

DOI 10.15589/jnn20170205

УДК 621.18.192:662.94

ПЗ0

## IMPACT OF THE COMBUSTION MODES OF LIQUID SULFUR FUEL ON THE RATE OF LOW-TEMPERATURE CORROSION

### ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ СЕРНИСТЫХ ТОПЛИВ НА СКОРОСТЬ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ

**Yurii H. Tenditnyi**  
nten.hfnuk.@qmail.com  
ORCID: 0000-0001-5163-6138

**Ю. Г. Тендитный,**  
ст. преп.

*Kherson Branch of the Admiral Makarov National University Of Shipbuilding, Kherson*

*Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Херсон*

**Abstract.** Intensity of the low-temperature sulfuric-acid corrosion when burning standard fuel oil and water-oil emulsions with the water content up to 30.0% has been considered, as well as the dynamics of these processes. The aim of this paper is to analyze the results of the study of the dynamics of the low-temperature sulfuric-acid corrosion, which allows predicting its development during long-term impact of aggressive flue gases. It also enables evaluating the influence of fixed and variable conditions on reliability and durability of low-temperature heating surfaces when burning standard sulfur fuels, as well as water-oil emulsions with water content of up to 30.0%, under exposure to fixed factors (the content sulfur in fuel oil, the air excess coefficient  $\alpha$ , the metal temperature  $t_{cr}$ , the water content in the emulsion) and variable conditions (fluctuations of  $\alpha$  and  $t_{cr}$ ). A statistical analysis of the impact of variable operating conditions of convective surfaces with temperatures below the sulfuric acid vapor dew point is carried out. The experimental dependences of the corrosion processes dynamics are obtained. The results of the study of the fuel oil and water-oil emulsion burning are compared. The regression equations obtained on the basis of these studies allowed building dependences of the corrosion rate at different temperatures of the wall, the air excess and time of gas exposure up to 1000 hours. It allowed comparing corrosive zones under the change of these factors and making a conclusion about the possibility of achieving a high boiler efficiency by burning water-oil emulsions.

**Keywords:** fuel oil; water-oil emulsion; low-temperature corrosion; variable conditions; reliability.

**Аннотация.** Выполнен анализ результатов исследований динамики развития низкотемпературной серноокислотной коррозии и влияния на ее интенсивность постоянно действующих факторов (наличие серы в мазуте, коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , температур металла  $t_{cr}$ , водосодержания эмульсии) и переменных режимов (колебаний  $\alpha$ ,  $t_{cr}$ ) при сжигании сернистых стандартных мазутов и водомазутных эмульсий с водосодержанием до 30,0 %.

**Ключевые слова:** мазут; водомазутная эмульсия; низкотемпературная коррозия; переменные режимы; надежность.

**Анотація.** Виконано аналіз результатів досліджень динаміки розвитку низькотемпературної сірчаноокислотної корозії й впливу на її інтенсивність постійних факторів (наявності сірки в мазуті, коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$ , температур металу  $t_{cr}$ , водовмісту емульсії) і змінних режимів (коливань  $\alpha$ ,  $t_{cr}$ ) під час спалювання сірчистих стандартних мазутів і водомазутних емульсій з водовмістом до 30,0%.

**Ключові слова:** мазут; водомазутна емульсія; низькотемпературна корозія; змінні режими; надійність.

## REFERENCES

- [1] Vnukov A. K. *Teplohimicheskie protsessy v gazovom trakte parovykh kotlov* [Thermochemical processes in the gas path of steam boilers]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 296 p.
- [2] Gerasimov V. V. *Prognozirovanie korrozii metallov* [Prediction of corrosion of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 152 p.
- [3] Gorbov V. M., Goriachkin A. V. *Issledovanie intesivnosti korroziionnykh protsessov pri szhyganii vodomazutnykh emulsiy* [Study of the intensity of corrosion processes when burning water-oil emulsions]. *Zb. nauk. prats UDM-TU — Collection of scientific publications of USMTU*. Nikolaev, UDMTU Publ., 2003, no. 5 (391), pp. 87–95.
- [4] Goriachkin V. U., Goriachkin A. V., Tenditniy Y. G. *Obespechenie nadezhnosti raboti sudovykh kotlov pri szhyganii vodotoplivnykh emulsiy (VTE)* [Ensuring reliability of the ship boiler operation when burning water-fuel emulsions]. *Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnologii na transporti* [Modern information and innovative technologies in transport]. Kherson, 2009, pp. 60–65.
- [5] Horiachkin V. Yu., Horiachkin A. V., Akimov O. V., Iutinskiy V. O., Korniienko V. S. *Sposib zakhystu metalu nyzkotemperaturnykh poverkhon nahrivu kotla vid sirchanokyslotnoi korozii* [Method of protection of metal of low-temperature heating surfaces of the boiler from the sulfuric-acid corrosion]. *Patent na vynakhid* [Patent for invention], 2012.
- [6] Goriachkin V. U., Iytinskuy V. O. *O korroziionnykh procesakh pri szhyganii obvodnennykh topliv* [On corrosion processes when burning of watered fuels]. *Sudovoe energomashinostroenie* [Ship power engineering]. Nikolaev, NKI Publ., 1983, pp. 43–51.
- [7] Kolpakov S. P. *Ispolzovanie toplivnykh suspenziy v sudovykh parovykh kotlakh* [Use of fuel suspensions in ship steam boilers]. *Sudostroenie* [Shipbuilding], no. 32, 2001, pp. 32–36.
- [8] Magadeev V. Sh. *Korroziya gazovogo trakta kotelnykh ustanovok* [Corrosion of the gas path of boiler plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 272 p.
- [9] Tsikerman L. Ya. *Dolgosrochnyy prognos opasnosti gruntovoy korrozii metallov* [Long-term prediction of the danger of ground corrosion of metals]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 172 p.
- [10] Yakubovskiy Yu. V., Sumenkov V. M., Seleznev Yu., Statsenko V. H., Urbanovich A. I. *Ekspluatatsiya proizvodstvennykh kotlov KVG-34K na vodotoplivnoy emulsii* [Operation of production boilers KVG-34K on water-fuel emulsion]. *Rybnoe khozyaystvo* [Fishing industry], 1991, no. 3., pp. 57–60.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время требования к надежности и долговечности работы энергетической установки и ее отдельных элементов при одновременном обеспечении высоких технико-экономических и экологических показателей значительно возрастают, особенно при использовании энергетического оборудования, выработавшего нормативный ресурс эксплуатации. На уровень этих показателей существенное влияние оказывает интенсивность теплехимических процессов: загрязнение и коррозия высокотемпературных и низкотемпературных поверхностей нагрева (НТПН) при сжигании сернистых топлив, которые определяют надежность работы энергетического оборудования, его массогабаритные и экономические показатели.

