

**ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА**

УДК 621.128

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160236

© Колбасенко О.В.<sup>1</sup>, Димо Б.В.<sup>2</sup>, Горячкін А.В.<sup>3</sup>, Корнієнко В.С.<sup>4</sup>**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ КОРОЗІЇ  
ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ**

Представлено аналіз статистичних даних і результати експериментальних досліджень інтенсивності низькотемпературної сірчаноокислотної корозії в залежності від надлишку повітря  $\alpha$  в межах 1,01...1,5, вмісту  $W^r$  емульсії в межах 2...30% при температурах поверхонь нагрівання  $t_{cm}$  в межах 70...150 °С. Встановлено, що при спалюванні водопаливної емульсії з вмістом  $W^r = 30\%$  має місце суттєве зниження швидкості корозії до допустимого рівня 0,2...0,3 мм/рік при відсутності «піка» корозії, що має місце при спалюванні стандартних мазутів ( $W^r = 2\%$ ) при  $t_{cm} \approx 110$  °С і  $\alpha$  вище 1,05.

**Ключові слова:** низькотемпературна корозія, водопаливна емульсія, вміст емульсії, надлишок повітря.

**Колбасенко О.В., Димо Б.В., Горячкін А.В., Корнієнко В.С. Результаты исследований низкотемпературной коррозии при сжигании водотопливных эмульсий.** Представлен анализ статистических данных и результаты экспериментальных исследований интенсивности низкотемпературной сернистой коррозии в зависимости от избытка воздуха  $\alpha$  в пределах 1,01...1,5 водосодержания  $W^r$  топлива в пределах 2...30% при температурах поверхностей нагрева  $t_{cm}$  в пределах 70...150 °С. Установлено, что при сжигании водотопливной эмульсии с водосодержанием  $W^r = 30\%$  наблюдается существенное снижение скорости коррозии до допустимого уровня 0,2...0,3 мм/год при отсутствии «пика» коррозии, который имеет место при сжигании стандартных мазутов ( $W^r = 2,0\%$ ) при  $t_{cm} \approx 110$  °С и  $\alpha$  выше 1,05.

**Ключевые слова:** низкотемпературная коррозия, водотопливная эмульсия, водосодержание эмульсии, избыток воздуха.

**O.V. Kolbasenko, B.V. Dymo, A.V. Goryachkin, V.S. Kornienko. Results of studies of low-temperature corrosion during the combustion of water-fuel emulsions.** Analysis of literature data has shown that when sulfur fuels are burnt at boiler wall temperatures below 140 °С, sharp increase of low-temperature sulfuric acid corrosion occurs due to condensation of sulfuric acid vapors. The rate of low-temperature corrosion at wall temperatures equal to 100 °С is up to 1,2 mm/year, which limits the ability to lower the boiler surface temperature, and also limits the economy of exhaust gas boilers, auxiliary boilers and main boilers of ship power plants. Experiments showed that concurrently a solid salt layer is formed on surface that can be separated in the form of thin films in processing of the tubes after experiments with hydrochloric acid solution. The metal surface is shiny which is typical of passivation. Analysis of statistical data and results of experimental studies of low-temperature sulfuric acid corrosion intensity, depending on excess air factor  $\alpha$  in the range 1,01...1,5, water content  $W^r$  of fuel in the range 2...30% at heating sur-

<sup>1</sup> PhD студент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

<sup>2</sup> д-р техн. наук, професор, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, [dymobv@gmail.com](mailto:dymobv@gmail.com)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, м. Херсон, [daryag2010@gmail.com](mailto:daryag2010@gmail.com)

<sup>4</sup> викладач, Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, [kornienkovika1987@gmail.com](mailto:kornienkovika1987@gmail.com)

faces temperatures  $t_s$  within limits of 70...150°C are presented. When water-fuel emulsion is burnt with water content  $W^r = 30\%$  significant decrease in the corrosion rate to an acceptable level of 0,2...0,3 mm/year in absence of «peak» corrosion is observed, which occurs when standard fuel oil is burned ( $W^r = 2\%$ ) at  $t_s \approx 110^\circ\text{C}$  and  $\alpha$  above 1,05. The value of wall temperature can be taken at 70°C only with  $\alpha = 1,15$  and with water content in emulsion  $W^r = 30\%$  at an acceptable value of 0,3 mm/year corrosion rate. The results of research show that as water content in the water-fuel emulsion increases up to 30%, corrosion rate of low-temperature heating surfaces in the area of «acidic peak» is reduced by 3...5 times, which makes it possible to reduce waste gases temperature and compensate the boilers lower efficiency when burning water-fuel emulsion with greater water content. With the decrease of air factor excess, the rate of corrosion is reduced when fuels with excess water content and low water content are burnt. Therefore, it is possible to reduce excess air factor  $\alpha$  to the level of 1,05...1,07 either to maintain or to increase the efficiency.

