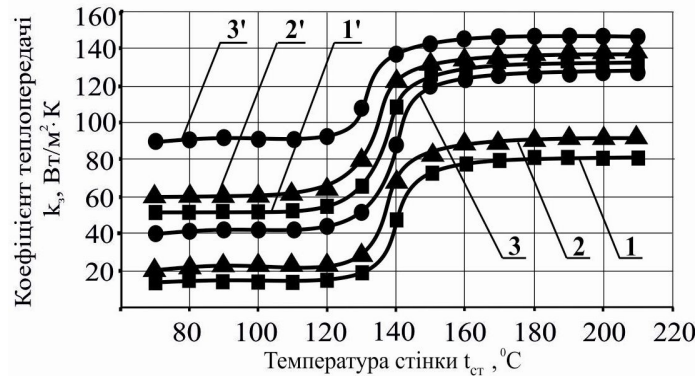


Рис. 5 – Залежність коефіцієнта теплопередачі  $k_3$  забрудненої поверхні нагрівання від температури стінки  $t_{cm}$  (при  $\tau = 1000$  годин) при спалюванні: (позначення позицій див. рис. 1)

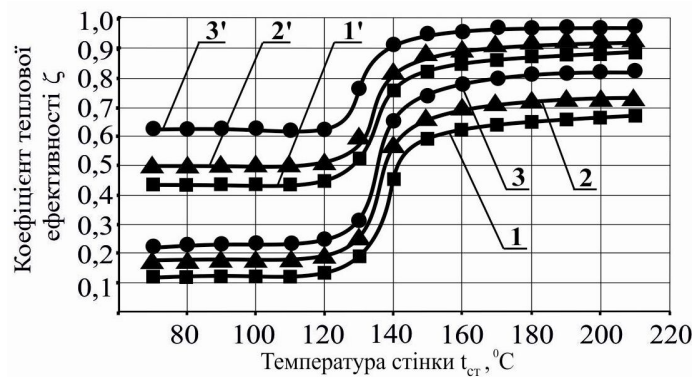


Рис. 6 – Залежність коефіцієнта теплової ефективності  $\zeta$  від температури стінки  $t_{cm}$  (при  $\tau = 1000$  годин) при спалюванні: (позначення позицій див. рис. 1)

Отже, при однаковій швидкості газів ефективність теплопередачі при спалюванні ВМЕ вище, що при однаковій тепловій потужності призведе до зменшення поверхні нагрівання, а значить числа рядів труб (по ходу газів) і величини аеродинамічного опору, що важливо для УК, для яких значення сумарного аеродинамічного опору обмежене.

Істотне зниження коефіцієнта теплової ефективності в конденсаційній зоні при часі впливу потоку газів  $\tau = 1000$  годин (рис. 6) вказує на те, що з метою одержання високих значень  $\zeta$  необхідно зменшувати період між «сильними» очищеннями (наприклад, шляхом обмивки) до 8 годин.

### Висновки

На основі проведених експериментальних і розрахункових досліджень встановлено наступне.

1. Для сухих поверхонь нагрівання:

- коефіцієнти забруднення  $\varepsilon_3$  при  $t_{cm}$  більше  $130^\circ\text{C}$  при спалюванні ВМЕ на основі мазутів з  $W' = 30\%$  при  $\tau = 1000$  годин в  $\sim 2,5$  рази нижче, ніж при спалюванні мазутів з  $W' = 2\%$ ;
- коефіцієнти теплопередачі  $k_3$ , відповідно, вище в 1,6 рази;
- коефіцієнти теплової ефективності  $\zeta$ , відповідно, вище в 1,4 рази;
- при спалюванні ВМЕ на основі легких палив абсолютні значення  $\varepsilon_3$  нижче в  $\sim 2,5$  рази, значення  $k_3$  і  $\zeta$  вище в  $\sim 1,2$  рази в порівнянні з режимами спалювання ВМЕ, а співвідношення між режимами 1, 2, 3 і 1', 2', 3' практично однакові.