В процессе эксплуатации вспомогательной котельной установки постоянно происходят колебания значений коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , температур газов и металла  $t_{\text{ст}}$ , поэтому необходимо оценить влияние этих изменений на суммарный показатель скорости низкотемпературной сернокислотной коррозии (НТК) и на расширение коррозионноопасной зоны в НТПН котлов при изменениях их нагрузки.

Таким образом, актуальными являются данные об интенсивности НТК, диапазонах влияния изменений параметров работы котлов в пределах и выше допустимого значения скорости НТК (0,2...0,25 мм/год) при колебаниях  $t_{\text{ст}}$  и  $\alpha$ , что необходимо знать, оценивая эффективность работы, надежность и долговечность элементов СЭУ.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Опубликовано большое количество данных, обобщенных в монографиях [1, 2], которые посвящены процессам образования  $\text{SO}_3$  и паров  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , их конденсации, интенсивности НТК и загрязнения НТПН во время сжигания стандартных мазутов (при  $W^r = 2,0\%$ ) при  $t_{\text{ст}}$  НТПН ниже температуры точки росы  $t_{\text{тр}}$  паров  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Недостаточно исследований интенсивности НТК при сжигании водомазутных эмульсий (ВМЭ) [3–7, 10] и отсутствует анализ влияния на нее переменных режимов работы НТПН. Причем рассматриваются только качественные показатели процессов: о снижении скорости НТК судят по увеличению периода между ремонтами НТПН; об уменьшении

загрязнений – по времени между очистками (которые увеличились в 2 раза [4,10]); о изменении механизма НТК — по переходу местных локальных коррозионных повреждений металла к равномерной коррозии при сжигании ВМЭ [10], что, по-видимому, связано с процессами пассивации поверхности металла.

По мнению [5, 6], при сжигании ВМЭ с  $W^r = 30,0\%$  процессы НТК при  $t_{cr}$  в пределах 75...130 °С происходят в пассивном состоянии поверхности металла вследствие абсорбции  $N_2O_3$  конденсатом  $H_2SO_4$ .

По разработкам [2] скорость коррозии в  $г/м^2 \cdot ч$  может определяться по уравнению  $lgk = -1,25 - 0,5 lg\tau$ . При коррозии металлов, сопровождающейся образованием оксидных слоев, убыль металла в  $г/м^2$  находится по формуле  $\Delta G = -A \cdot \tau^{0,5} \cdot \exp(-0,5Q/RT \cdot 10^{-3})$ , где  $Q$  – энергия активации поверхностной диффузии (для многих оксидов  $Q = 75,5$  кДж/моль). В общем виде скорость коррозии в [2] представляется как  $lgk = a - b/T \cdot 10^{-3} - 0,5 lg\tau$ .

Согласно [1, 9] развитие коррозионных процессов с водородной и кислородной деполяризацией в диффузионном и кинетическом режимах аппроксимируются степенными зависимостями (СТ) вида  $\Delta G = C \cdot \tau^n$  (для глубины коррозии вида  $\delta_k = C \cdot \rho_m^{-1} \cdot \tau^n$ , где  $n$  — показатель интенсивности коррозии по времени  $\tau$  (при кинетическом режиме  $n = 1$ , при диффузионном  $n$  близко к 0,5);  $C$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий совместное влияние на скорость коррозионных процессов всех рассмотренных факторов.