**Keywords:** low-temperature corrosion, water-fuel emulsion, water content in the emulsion, excess air.

**Постановка проблеми.** Інтенсивність забруднень і корозії високотемпературних і низькотемпературних поверхонь нагрівання при спалюванні сірчистих палив дуже впливають на надійність роботи енергетичного устаткування і визначають їх масогабаритні і економічні показники. При  $t_{cm}$  нижче 140°C внаслідок конденсації пари сірчаної кислоти спостерігається різке зростання так званої низькотемпературної сірчаної корозії (НТК), інтенсивність якої при постійних режимах вже при  $t_{cm}$  близько 110°C досягає при спалюванні стандартних сірчистих палив з  $S^r = 2...3\%$  і  $\alpha = 1,2$  максимуму на рівні 1,2 мм/рік, що називають «піком» НТК, тому що після нього при  $t_{cm}$  нижче 100°C інтенсивність НТК різко знижується. Тому без застосування спеціальних заходів нема рації знижувати  $t_{cm}$  поверхонь нагрівання економайзерів і повітропідігрівників нижче 120...130°C, що істотно обмежує економічність утилізаційних допоміжних і головних котлів суднових енергетичних установок (СЕУ).

В зв'язку з цим актуальними є дані про інтенсивність НТК, про діапазони впливу змін параметрів роботи котлів у межах і вище допустимого значення швидкості НТК (0,2...0,3 мм/рік) при значеннях  $t_{cm}$  у діапазоні 70...150°C і  $\alpha$  на рівні 1,2...1,5, що мають місце при експлуатації допоміжних котлів, які необхідно знати при проектуванні котлів і оцінці ефективності роботи, надійності і довговічності елементів СЕУ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оpubлікована велика кількість даних, узагальнених у монографіях [1, 2], що присвячені процесам утворення  $\text{SO}_3$  і пари  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , конденсації цієї пари, інтенсивності НТК і забруднення низькотемпературних поверхонь нагрівання (НТПН) при спалюванні стандартних мазутів (при  $W^r = 2\%$ ) при  $t_{cm}$  НТПН нижче температури точки роси  $t_{p\text{H}_2\text{SO}_4}$ . Оpubліковано мало даних про інтенсивність НТК при спалюванні водопаливних емульсій (ВПЕ) [3-6] і відсутні дані про вплив на НТК змінних режимів роботи НТПН. Причому розглядаються тільки якісні показники процесів: про зниження швидкості НТК судять по збільшенню періоду між ремонтами НТПН; про зменшення забруднень – по періоду між очищеннями (які збільшилися в 2 рази [3, 4]); про зміну механізму НТК – по переходу місцевих локальних корозійних ушкоджень металу до рівномірної корозії при спалюванні ВПЕ [3], що, вочевидь, пов'язано із процесами пасивації поверхні металу. На думку авторів [5, 6] при спалюванні ВПЕ з  $W^r = 30\%$  процеси НТК при  $t_{cm}$  у межах 70...130°C відбуваються при пасивному стані поверхні металу внаслідок абсорбції  $\text{N}_2\text{O}_3$  конденсатом  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [7, 8].

**Мета роботи.** Аналіз експериментальних досліджень і аналітичного прогнозування інтенсивності низькотемпературної сірчаної корозії при спалюванні мазутів і водопаливних емульсій в діапазоні температур поверхонь нагрівання 60...150°C.

**Виклад основного матеріалу.** На експериментальній установці було проведено 25 серій дослідів. Достовірність експериментальних даних забезпечена на рівні 10% (згідно даних [7, 8] достатній рівень – 20%). На підставі аналізу результатів досліджень залежностей кінетики НТК  $\Delta G = f(\tau)$ , отриманих при спалюванні мазутів і ВПЕ з різними  $\alpha$ , на основі даних 8-годинних

дослідів побудовані у залежності збитку металу внаслідок корозії  $\Delta G$  від вмісту сірки  $S^r$  у паливі, коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  і вмісту води  $W^r$  в емульсії (рис. 1). Це обумовлено тим, що при підтримуванні постійних параметрів процесів при проведенні дослідів на експериментальній установці після 2-х годин впливу потоку газів має місце стабілізація корозійного процесу. При цьому розглядалися значення  $\Delta G$ , що отримані в області «кислотного корозійного піка» при температурах стінки  $t_{cm} = 105...115^\circ\text{C}$ .

