

## ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 669.1

© Хаджинов Е.А.<sup>1</sup>, Хаджинов А.С.<sup>2</sup>, Христенко М.А.<sup>3</sup>, Пшеничный А.С.<sup>4</sup>

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ И НАГРЕВА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ НА МК «АЗОВСТАЛЬ»

*Разработана математическая модель, позволяющая проанализировать влияние подсосов холодного воздуха в ковшевое пространство на эффективность нагрева кладки. Расчеты, сделанные с помощью данной модели для 350-тонного сталеразливочного ковша на МК «Азовсталь», показали, что минимизация подсосов воздуха позволит снизить расход топлива для подогрева сталеразливочного ковша на 3-5%. Для этого необходимо осуществлять регулирование разрежения в ковше на минимально необходимом уровне, достаточного для полного удаления продуктов сгорания.*

**Ключевые слова:** сталеразливочный ковш, тепловой баланс, подсосы воздуха, эффективность нагрева.

*Хаджинов Е.О., Хаджинов О.С., Христенко М.А., Пшеничный А.С. Оптимізація технології сушки і нагріву сталерозливних ковшів на МК «Азовсталь». Розроблено математичну модель, що дозволяє проаналізувати вплив підсосів холодного повітря в ковшовий простір на ефективність нагріву кладки. Розрахунки, зроблені за допомогою даної моделі для 350-тонного сталерозливного ковшу на МК «Азовсталь», показали, що мінімізація підсосів повітря дозволить знизити витрату палива для підігріву сталерозливного ковша на 3-5%. Для цього необхідно здійснювати регулювання розрядження в ковші на мінімально необхідному рівні, достатнього для повного видалення продуктів згорання.*

**Ключові слова:** сталерозливний ковш, тепловий баланс, підсоси повітря, ефективність нагріву.

*Y.O. Khadzhynov, O.S. Khadzhynov, M.A. Khrystenko, A.S. Pshenichniy. Optimization of the ladle heating and drying technology on Azovstal Iron & Steel Works. The vertical stand for ladle heating at the Azovstal Iron & Steel Works has been examined. The purpose of preheating the steel ladles is to minimize the heat loss of the metal melt during melting and to increase the service life of the ladle lining. One of the main disadvantages of these stands is uncontrolled air suction. The sucked-in cold air mixes with the combustion products, reducing the temperature of the gas in the ladle space and increasing the amount of flue gases going out. This leads to a decrease in the efficiency of the ladle heating and, accordingly, to over-consumption of fuel (natural gas). To solve this problem a mathematical model has been made up. This model is based on the equation of the thermal balance of the ladle and describes the heat flows inside the ladle during the heating process. It makes it possible to analyze the influence of the cold air suction on the heating efficiency. The adaptation of the model was carried out basing on the data of the mode maps for this type of stands. Calculations made with the help of this model for a 350-ton steel-ladle at the Azovstal Iron & Steel Works showed that minimizing air suction will reduce fuel consumption for heating the steel ladle by 3 to 5%. To do this, it is necessary to regulate the underpressure in the ladle at the mini-*

<sup>1</sup> мл. науч. сотр., Институт газа НАН Украины, г. Киев, [evgen.visi@gmail.com](mailto:evgen.visi@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [a.khadzhinov@mail.ru](mailto:a.khadzhinov@mail.ru)

<sup>3</sup> инженер-технолог, МК «Азовсталь», г. Мариуполь, [mark.khrystenko@metinvestholding.com](mailto:mark.khrystenko@metinvestholding.com)

<sup>4</sup> нач. отд. инноваций и развития, МК «Азовсталь», г. Мариуполь, [artem.pshenichnyy@metinvestholding.com](mailto:artem.pshenichnyy@metinvestholding.com)

*must necessary level, sufficient to completely remove the combustion products. It may be reached using automated control system.*

**Keywords:** ladle, heat balance, air suction, heating efficiency.

**Постановка проблеми.** Стенды для сушки и разогрева футеровки сталеразливочных ковшей имеют низкие показатели энергоэффективности. Вместе с тем, широкое внедрение МНЛЗ в сталеплавильное производство создает высокие требования к тепловой подготовке сталеразливочных ковшей.