При исследованиях кинетики коррозии рассматривают первоначальную и установившуюся (основную) стадию её развития.

Характер изменения показателя степени в уравнении убыли массы металла вследствие коррозии при заданной температуре в первоначальной стадии процесса может быть выражен в виде формулы, как принято в [9]:

$$n = n_0 + (1 - n_0) \cdot e^{-\alpha\tau},$$

где  $\alpha$  — темп изменения показателя степени в первоначальной стадии;  $n_0$  — показатель степени в основной стадии коррозии.

Глубина коррозии  $\delta_k(\tau)$  может быть определена путем использования уравнения динамики, в котором один из членов уравнения будет обозначать «инерцию» коррозионного процесса, а другой — его затухание (аперриодический закон второго порядка (АП-II) [9]):

$$T_2^2 \frac{d^2\delta_k}{d\tau^2} + T_1 \frac{d\delta_k}{d\tau} + \delta_k = AI\tau \quad (1)$$

где  $I$  — величина коррозионного тока;  $\tau$  — время коррозии металла;  $T_2$  — величина, характеризующая инерцию коррозии металла в данной среде;  $T_1$  — ко-

эффициент, описывающий затухание процесса коррозии (постоянная времени);  $K = \frac{d\delta_k}{d\tau}$  — скорость кор-

розии металла;  $K' = \frac{d^2\delta_k}{d\tau^2}$  — ускорение коррозионного процесса.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** — анализ результатов исследований динамики НТК, что позволяет не только прогнозировать её развитие на длительное время воздействия агрессивных дымовых газов, но и оценить влияние постоянных и переменных режимов работы на надежность и долговечность НТПН при сжигании сернистых стандартных топлив с  $W^r = 2,0\%$  и ВМЭ под действием постоянных факторов ( $S^r$ ,  $\alpha$ ,  $W^r$ ), а также переменных режимов (колебаний  $\alpha$ ,  $t_{cr}$ ).

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В связи с влиянием на интенсивность коррозионных процессов большого количества факторов, поставленные в работе цели могут быть достигнуты только путем экспериментальных исследований с привлечением статистических данных, их обработки с построением математической модели рассматриваемых процессов, ее структурной и параметрической идентификации, выбора лучшей из них по минимальным погрешностям и максимальному значению коэффициента детерминации  $R^2$ .

Анализ процессов НТК проведен на экспериментальной установке во время сжигания мазутов М40, М100 и ВМЭ на их основе при изменении содержания серы  $S^r$  от 0,7 до 2,0%, коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  от 1,01 до 1,5 с водосодержаниями  $W^r$ , равными 4, 10, 15, 17 и 30,0%, и обеспечении стабильности параметров работы в каждом опыте (скорость газов ~ 7 м/с, температура газов ~ 250 °С).

Аппроксимация данных осуществлялась по значениям убыли массы металла образцов  $\Delta G$ , полученных в течение 2, 4, 8 и 12 часов воздействия газов с проверкой адекватности найденных регрессионных уравнений с помощью результатов 100-часовых экспериментов.

На рис. 1 представлено сравнение динамики развития НТК для двух наиболее характерных режимов в процессе сжигания стандартного мазута ( $S^r = 1,5\%$ ,  $W^r = 2,0\%$ ) и ВМЭ ( $S^r = 1,8\%$ ,  $W^r = 30,0\%$ ) при близких по значению  $\alpha$  (1,35...1,45), выбор которых обусловлен тем, что, по многочисленным статистическим данным [1, 3, 4, 6, 7, 8, 10], стабилизация скорости коррозии наблюдается при значениях  $\alpha$  в пределах 1,2...1,4.

Полученные регрессионные уравнения, изображенные на рис. 1, позволяют достоверно предположить развитие скорости НТК на любое время воздействия газов (проверка, осуществленная по результатам 100-часовых опытов, подтверждает их корректность), поэтому появляется возможность прогнозирования НТК и на 1000 часов.