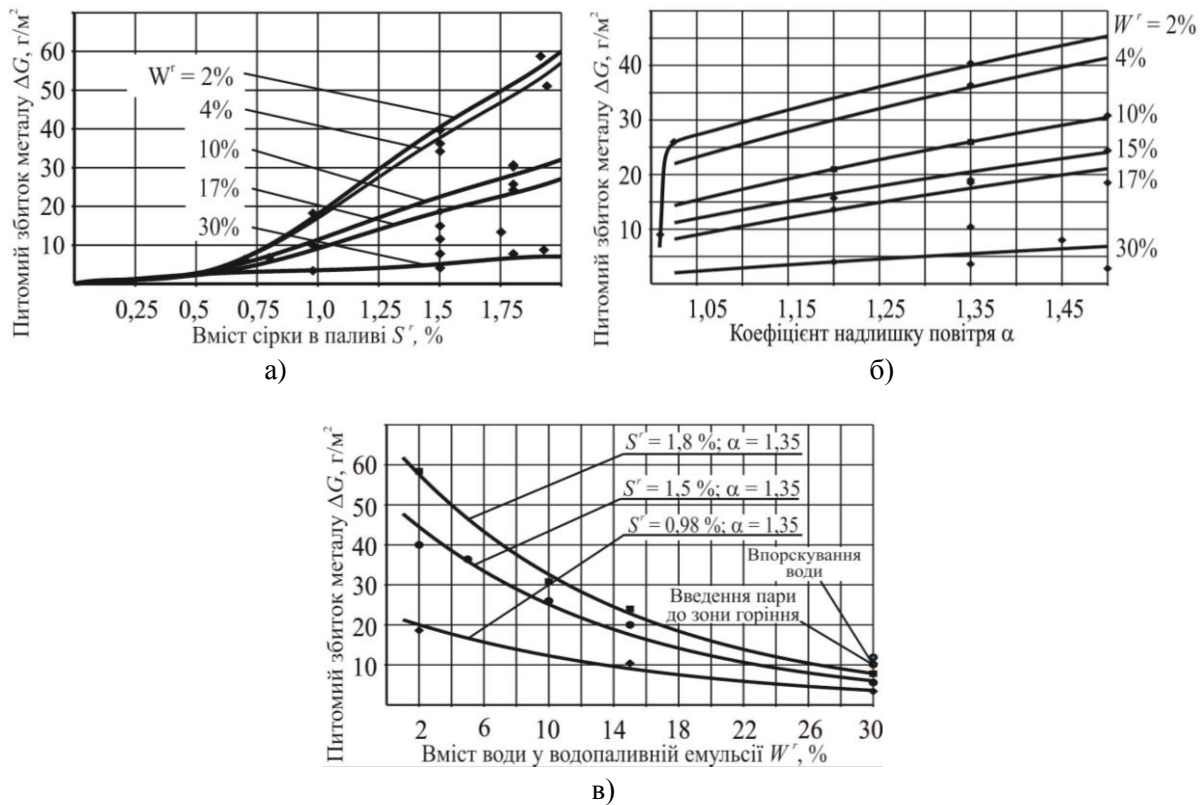


Рис. 1 – Залежність питомого збитку металу  $\Delta G$  внаслідок НТК при температурі стінки в області «кислотного піка» при  $\tau = 8$  год: а) – від вмісту сірки  $S^r$  при різному водовмісті  $W^r$  ВПЕ; б) – від надлишку повітря  $\alpha$  при різному водовмісті  $W^r$  ВПЕ; в) – від водовмісту  $W^r$  ВПЕ при різному вмісту сірки  $S^r$

Зі збільшенням вмісту сірки більше 0,5% при будь-якому вмісті води в емульсії спостерігається зростання  $\Delta G$  (рис. 1, а), але його темп знижується зі збільшенням води в емульсії. Якщо при спалюванні стандартного палива з  $W^r = 2\%$  при збільшенні вмісту сірки від 0,5 до 1,5%  $\Delta G$  зростає від 7,5 г/м<sup>2</sup> до 40,0 г/м<sup>2</sup> (тобто значення  $\Delta G$  виросло в 5 разів), то при  $W^r = 15\%$   $\Delta G$  збільшується до 30 г/м<sup>2</sup> при  $S^r = 1,8\%$  (тобто значення  $\Delta G$  збільшилося в 4 рази). При спалюванні ВПЕ з вмістом  $W^r = 30\%$  спостерігається незначний ріст  $\Delta G$ : при збільшенні вмісту сірки  $S^r$  від 0,9 до 2,0%  $\Delta G$  зростає з 3,0 до 9,0 г/м<sup>2</sup>, тобто збиток маси металу в 5...8 разів нижче, ніж при спалюванні стандартного палива. Причому необхідно відзначити, що при введенні в топку води або водяної пари в кількості, що відповідає 30% води в емульсії, значення  $\Delta G$  менше, ніж при спалюванні стандартного палива, але все-таки вище, ніж при спалюванні ВПЕ з тим же вмістом води.

Експериментальні дані (рис. 1, б) показують, що починаючи з  $\alpha = 1,05$  і вище, залежність  $\Delta G = f(\alpha)$  має практично прямолінійний характер. Однак зі зменшенням  $\alpha$  до 1,025...1,01 спостерігається різке зниження  $\Delta G$ . Причина, вочевидь, в тому, що при таких значеннях  $\alpha$  різко знижується вміст  $\text{SO}_3$ , а значить і пари сірчаної кислоти в димових газах, від яких залежить швидкість корозії. Залежність вмісту  $\text{SO}_3 = f(\alpha)$  носить такий же експоненціальний характер. Вочевидь, збиток металу  $\Delta G$  і швидкість корозії повинні мати таку ж експонентну залежність

від  $\alpha$ . Якщо обробити експериментальні дані по експонентній залежності, то значення коефіцієнта детермінації  $R^2$  трохи знижується, але рівняння регресії охоплюють значення  $\Delta G$  і при  $\alpha = 1,01$  і  $\alpha = 1,025$ .

Зі збільшенням вмісту води в емульсії збиток металу внаслідок корозії  $\Delta G$  знижується, причому, чим вище вміст сірки в паливі, тим крутіше знижується крива залежності  $\Delta G = f(W^r)$ . Так, при вмісті сірки 0,98%  $\Delta G$  знижується з 18,5 г/м<sup>2</sup> при  $W^r = 2,0\%$  до 3,5 г/м<sup>2</sup> при  $W^r = 30\%$  (тобто  $\Delta G$  зменшилося в 5,3 рази). При вмісті сірки 1,8%  $\Delta G$  знижується з 58,0 г/м<sup>2</sup> при  $W^r = 2,0\%$  до 7,5 г/м<sup>2</sup> при  $W^r = 30\%$  (тобто  $\Delta G$  знизилося в 7,7 рази). Значення  $R^2$  перебуває в межах 0,98...0,99, що вказує на високу вірогідність проведених досліджень. Отримані  $\Delta G$  при уведенні водяної пари і води в топку в кількості, що відповідає 30% води у ВПЕ, показують, що корозія йде більш інтенсивно.