В настоящее время нет единой концепции организации стенов для сушки или разогрева сталеразливочных ковшей. В качестве основного способа сушки и разогрева футеровки ковшей используют установки, оборудованные газогорелочными устройствами различной конструкции, которые обеспечивают сушку до 600-800°C или высокотемпературный нагрев до 1100-1200°C. Целями предварительного разогрева сталеразливочных ковшей являются минимизация потерь тепла расплава металла в ходе плавки и увеличение срока службы футеровки ковша.

Вертикальные стеноды на металлургическом комбинате «Азовсталь» предназначены для сушки и последующего разогрева стальной ковшей емкостью 350 тонн до температур 800°C и выше. Ключевым недостатком данных стенодов являются неконтролируемые подсосы воздуха через зазор между обечайкой ковша и крышкой величиной до 100 мм.

Подсасываемый холодный воздух смешивается с продуктами горения, снижая температуру газа в ковшевом пространстве и увеличивая количество уходящих дымовых газов. Это приводит к снижению эффективности нагрева ковша и, соответственно, к повышенному расходу природного газа. Оценить эти потери можно составив математическую модель на основе теплового баланса ковшевого пространства.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Целенаправленно проблему подсосов воздуха в ковш практически никто не исследовал. Отчасти это связано с тем, что в процессе сушки избыточный воздух может быть необходим по технологическим соображениям. В большинстве случаев модернизация подобных стенодов заключается в модернизации горелочных устройств, в футеровке крышки ковша современными огнеупорными материалами и во внедрении системы автоматизированного управления стенодом [1]. ЗАО «Концерн «Струйные технологии» [2] предложило для стенода сушки и подогрева ковшей горелку со схемой двойной закрутки потоков энергоносителей, которая обеспечивает улучшенное смешение топлива и окислителя. Авторы [3] с целью уменьшения потери теплопроводности через крышку и зазор между ней и горловиной использовали вместо металлической крышки футерованную. Только «Стальпроект» предложил новую конструкцию горизонтальных стенодов высокотемпературного подогрева футеровки стальной ковшей [4]. Крышка ковша прилегает к его горловине, а дымовые газы удаляются с помощью дымососа. На дымопроводе установлен рекуператор, в котором подаваемый воздух предварительно нагревается до 400°C. Это позволяет повысить температуру горения топлива на 100-200°C.

Математическим моделированием процесса разогрева сталеразливочных ковшей занимался целый ряд авторов [5-9]. Однако ни одна из рассмотренных моделей не учитывает подсосы холодного воздуха через зазор. Только Волкова О. анализирует влияние коэффициента избытка воздуха на теоретическую температуру горения [7].

**Цель статьи** – оценить возможную экономию топлива за счет снижения подсосов воздуха в ковш в процессе нагрева и предложить методы решения данной проблемы.

**Изложение основного материала.** Для решения поставленной задачи была разработана математическая модель, описывающая тепловые потоки внутри ковша в процессе нагрева. Схематично модель представлена на рис. 1.

При составлении модели были сделаны следующие допущения:

- температура газовой фазы во всем пространстве ковша одинакова и равна  $t_r$ ;
- воздух, подмешиваемый через зазор между крышкой и обечайкой ковша  $\Delta\alpha_k$ , равномерно перемешивается с продуктами горения;
- при расчете теплообмена между продуктами горения и поверхностью кладки ковша учитывается только его лучистая составляющая, конвективный теплообмен не учитывается (данное допущение обосновывается тем, что температура газовой фазы довольно существенна, и поэтому лучистая составляющая теплообмена будет явно преобладать).