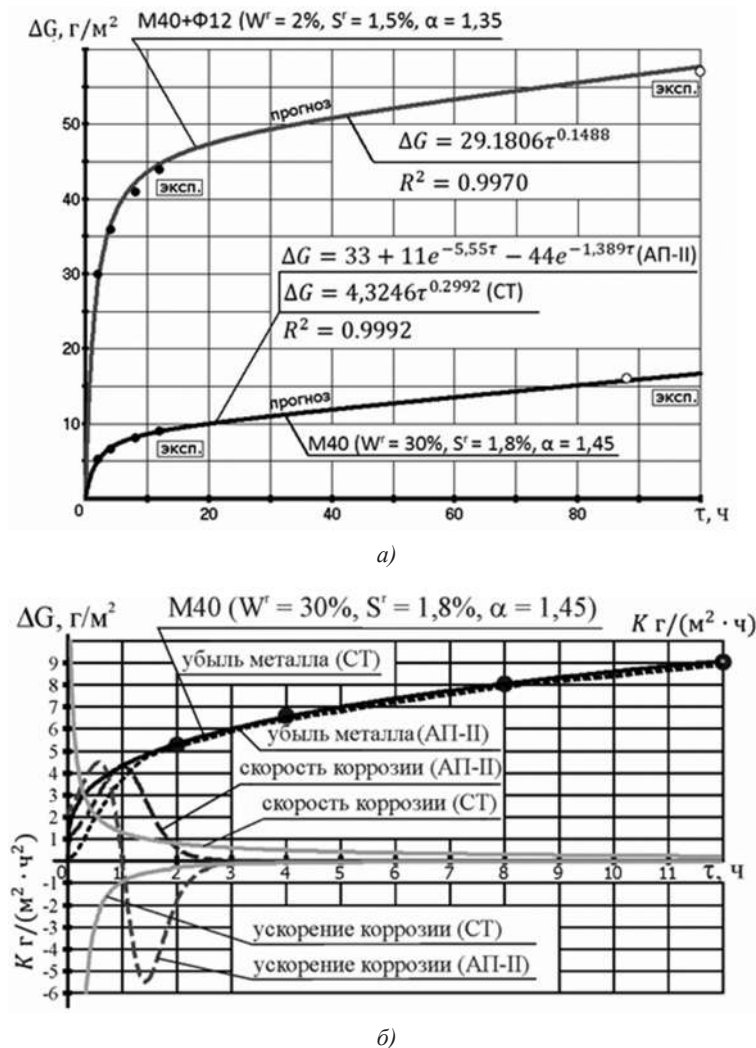


Рис. 1. Исследование динамики коррозионных процессов:

а) зависимость убыли металла  $\Delta G$  при сжигании стандартного топлива М40+Φ12 и ВМЭ на основе М40; б) математическая обработка данных по степенной функции (СТ) и по апериодической функции 2-го порядка (АП-II):

скорость коррозии —  $K = (\Delta G/\Delta\tau)'$ ; ускорение коррозии —  $K' = (\Delta G/\Delta\tau)''$

На основании анализа зависимостей  $\Delta G = f(\tau)$  (рис. 1) с учетом литературных данных [3, 4, 6], по результатам 8-часовых опытов построены зависимости убыли металла  $\Delta G$  от содержания серы  $S^r$  в топливе, воды  $W^r$  в эмульсии (рис. 2) при  $t_{cr}$  около 105...115 °С (в области «кислотного» коррозионного пика) и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ .

При содержании серы  $S^r$  в мазуте и ВМЭ от 0,5 до 2,0% (рис. 2, а) диапазон убыли металла  $\Delta G$  вследствие НТК при сжигании ВМЭ с  $W^r = 30,0\%$  в 6...7 раз меньше по сравнению с  $\Delta G$  при сжигании чистого мазута с  $W^r = 2,0\%$ .

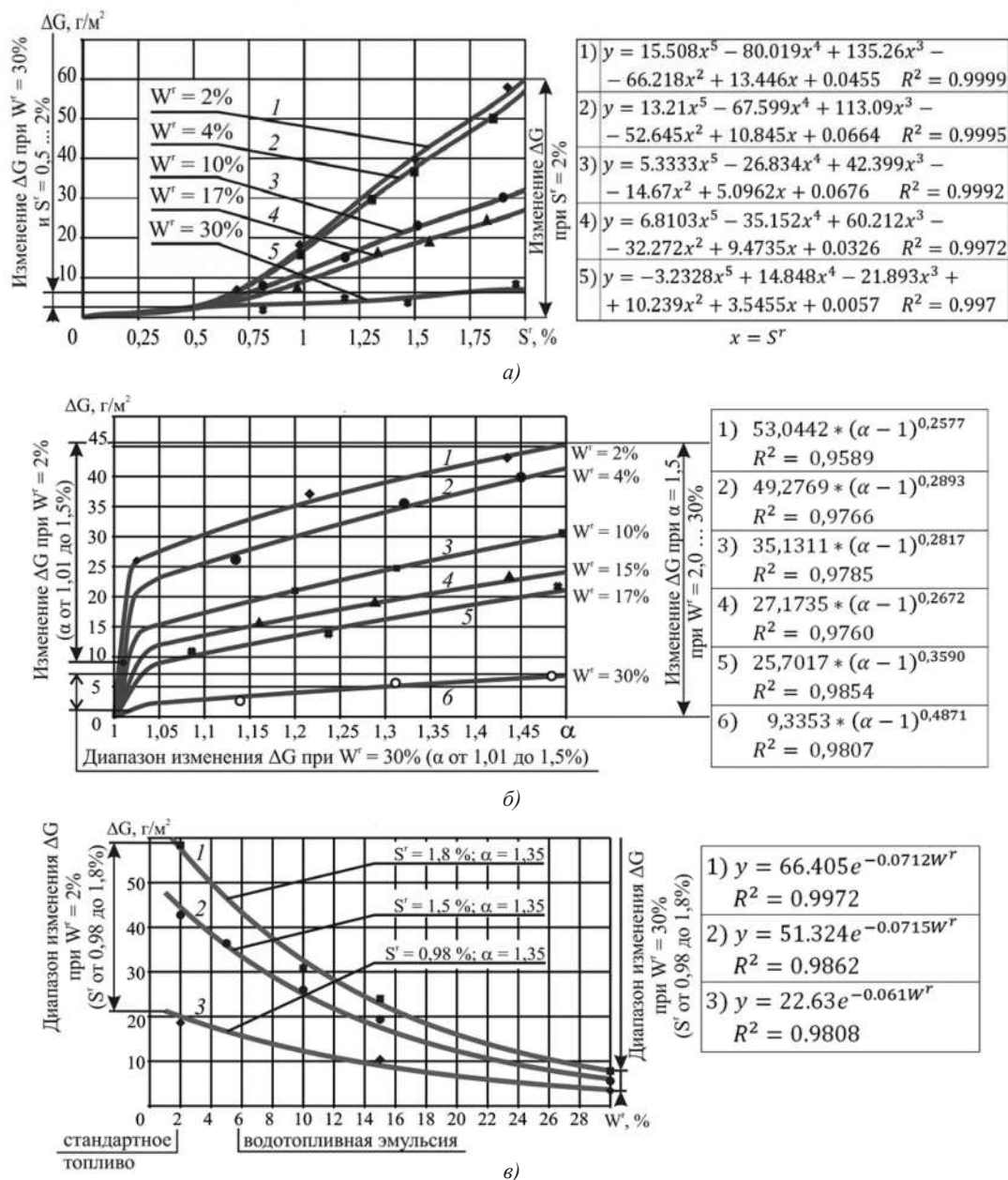
В процессе сжигания ВМЭ с  $W^r = 30,0\%$  при значениях  $\alpha$  в пределах от 1,01 до 1,45 величина убыли металла  $\Delta G$  вследствие коррозии (рис. 2, б) меняется незначительно (практически в тех же пределах, что и под влиянием  $S^r$  при  $W^r = 30\%$ ). Поэтому, учиты-