Те, що криві інтенсивності корозійного процесу при вмісті води в емульсії  $W^r = 30\%$  при різному вмісті сірки практично сходяться в одній точці, можна пояснити тільки тим, що при цьому вмісті води в емульсії створюються умови для появи пасивації металу. Досліди показують, що на поверхні одночасно створюється суцільний сольовий шар, що відділяється у вигляді тонкої плівки при обробці зразків труб після дослідів розчином соляної кислоти, причому поверхня металу має характерний при пасивації блиск.

Для оцінки вірогідності отриманих за час 2...12 годин результатів досліджень і апроксимуючих залежностей прогнозування інтенсивності корозії були проведені контрольні (основні) дослідження (5 режимів) тривалістю до 100 годин (рис. 2).

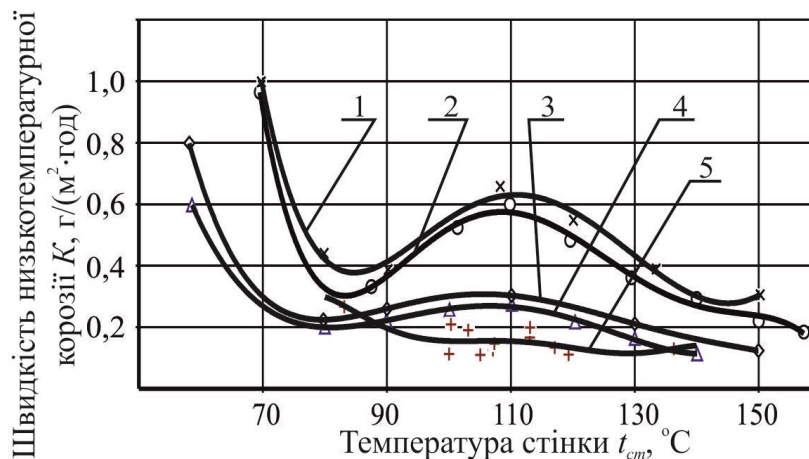


Рис. 2 – Залежність  $K = f(t_{cm})$  при спалюванні: 1 – М100 ( $S^r = 2,0\%$ ;  $W^r = 2,0\%$ )  $\alpha = 1,05$ ,  $\tau = 100$  год; 2 – М100 ( $S^r = 2,0\%$ ;  $W^r = 2,0\%$ )  $\alpha = 1,025$ ,  $\tau = 100$  год; 3 – М100 ( $S^r = 2,0\%$ ;  $W^r = 2,0\%$ )  $\alpha = 1,01$ ,  $\tau = 100$  год; 4 – М 40 ( $S^r = 0,96\%$ ;  $W^r = 2,0\%$ )  $\alpha = 1,01$ ,  $\tau = 100$  год; 5 – ВПЕ М40 ( $S^r = 1,8\%$ ;  $W^r = 30,0\%$ )  $\alpha = 1,45$ ,  $\tau = 88$  год

Результати 100-годинних досліджень надають можливість оцінити точність прогнозування корозійного процесу на тривалий час на основі досліджень кінетики НТК при тривалості дослідів 2, 4, 8 і 12 годин особливо при спалюванні водопаливних емульсій, для яких відсутні статистичні дані.

Отримані в результаті досліджень на експериментальній установці при постійних параметрах (постійне  $\alpha$  і  $t_{cm}$ ) значення швидкості НТК за час  $\tau = 100$  годин при  $\alpha = 1,025$  і  $1,05$  практично збігаються з літературними даними [9] при тих же значеннях  $\alpha$  (швидкість корозії  $K = 0,7$  г/м<sup>2</sup>·год при  $\alpha = 1,05$ ;  $K = 0,6$  г/м<sup>2</sup>·год при  $\alpha = 1,025$ ). При значенні  $\alpha = 1,01$   $K = 0,24$  г/м<sup>2</sup>·год. При цих значеннях  $\alpha$  при спалюванні необхідних палив протягом 100 годин спостерігається невеликий «кислотний пік» в області температур стінки 105...115°C. Згідно даних [2] при  $\alpha = 1,2$  швидкість НТК зростає до 1,2 г/м<sup>2</sup>·год.

При спалюванні ВПЕ ( $W^r = 30\%$ ;  $S^r = 1,8\%$ ) при підвищеному значенні надлишку повітря  $\alpha$  протягом 88 годин швидкість корозії в цій області температур стінки практично в 2 рази ни-

жче в порівнянні з режимом  $\alpha = 1,01$  при спалюванні необхідного палива при відсутності «корозійного піка».

Щоб порівняти і оцінити вірогідність одержаних на експериментальній установці даних з кінетики корозійних процесів, отриманими протягом 2...12 годин, а потім прогнозовані на тривалий час значення швидкості корозії з результатами промислових досліджень були проведені стендові дослідження тривалістю 100 годин при спалюванні мазуту М100 зі змістом сірки 2% і  $\alpha = 1,01...1,05$  з наступним перерахуванням отриманих даних на 1000 годин за допомогою апроксимаційних формул. Це дає можливість порівняти результати стендових і промислових досліджень і величини експериментальних даних з розрахунковими прогнозованими значеннями, отриманими по формулах апроксимації результатів короточасних дослідів. Крім того, це дасть підставу вважати достовірними розрахункові значення (наприклад, за 1000 годин) і для інших режимів спалювання різних палив, для яких немає промислових даних зі швидкості корозійних процесів за тривалий час. Особливо це відноситься до режимів спалювання, що цікавлять нас, водопаливних емульсій. При цьому необхідно враховувати вплив змінних параметрів горіння в топці котла на відміну від сталості цих параметрів у топці експериментальної установки.