2. Для конденсаційних поверхонь нагрівання:
  - коефіцієнти забруднення  $\varepsilon_3$  при спалюванні ВМЕ з  $W^r = 30\%$  значно вищі (в  $\sim 10$  разів) в порівнянні з сухими поверхнями, хоча співвідношення  $\varepsilon_3$  між режимами 1, 2, 3 відповідають один одному;
  - коефіцієнти теплопередачі  $k_3$  і теплової ефективності  $\zeta$  значно нижчі в порівнянні з сухими поверхнями (в  $\sim 5 \dots 6$  разів), а співвідношення значень  $k_3$  і  $\zeta$  між режимами 1, 2, 3 зберігаються;
3. Рекомендується для одержання високих значень  $k_3$ ,  $\zeta$  для конденсаційних поверхонь зменшити періодичність між очищеннями до 8 годин.
4. Отримані залежності коефіцієнтів  $\varepsilon_3$ ,  $k_3$  і  $\zeta$  рекомендуються для застосування при проектуванні конвективних поверхонь нагрівання УК.

#### Перелік використаних джерел:

1. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков / А.Д. Зимон. – М. : Химия, 1976. – 288 с.
2. Кузнецов Н.В. Рабочие процессы и вопросы усовершенствования конвективных поверхностей котельных агрегатов / Н.В. Кузнецов. – Л. : Госэнергоиздат, 1957. – 174 с.
3. Гаврилов А.Ф. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева котельных установок / А.Ф. Гаврилов, Б.М. Малкин. – М. : Энергия, 1980. – 328 с.
4. Проценко Г.В. Характер отложений на поверхностях нагрева судовых утилизационных котлов / Г.В. Проценко // Судостроение. – 1989. – № 7. – С. 25-28.
5. Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы : учебное пособие / А.С. Хряпченков. – Л. : Судостроение, 1988. – 296 с.
6. Тепловой расчет котельных агрегатов : (Нормат. метод) / АООТ ВТИ; АООТ НПО ЦКТИ. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Издательство НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
7. Горячкин В.Ю. Интенсивность коррозионных процессов в утилизационных котлах при сжигании водотопливных эмульсий / В.Ю. Горячкин, В.С. Корниенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2013. – № 2. – С. 101-110.
8. Корниенко В.С. Интенсивность процессов загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов при сжигании водомазутных эмульсий / В.С. Корниенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 1. – С. 48-53.
9. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
10. Минько К.Б. Гидравлическое сопротивление и эффективная теплопроводность засыпок из сферических частиц / К.Б. Минько, В.И. Артемов, Г.Г. Яньков // Вестник МЭИ. – 2011. – № 4. – С. 47-55.
11. Амелин А.Г. Производство серной кислоты / А.Г. Амелин. – М. : Химия, 1967. – 472 с.
12. Гусаров А.В. Эффективная теплопроводность свободно насыпанных и слабоспеченных порошков. I Модель / А.В. Гусаров, Е.П. Ковалев // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 1. – С. 70-82.
13. Эксплуатация производственных котлов КВГ-34К на водотопливной эмульсии / Ю.В. Якубовский [и др.] // Рыбное хозяйство. – 1991. – № 3. – С. 57-60.
14. Синайский Н.А. Использование метода тяжелой кавитации для сжигания мазута и орэмульсии / Н.А. Синайский, Т.А. Гошей // Теплоэнергетика. – 2003. – № 5. – С. 76-80.

#### References:

1. Zimon A.D. *Adgeziia pyli i poroshkov* [Adhesion of dust and powders]. Moscow, Himija Publ., 1976. 288 p. (Rus.)
2. Kuznetsov N.V. *Rabochie protsessy i voprosy usovershenstvovaniia konvektivnykh poverkhnostei kotel'nykh agregatov* [Work processes and questions of boiler units convective surfaces improvement]. Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1957. 174 p. (Rus.)
3. Gavrilov A.F., Malkin B.M. *Zagriznenie i ochistka poverkhnostei nagreva kotel'nykh ustanovok* [Pollution and cleaning of boiler plants heating surfaces]. Moscow, Jenergiya Publ., 1980. 328 p. (Rus.)