вая характер изменения зависимостей  $\Delta G = f(S^r)$  и  $\Delta G = f(\alpha)$ , можно утверждать, что мазут с  $S^r$  до 2,0% и выше необходимо сжигать в виде эмульсии с  $W^r = 30,0\%$  в любом достижимом при эксплуатации избытке воздуха  $\alpha$ . Следует отметить, что во время сжигания ВМЭ вполне возможно снизить  $\alpha$  до уровня 1,1...1,05, вследствие чего интенсивность НТК при использовании ВМЭ будет еще меньше.

Представленные на рис. 2, в зависимости  $\Delta G = f(W^r)$  практически подтверждают этот вывод: в диапазоне изменения  $S^r$  от 0,98 до 1,8% при сжигании ВМЭ с  $W^r = 30,0\%$  интенсивность НТК почти одинаковая (с расхождением в пределах  $\pm 5\%$ ), т. е. находится в пороге погрешности определения скорости коррозии, принимаемой 10...20% [1, 2, 3, 8, 9].

Полученные экспериментальные данные и регрессионные уравнения кинетики НТК при разных  $t_{cr}$



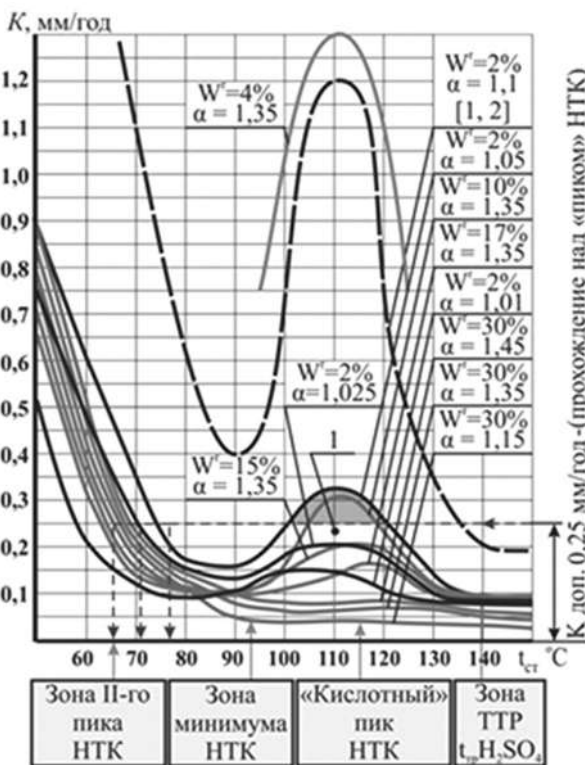
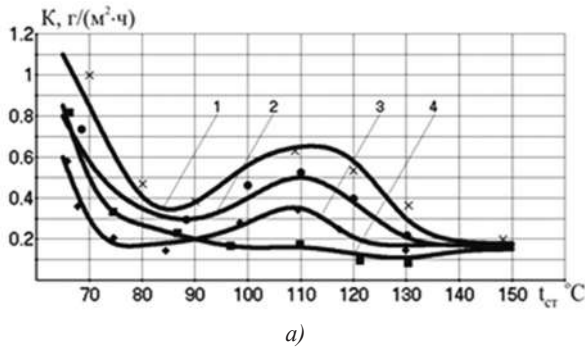