Особливо необхідно відзначити результати досліджень швидкості НТК при спалюванні ВПЕ з  $W^r = 30\%$  (при вмісті сірки  $S^r = 1,8\%$ ) при значеннях  $\alpha$  в межах 1,15...1,45 (рис. 3), які показують, що при зниженні значення  $\alpha$  до 1,15 допустима швидкість НТК на рівні до 0,3 г/м<sup>2</sup>-год (0,32 мм/рік) має місце при значеннях температури поверхні нагрівання до 70°C. Це значить, що в цьому випадку можлива подача живильної води в економайзер котла прямо із теплої шухляди (без проміжного підігріву). Крім того, відсутність «кислотного піка» призводить до можливості в цьому режимі спалювання ВПЕ забезпечити надійну роботу поверхні економайзера (повітря підігрівача) при коливаннях навантаження котла.

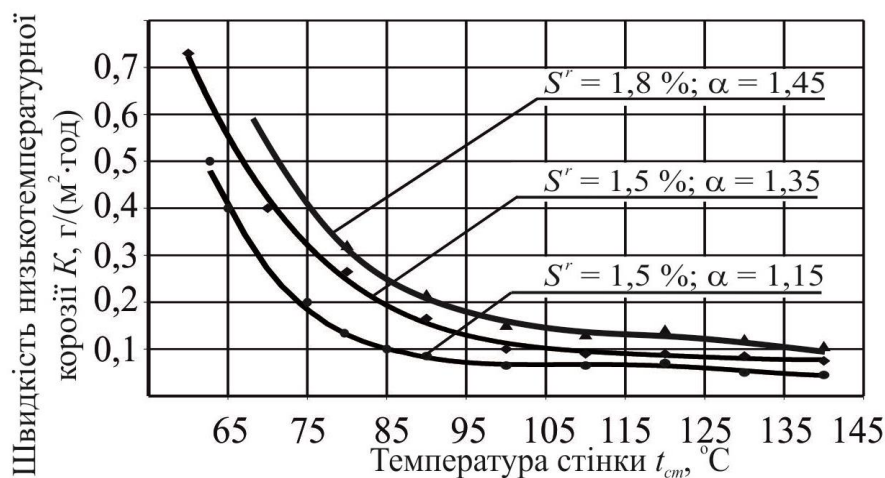


Рис. 3 – Залежність швидкості НТК від  $t_{cm}$  при спалюванні ВПЕ з  $W^r = 30\%$  ( $\tau = 100$  год)

Результати досліджень показують, що при спалюванні необхідних палив з різними  $\alpha$  аж до 1,01 спостерігається чітко виражений «корозійний пік». При спалюванні ВПЕ зі збільшенням вмісту води швидкість корозії особливо в районі «піка» знижується. При спалюванні ВПЕ зі змістом води 30% при трьох значеннях надлишку повітря  $\alpha$  (1,15; 1,35; 1,5) швидкість корозії перебуває нижче режиму  $\alpha = 1,01$  (при  $W^r = 2\%$ ) при практично відсутньому «піку» корозії, хоча цей «пік» все-таки «проявляється» (особливо чітко при впливі потоку димових газів протягом 8...12 годин), але потім з появою щільного солявого шару й пасивації поверхні металу (після ~20 годин) «пік» майже зникає.

На рис. 4 представлені результати досліджень, прогнозовані на  $\tau = 1000$  годин при забезпеченні постійних умов горіння і постійних температур стінки.

У реальних умовах спостерігаються змінні режими горіння (змінюється коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ , змінні температури металу поверхонь нагрівання), що призводить до збіль-

шення швидкостей корозії. Якщо прийняти рівними значення швидкості корозії при  $\alpha = 1,025$ , отримані в умовах стендових досліджень і при проведенні дослідів на енергетичному котлі по даним ВТІ [2], то з'являється можливість умовно врахувати вплив змінних умов експлуатації на величину корозійних процесів при проведених режимах.

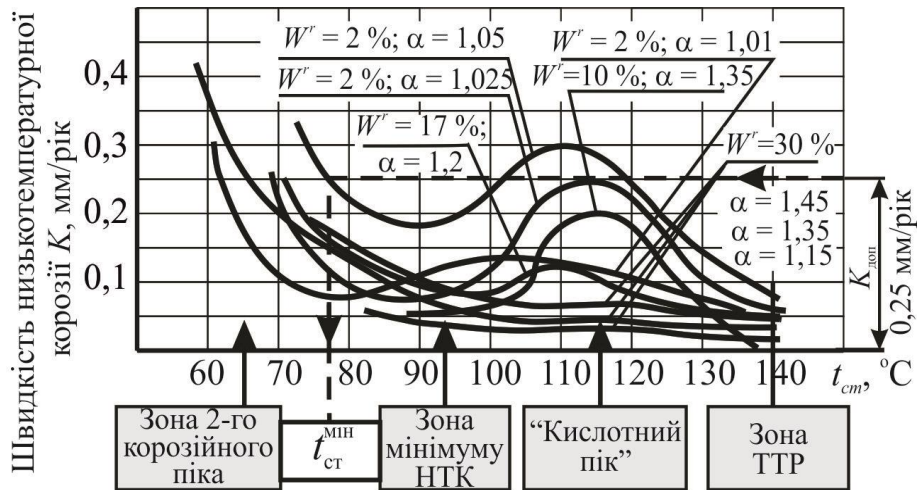


Рис. 4 – Залежність швидкості НТК від температури стінки при різних режимах спалювання палив при змінних параметрах (прогноз на  $\tau = 1000$  год)