4. Protsenko G.V. Kharakter otlozhenii na poverkhnostiakh nagreva sudovykh utilizatsionnykh kotlov [Character deposits on heating surfaces of the ship exhaust gas boilers]. *Sudostroenie – Shipbuilding*, 1989, no.7, pp. 25-28. (Rus.)
5. Khryapchenkov A.S. *Sudovye vspomogatel'nye i utilizatsionnye kotly: uchebnoe posobie* [Ship auxiliary and exhaust gas boilers: textbook]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1988, 296 p. (Rus.)
6. *Teplovoi raschet kotel'nykh agregatov (Normativnyi metod). Izd. 3-e, pererabotannoe i dopolnennoe* [Thermal calculation of boiler units (Normative method). Ed. 3rd, revised and enlarged]. St. Petersburg, NGO CKTI Publ., 1998. 256 p. (Rus.)
7. Goryachkin V.Yu., Korniyenko V.S. Intensivnost' korrozionnykh protsessov v utilizatsionnykh kotlakh pri szhiganii vodotoplivnykh emul'sii [Intensity of corrosion processes in exhaust gas boilers at burning water–fuel emulsion]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2013, no.2, pp. 101-110. (Rus.)
8. Korniyenko V.S. Intensivnost' protsessov zagriazneniia poverkhnostei nagreva utilizatsionnykh kotlov pri szhiganii vodomazutnykh emul'sii [Intensity of pollution processes in exhaust gas boilers at burning water-fuel emulsion]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2017, no.1, pp. 48-53. (Rus.)
9. Lykov A.V. *Teplomassoobmen: (Spravochnik). Izd. 2-e pererabotannoe i dopolnennoe* [Heat and mass transfer: (reference book). Ed. 2nd revised and enlarged]. Moskva, Jenergiya Publ., 1978. 480 p. (Rus.)
10. Min'ko K.B, Artemov V.I., Ian'kov G.G. Gidravlichesкое soprotivlenie i effektivnaya teploprovodnost' zasypok iz sfericheskikh chastits [Hydraulic resistance and effective thermal conductivity of backfill from spherical particles]. *Vestnik MEI – Vestnik MEI*, 2011, no.4, pp. 47-55. (Rus.)
11. Amelin A.G. *Proizvodstvo sernoi kisloty* [Production of sulfuric acid]. Moskva, Himiya Publ., 1967. 472 p. (Rus.)
12. Gusarov A.V., Kovalev E.P. Effektivnaya teploprovodnost' svobodno nasypanykh i slabospechennykh poroshkov. I Model' [Effective heat conductivity of loosely filled and weakly soled powders. I Model]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Physics and chemistry of materials processing*, 2009, no.1, pp. 70-82. (Rus.)
13. Yakubovskiy Yu.V., Sumenkov V.M., Seleznev Yu.S., Stacenko V.H., Urbanovich A.I. Ekspluatatsiya proizvodstvennykh kotlov KVG-34K na vodotoplivnoi emul'sii [Operation of production boilers KVG-34K on water-fuel emulsion]. *Rybnoe khoziaistvo – Fisheries*, 1991, no.3, pp. 57-60. (Rus.)
14. Sinajskij N.A., Goshej T.A. Ispol'zovanie metoda tyazheloi kavitatsii dlya szhiganiya mazuta i oremul'sii [Using the method of heavy cavitation for burning fuel oil and emulsion]. *Teploenergetika – Thermal engineering*, 2003, no.5, pp. 76-80. (Rus.)

Рецензент: О.В. Щедролюсєв  
д-р техн. наук, проф., ХФ НУК

Стаття надійшла 15.06.2017