**Рис. 2.** Зависимость убыли металла  $\Delta G$  вследствие НТК в зоне кислотного пика ( $t_{cr} = 105 \dots 115^\circ C$ ) ( $\tau = 8$  час): а) от содержания серы  $S^r$  в мазуте; б) от избытка воздуха  $\alpha$  при горении ВМЭ; в) от содержания воды  $W^r$  в ВМЭ (номерам зависимостей на рисунке соответствуют номера позиций полученных уравнений)

и временах развития НТК (рис. 1), режимах сжигания мазутов и ВМЭ (при содержаниях  $S^r$  от 0,5 до 2,0%;  $\alpha$  в пределах от 1,01 до 1,5;  $W^r$  — 2,0...30,0%) (рис. 2) при температурах НТПН от 55 до 200 °С предоставили возможность (с учетом и литературных данных [1, 3, 4, 5, 6]) построить зависимости скорости коррозии  $K = d(\Delta G)/dt$  при разных режимах и времени воздействия потока дымовых газов: по прямым измерениям  $\Delta G$  за 100 часов (рис. 3, а) и рассчитанным регрессионным уравнениям — прогнозируемые значения  $K$  за 1000 часов (рис. 3, б), корректность которых подтверждается в [1, 3, 8].

По мнению многих исследователей [1, 8], допустимым уровнем скорости НТК считается 0,2... 0,25 мм/год. Так как при сжигании стандартных мазутов период между силовыми очистками (при которых ставится цель полного удаления загрязнений) составляет 1000 часов, то следует при сравнении эффективности НТК с разными условиями принимать допустимую скорость НТК на уровне 0,2... 0,25 мм/год при  $\tau = 1000$  часов (горизонтальная линия на рис. 3, б).

Ниже этой величины в области кислотного пика ( $t_{cr} = 110 \dots 100$  °С) проходят кривые зависимостей



1 — М100 ( $Sr = 2,0\%$ ;  $Wr = 2,0\%$ )  $\alpha = 1,05$ ,  $\tau = 100$  ч;  $\tau = 100$  ч;  
 $y = -3E - 09x^5 + 2E - 06x^4 - 0,0006x^3 + 0,0775x^2 - 4,7403x + 112,84$   $R2 = 0,9912$ ;  
 2 — М100 ( $Sr = 2,0\%$ ;  $Wr = 2,0\%$ )  $\alpha = 1,025$ ,  $\tau = 100$  ч;  
 $y = -7E - 09x^5 + 4E - 06x^4 - 0,0011x^3 + 0,1266x^2 - 7,2867x + 164,59$   $R2 = 0,9955$ ;  
 3 — М100 ( $Sr = 2,0\%$ ;  $Wr = 2,0\%$ )  $\alpha = 1,01$ ,  $\tau = 100$  ч);  
 $y = -2E - 09x^5 + 1E - 06x^4 - 0,0002x^3 + 0,0279x^2 - 1,5784x + 35,093$   $R2 = 0,9999$ ;  
 4 — ВМЭ М40 ( $Sr = 1,8\%$ ;  $Wr = 30,0\%$ )  $\alpha = 1,45$ ,  $\tau = 88$  ч,  
 $y = -3E - 10x^6 + 2E - 07x^5 - 5E - 05x^4 + 0,0077x^3 - 0,6233x^2 + 26,616x - 467,58$   $R2 = 0,7449$

**Рис. 3.** Зависимости скорости низкотемпературной коррозии НТК от температуры стенки  $t_{ct}$  при сжигании мазута и ВМЭ ( $Sr = 1,8...2,0\%$ ;  $Wr = 2,0...30,0\%$ ;  $\alpha = 1,01...1,45$ ):

а) при  $\tau = 88..100$  часов; б) при  $\tau = 1000$  (прогноз развития НТК по регрессионным уравнениям). 1 — уровень НТК при  $\alpha = 1,02...1,03$  [1, 2]

НТК при сжигании стандартного мазута только в режимах при  $\alpha = 1,01$  и  $1,025$ , которые невозможно осуществить в судовых вспомогательных и промышленных котлах. В процессе сжигания ВМЭ с  $Wr = 30,0\%$  в любых режимах при  $\alpha$  ниже  $1,45$ , которые легко реализовать в данных котлах, все зависимости  $K = f(t_{ct})$  будут иметь скорость НТК меньше  $0,2$  мм/год, и так как в этих режимах обеспечена надежность работы НТПН с температурами  $t_{ct}$  ниже точки росы паров серной кислоты (вплоть до  $65..80$  °С), то стремление сжигать сернистые ВМЭ при меньших  $\alpha$  будет обусловлена необходимостью гарантировать более высокие КПД котлов.

С точки зрения оценки надежности работы НТПН в данных условиях необходимо рассмотреть также влияние кратковременных изменений режимов работы котлов (значения  $\alpha$  и  $t_{ct}$ ), т. к. при этом меняется уровень интенсивности НТК.

На рис. 4 показано сравнение зон коррозионного повреждения в результате НТК при колебаниях  $\alpha$  и  $t_{ct}$  во время сжигания стандартных мазутов и ВМЭ при уменьшении ( $D < D_{ном}$ ) и увеличении нагрузки котла ( $D > D_{ном}$ ) по отношению к номинальной нагрузке  $D_{ном}$ .