Якщо прийняти, що при змінних значеннях  $t_{cm}$  і  $\alpha$  рівень швидкості корозії при  $\alpha = 1,05$  у перерахуванні на  $\tau = 1000$  год буде перебувати на рівні  $0,6 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$ , як це отримано іншими авторами в промислових умовах, то одержимо порівняльні характеристики  $K = f(t_{cm})$  швидкостей корозії при спалюванні ВПЕ і стандартних палив при різних  $\alpha$  і  $W^r$ . Ці залежності дають можливість визначити мінімальну температуру стінки  $t_{cm}^{min}$  низькотемпературної поверхні по прийнятій за умовами надійності і ресурсу роботи швидкості корозії.

Вважаючи допустимою швидкість корозії металу економайзера і повітропідігрівника на рівні  $0,25 \dots 0,35$  мм/рік, можна стверджувати, що найнебезпечнішим за рівнем низькотемпературної корозії є діапазон температур стінки  $t_{cm} = 85 \dots 130^\circ\text{C}$ , тому що ця частина поверхні нагрівання піддається інтенсивному впливу конденсату сірчаної кислоти. При температурах стінки близько  $130 \dots 150^\circ\text{C}$  поверхня нагрівання ще перебуває в зоні електрохімічної корозії, але з омичним контролем корозійного процесу через малий вміст кислоти. При температурах стінки вище  $160 \dots 180^\circ\text{C}$  спостерігається режим газової хімічної корозії і швидкість її відповідає припустимому значенню на рівні або нижче прийнятого припустимого рівня (перший «мінімум» корозії). Зі зниженням температури стінки до  $100 \dots 115^\circ\text{C}$  швидкість корозії при спалюванні стандартного мазуту різко зростає. У цьому діапазоні температур стінки спостерігається перший «кислотний пік» корозії і швидкість корозії значно вище припустимого рівня.

З подальшим зниженням температури стінки, швидкість корозії знижується й досягається другий «мінімум корозії». У діапазоні температур  $80 \dots 90^\circ\text{C}$  спостерігається зниження інтенсивності корозії до припустимого рівня, в основному, при низьких надлишках повітря. При підвищених надлишках повітря швидкість корозії вище допустимого рівня. Але тому що цей діапазон температур стінки дуже вузький і перебуває після «кислотного піка», використовувати це явище при конструюванні низькотемпературних поверхонь нагрівання котла складно. При температурах стінки нижче  $75 \dots 80^\circ\text{C}$  при значеннях  $\alpha > 1,05$  швидкість корозії знову різко збільшується (другий «кислотний пік»).

При спалюванні ВПЕ з різним вмістом води від 4 до 17% спостерігається поступове зниження величини «корозійного піка». Якщо при  $W^r = 4\%$  максимальне значення швидкості корозії становило  $0,5$  мм/рік, то при спалюванні ВПЕ з  $W^r = 10\%$   $K_{max} = 0,4$  мм/рік, при  $W^r = 17\%$  –  $K_{max} = 0,25$  мм/рік. При цьому простежується наявність невеликого корозійного піка.

При спалюванні ВПЕ з вмістом води 30% і середньому значенні  $\alpha = 1,45$  вже практично

не спостерігається перший «корозійний пік». У межах температури стінки від 140 до 70°C швидкість корозії перебуває на рівні 0,15...0,3 мм/рік. При зниженні коефіцієнта надлишку повітря спостерігається зниження швидкості корозії. При спалюванні тієї ж емульсії при  $\alpha = 1,15$  швидкість НТК становить 0,1 мм/рік, при 2 швидкість НТК складає усього від 0,05 до 0,1 мм/рік у межах температур стінки від 140 до 70°C.

Отже, зі збільшенням вмісту води у ВПЕ до 30% швидкість корозійних процесів низькотемпературних поверхонь нагрівання в області першого «кислотного піка» знижується в 3...5 разів.

Отримані дані зі швидкості корозії при різних температурах стінки при спалюванні ВПЕ з різним вмістом води від 4 до 30% дають можливість побудувати залежності зміни швидкості корозії від вмісту води при  $\alpha = 1,35$  при характерних температурах стінки в зонах: точки роси (130°C); кислотного «піка корозії» (110, 115, 120°C); мінімуму корозії (80...100°C); другого піка корозії (70°C) при  $\alpha = 1,35$  і  $\alpha = 1,15$  (рис. 5).