При сжигании стандартного топлива (рис. 4, а) коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  может колебаться от  $1,01$  до  $1,2$ , а изменение температуры  $t_{ct}$  НТПН рассмотрено в пределах  $\pm 15$  °С по отношению к номинальному режиму ( $D_{ном}$ ).

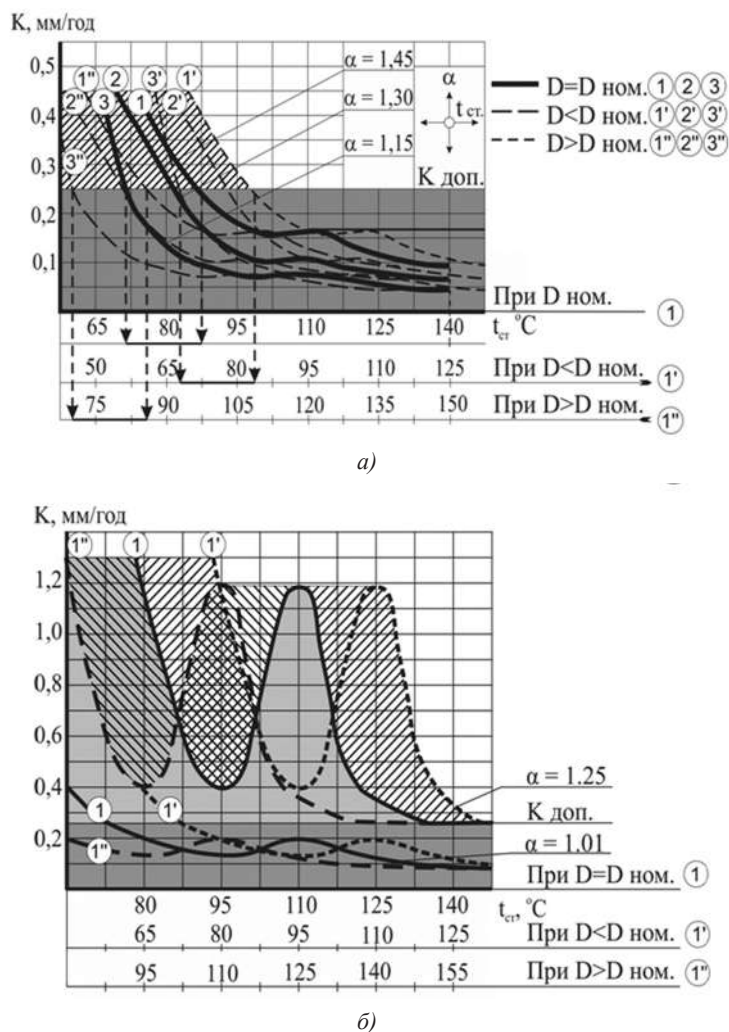
Представленные зависимости показывают, что только при  $\alpha = 1,01$  и  $1,025$  скорость НТК ниже допустимого  $K_{доп} = 0,25$  мм/год при любых значениях  $t_{ct}$ . С учетом изменений  $\alpha$  и  $t_{ct}$  при более высоком значении  $\alpha$  вся коррозионноопасная зона располагается выше линии  $K_{доп}$ .

При нагрузке  $D_{ном}$  (проектное решение при  $\alpha = 1,2$ ) минимальное значение  $t_{ct}$ , которое обеспечивает  $K_{доп}$ , равно  $\approx 135$  °С. Если  $D < D_{ном}$  в связи со снижением  $t_{ct}$  НТПН, то коррозионноопасная зона, расположенная выше  $K_{доп}$ , перемещается вправо до  $125$  °С (в зону прежней  $t_{ct} \approx 140$  °С при  $D_{ном}$ ), т. е. коррозионноопасная зона расширяется. Так как СЭУ часто эксплуатируется при пониженных нагрузках, то часть НТПН в этих режимах будет находиться в зоне значительной интенсивности НТК, что снижает долговечность их работы.

При  $D > D_{ном}$  конечная температура стенки НТПН имеет значение  $t_{ct} \sim 150$  °С, что существенно выше температуры точки росы  $H_2SO_4$  ( $t_{рH_2SO_4}$ ), равной  $\sim 135$  °С, т. е. коррозионноопасная зона смещается влево. В этом случае имеет место неэффективное использование энергии дымовых газов.

Во время сжигания ВМЭ с  $Wr = 30,0\%$  (рис 4, б) ситуации с положением коррозионноопасной зоны при изменении нагрузки  $D$  совсем другие.