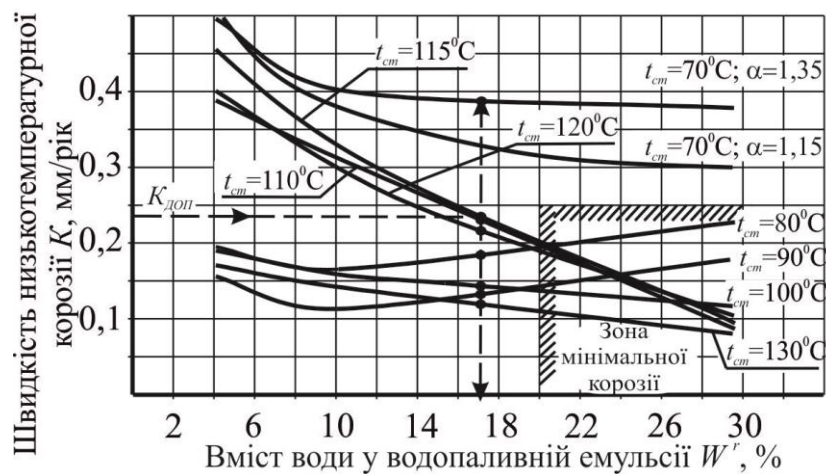


Рис. 5 – Залежність швидкості НТК від вмісту води в ВПЕ в різних областях температур поверхонь нагрівання котла

На підставі експериментальних даних і наступного прогнозування встановлено, що при досягненні  $t_{cm} = 70^\circ\text{C}$  при вмісті води  $W^r = 8...10\%$  швидкість корозії спочатку різко зменшується з 0,5 мм/рік до 0,395 мм/рік. З подальшим збільшенням вмісту води до  $W^r = 30\%$   $\alpha = 1,35$  швидкість корозії повільно знижується до 0,37 мм/рік, а при  $\alpha = 1,15$  знижується до 0,3 мм/рік. При температурі стінки  $t_{cm} = 80...90^\circ\text{C}$  при  $W^r$  до 10...12% швидкість корозії падає з 0,2 мм/рік до 0,1 мм/рік. При наступному збільшенні змісту води до  $W^r = 30\%$  швидкість корозії починає трохи збільшуватися. При температурах стінки 100°C і 130°C зі збільшенням вмісту води від  $W^r = 4\%$  до  $W^r = 30\%$  швидкість корозії плавно зменшується з 0,195 мм/рік до 0,115 мм/рік і з 0,17 мм/рік до 0,085 мм/рік, відповідно. А от при температурах стінки  $t_{cm}$  рівними 110, 115, 120°C (у районі «кислотного піка корозії») зі збільшенням вмісту води в емульсії до  $W = 30\%$  швидкість корозії значно знижується з 0,4...0,45 мм/рік до 0,1 мм/рік.

За даними цих залежностей можливе визначення граничної швидкості корозії при різних температурах стінки. Крива залежності  $K = f(W^r)$  при  $t_{cm} = 115^\circ\text{C}$  характеризує центр зони значень швидкостей корозії (з відхиленнями  $\pm 10\%$ ), при яких можливий «прохід» над кислотним піком корозії (рис. 5), тобто при цій температурі швидкість корозії максимальна, а при інших температурах вона нижче (крім швидкості корозії при 70°C). Значення цих швидкостей корозії визначається по вертикалі від точки перетинання з координатами прийнятої допустимої швидкості корозії  $K_{дон}$  і  $W^r$  (рис. 5). Крім того, це дає можливість визначити величину вмісту води у ВПЕ, що забезпечує прийняте допустиме значення швидкості корозії. Наприклад, при прийнятому допустимому значенні швидкості корозії  $K_{дон} = 0,23$  мм/рік вміст води в емульсії  $W^r = 17\%$ . При цьому вмісті води у ВПЕ швидкість корозії нижче при температурах стінки вище 80°C і тільки при  $t_{cm} = 70^\circ\text{C}$  вона більше прийнятого значення. Це дає можливість прийняти

температуру відхідних газів 110°C (при різниці температур газу-стінка 30°C). При вмісті води в емульсії вище 20% спостерігається зона мінімальної швидкості корозії в межах 0,2...0,25 мм/рік у всьому діапазоні температур стінки від 80°C и вище.

За даними рис. 5 при допустимому значенні швидкості корозії 0,3 мм/рік значення температури стінки може бути прийнято 70°C тільки при  $\alpha = 1,15$  і при вмісті води в емульсії  $W' = 30\%$ .

### Висновки

Результати досліджень показують, що зі збільшенням вмісту води у водопаливній емульсії до 30% швидкість корозійних процесів низькотемпературних поверхонь нагрівання в області «кислотного піка» знижується в 3...5 разів, що дозволяє знизити температуру відхідних газів і компенсувати зниження ККД котлів при спалюванні ВПЕ з більшим вмістом води. Зі зменшенням коефіцієнта надлишку повітря швидкість корозії знижується при спалюванні як обводнених, так і необводнених палив. Тому можливо для збереження або підвищення ККД знижувати коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  до рівня 1,05...1,07.

### Перелік використаних джерел:

1. Внуков А.К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов / А.К. Внуков. – М. : Энергоиздат, 1981. – 296 с.
2. Магадеев В.Ш. Коррозия газового тракта котельных установок / В.Ш. Магадеев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
3. Резинских В.Ф. Современные проблемы обеспечения безопасности тепломеханического оборудования при продлении сроков его службы / В.Ф. Резинских, Е.А. Гринь // Теплоэнергетика. – 2013. – № 1. – С. 17-24.
4. Корниенко В.С. Исследование динамики низкотемпературной коррозии и загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов / В.С. Корниенко // Рыбне господарство України. – 2013. – № 3 (86). – С. 62-65.
5. Горячкин В.Ю. Интенсивность коррозионных процессов в утилизационных котлах при сжигании водотопливных эмульсий / В.Ю. Горячкин, В.С. Корниенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 101-110. – (Серия : Морская техника и технология).
6. Горбов В.М. Исследование интенсивности коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий / В.М. Горбов, А.В. Горячкин // Збірник наукових праць УДМТУ / УДМТУ. – Миколаїв, 2005. – № 5 (391). – С. 87-95.
7. Скорчеллетти В.В. Теоретические основы коррозии металлов / В.В. Скорчеллетти. – Л. : Химия, 1973. – 264 с.
8. Томашов Н.Д. Пассивность и защита металлов от коррозии / Н.Д. Томашов, Г.П. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 208 с.
9. Рабинович Д.И. Исследование коррозии при сжигании сернистых мазутов с малыми избытками воздуха / Д.И. Рабинович, В.Ю. Горячкин // Электрические станции. – 1970. – № 6. – С. 21-24.

### References:

1. Vnukov A.K. *Teplokhimicheskie protsessy v gazovom trakte parovykh kotlov* [Thermochemical processes in the gas path of steam boilers]. Moscow, Jenergoizdat Publ., 1981. 296 p. (Rus.)
2. Magadeev V.Sh. *Korroziia gazovogo trakta kotel'nykh ustanovok* [Corrosion of the gas path of boiler plants]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1986. 272 p. (Rus.)
3. Rezinskikh V.F., Grin' E.A. *Sovremennye problemy obespecheniia bezopasnosti teplomekhanicheskogo oborudovaniia pri prodlenii srokov ego sluzhby* [Modern problems of ensuring safety of thermal and mechanical equipment during extension of its service life]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2013, no. 1, pp. 17-24. (Rus.)
4. Kornienko V.S. *Issledovanie dinamiki nizkotemperaturnoi korrozii i zagriazneniia poverkhnostei nagreva utilizatsionnykh kotlov* [Research of low temperature corrosion and pollution dynamics low-temperature heating surfaces of exhaust gas boilers]. *Ribne gospodarstvo Ukraini – Fishing industry of Ukraine*, 2013, no. 3 (86), pp. 62-65. (Rus.)



5. Gorjachkin V.Ju., Kornienko 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: Morskaja tekhnika i tekhnologija – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology*, 2013, no. 2, pp. 101-110. (Rus.)
6. Gorbov V.M., Gorjachkin A.V. Issledovanie intensivnosti korrozionnykh protsessov pri szhiganii vodomazutnykh emul'sii [Study of corrosion processes intensity during the combustion of water-fuel emulsions] *Zbirnyk naukovykh prac' UDMTU – The collection of scientific works USMTU*, 2005, no. 5 (391), pp. 87-95. (Ukr.)
7. Skorshelletti V.V. *Teoreticheskie osnovy korrozii metallov* [Theoretical foundations of metal corrosion]. St. Peterburg, Himija Publ., 1973, 264 p. (Rus.)
8. Tomashov N.D., Chernov G.P. *Passivnost' i zashhita metallov ot korrozii* [Passivity and protection of metals from corrosion]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 208 p. (Rus.)
9. Rabinovich D.I., Gorjachkin V.Ju. Issledovanie korrozii pri szhiganii sernistykh mazutov s malymi izbytkami vozdukh [Study of corrosion during burning of sulphurous fuel oils with low excess air]. *Elektricheskie stantsii – Electric stations*, 1970, no. 6, pp. 21-24. (Rus.)

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

Стаття надійшла 23.10.2018

УДК 621.18.192:662.94

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160238

© Тендитный Ю.Г.<sup>1</sup>, Тендитная Н.В.<sup>2</sup>, Горячкин В.Ю.<sup>3</sup>,  
Корниенко В.С.<sup>4</sup>

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

*Продолжение ресурса теплоэнергетического оборудования, который на данный момент – единственный выход из критического положения, дает значительный экономический эффект. Учитывая равномерный характер и низкую скорость низкотемпературной коррозии при сжигании водомазутных эмульсий с водосодержанием 30% в работе предложена методика оценки ресурса работы металла низкотемпературных поверхностей нагрева при температурах поверхности металла трубы выше 80°C, при которых наблюдается равномерная коррозия.*

**Ключевые слова:** низкотемпературная поверхность нагрева, коррозия, ресурс работы, водомазутные эмульсии.

**Тендітний Ю.Г., Тендітна Н.В., Горячкін В.Ю., Корнієнко В.С. Визначення ресурсу роботи низкотемпературних поверхонь нагріву.** Продовження ресурсу теплоенергетичного обладнання, який на даний момент – єдиний вихід з критичного становища, дає значний економічний ефект. З огляду на рівномірний характер і низьку швидкість низкотемпературної корозії при спалюванні водомазутних емульсій з водовмістом 30% в роботі запропонована методика оцінки ресурсу роботи

<sup>1</sup> ст. преп., Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Херсон, [nten.hfnuk@gmail.com](mailto:nten.hfnuk@gmail.com)

<sup>2</sup> ст. преп., Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Херсон, [nten.hfnuk@gmail.com](mailto:nten.hfnuk@gmail.com)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, г. Херсон

<sup>4</sup> преп., Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Херсон, [kornienkovika1987@gmail.com](mailto:kornienkovika1987@gmail.com)