При  $D_{ном}$  минимальная  $t_{ct}$ , соответствующая допустимой скорости НТК  $K_{доп}$ , становится намного ниже



**Рис. 4.** Сравнения коррозионноопасных зон НТК при колебаниях  $\alpha$  и  $t_{ст}$  при изменении нагрузки котла  $D_{ном}$ : а) при сжигании стандартных мазутов ( $W^r = 2,0\%$ ) (режимы работы 1; 1'; 1''); б) при сжигании ВМЭ ( $W^r = 30,0\%$ ) (режимы: 1 — при  $\alpha = 1,45$ ; 2 — при  $\alpha = 1,35$ ; 3 — при  $\alpha = 1,25$ ; 1', 1''; 2', 2''; 3', 3'' — переменные режимы при соответствующих  $\alpha$  (заштрихованы зоны коррозии выше  $K_{доп}$  при переменных режимах)

$t_{р\ H_2SO_4}$  и меняется от 85 °С при  $\alpha = 1,45$  до ~ 68 °С при  $\alpha = 1,15$  (границы зон указаны на рис. 4, б стрелками). При  $D < D_{ном}$  (режимы 1', 2' и 3') «коррозионнодопустимая» тоже смещается вправо и  $t_{ст}$  колеблется от ~ 83 °С при  $\alpha = 1,45$  до 66 °С при  $\alpha = 1,15$ . При  $D > D_{ном}$  (режимы 1'', 2'' и 3'') уровень скорости НТК выше  $K_{доп}$  будет иметь место только при  $t_{ст} \approx 88$  °С при  $\alpha = 1,45$ . Таким образом, сжигание ВМЭ с  $W^r = 30,0\%$  при принятых значениях нагрузки  $D$  обеспечивается более высокая надежность работы НТПН и возможность одновременно увеличить КПД, что объясняется процессами пассивации НТПН при  $t_{ст}$  ниже 120 °С оксидами азота [5].

Если придерживаться режима сжигания ВМЭ при  $\alpha$  на уровне 1,05...1,07, то минимальная  $t_{ст}$ , соответствующая  $K_{доп}$  будет равна 60 °С, что дает возможность подавать в НТПН питательную воду прямо из теплого ящика и обеспечить КПД котла на уровне 96,0%.

**ВЫВОДЫ.** 1. Получены экспериментальные данные и уравнения зависимостей скорости НТК при сжигании стандартных мазутов и ВМЭ на их основе при содержании серы  $S^r$  от 0,98 до 2,0%, значениях  $\alpha$  от 1,01 до 1,45, водосодержаниях от 2,0 до 30,0%.

2. Установлено, что при водосодержании ВМЭ около 30,0% достигается минимальная скорость НТК на уровне 0,2 мм/год ( $\tau = 1000$  часов) и размеры коррозионноопасной зоны при значениях  $\alpha$  ниже 1,45, что обеспечивает надежность работы НТПН при переменных режимах работы котлов.

3. Отмечено, что для достижения высоких КПД котлов необходимо сжигать ВМЭ с  $W^r = 30,0\%$  при минимально возможных по условиям эксплуатации избытках воздуха  $\alpha$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Внуков А. К.** Теплехимические процессы в газовом тракте паровых котлов [Текст] / А. К. Внуков. — М. : Энергоиздат, 1981. — 296 с.
- [2] **Герасимов В. В.** Прогнозирование коррозии металлов [Текст] / В. В. Герасимов. — М. : Metallurgiya, 1989. — 152 с.
- [3] **Горбов В. М.** Исследование интенсивности коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий [Текст] / В. М. Горбов, А. В. Горячкин // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : УДМУ, 2003. — № 5 (391). — С. 87–95.
- [4] **Горячкин В. Ю.** Обеспечение надежности работы судовых котлов при сжигании водотопливных эмульсий (ВТЭ) [Текст] / В. Ю. Горячкин, А. В. Горячкин, Ю. Г. Тендитный // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : зб. наук. праць— Херсон, 2009. — С. 60–65.
- [5] **Горячкин В. Ю.** Спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчаноокислової корозії [Текст] / В. Ю. Горячкин, А. В. Горячкин, О. В. Акімов, В. О. Іутінський, В. С. Корнієнко. — Патент на винахід, 2012.
- [6] **Горячкин В. Ю.** О коррозионных процессах при сжигании обводненных топлив [Текст] / В. Ю. Горячкин, В. А. Иутинский // Судовое энергомашиностроение : сб. науч. трудов — Николаев : НКИ, 1983. — С. 43–51.
- [7] **Колпаков С. П.** Использование топливных суспензий в судовых паровых котлах [Текст] / С. П. Колпаков // Судостроение. — 2001. — № 32. — С. 32–36.
- [8] **Магадеев В. Ш.** Коррозия газового тракта котельных установок [Текст] / В. Ш. Магадеев. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 272 с.
- [9] **Цикерман Л. Я.** Долгосрочный прогноз опасности грунтовой коррозии металлов [Текст] / Л. Я. Цикерман. — М. : Недра, 1966. — 172 с.
- [10] **Якубовский Ю. В.** Эксплуатация производственных котлов КВГ-34К на водотопливной эмульсии [Текст] / Ю. В. Якубовский, В. М. Суменков, Ю. Селезнев, В. Н. Стаценко, А. И. Урбанович // Рыбное хозяйство. — 1991. — № 3. — С. 57–60.

---

© Ю. Г. Тендітний

Надійшла до редколегії 21.02.2017

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. С. І. Сербін