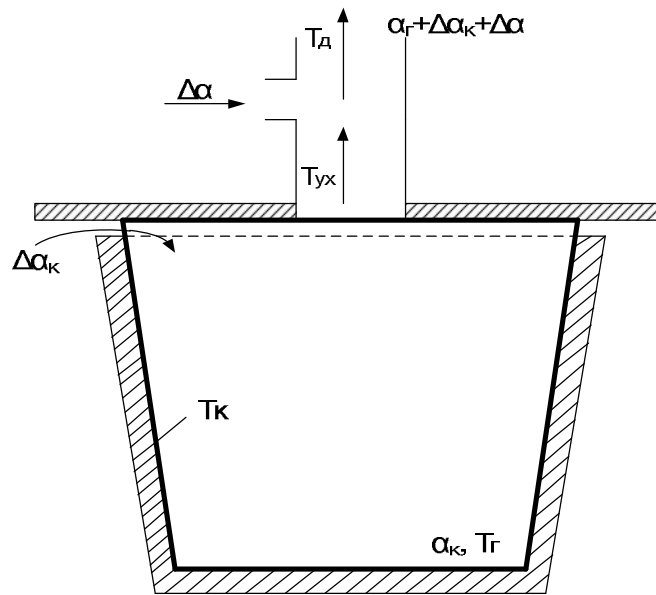


Рис. 1 – Схема теплового баланса газовой фазы внутри ковша

В основе математической модели лежит уравнение теплового баланса для газовой фазы внутри ковша

$$Q_n^p \cdot V_T = \varepsilon_{np} \cdot \sigma_0 \cdot (T_g^4 - T_k^4) \cdot F + c_g \cdot t_g \cdot V_g^0 \cdot \rho_g^0 \cdot \alpha_k, \quad (1)$$

где  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания топлива, МДж/м<sup>3</sup>;  $V_T$  – расход топлива, м<sup>3</sup>/ч;  $\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты между газом и кладкой;  $T_g$  – температура продуктов горения в рабочем пространстве ковша, К;  $T_k$  – температура на поверхности кладки, К;  $F$  – площадь футерованной поверхности ковша, включая крышку, м<sup>2</sup>;  $c_g$  – удельная теплоемкость продуктов горения при температуре  $t_g$ , Дж/кг·°С;  $V_g^0$  – удельный расход продуктов горения при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> топлива;  $\rho_g^0$  – плотность продуктов горения при нормальных условиях ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 101,3$  кПа), кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_k$  – коэффициент избытка воздуха в ковше,  $\alpha_k = \alpha_g + \Delta\alpha_k$ , где  $\alpha_g$  – коэффициент избытка воздуха, подаваемого на горелку,  $\Delta\alpha_k$  – коэффициент избытка воздуха, подмешиваемого в ковш.

Приведенная степень черноты определяется в соответствии с [10, с. 263] как

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_k} - 1},$$

где  $\varepsilon_g$  – степень черноты газа при температуре  $t_g$ ,  $\varepsilon_k$  – степень черноты кладки при температуре  $t_k$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon_g,$$

где  $\varepsilon_{CO_2}$  и  $\varepsilon_{H_2O}$  – степени черноты CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, определяемые по номограммам [10, с. 256],  $\Delta\varepsilon_g$  – поправка, учитывающая взаимопоглощение излучений CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в объеме.

Отношение тепла, излучаемого на кладку, к подведенному теплу определяется как

$$\eta = \frac{\varepsilon_{np} \cdot \sigma_0 \cdot (T_g^4 - T_k^4) \cdot F}{Q_n^p \cdot V_T} \cdot 100\% \quad (2)$$

Коэффициент  $\eta$  характеризует долю полезно отданного тепла и может являться критерием для оценки эффективности нагрева.

Уравнения (1) и (2), составляющие основы математической модели, решались совместно с помощью специально разработанной программы в среде Matlab. Адаптация модели осуществлялась на основании данных режимных карт для данного типа стендов. График режима сушки и последующего нагрева сталеразливочных ковшей массой 350т после капитального ремонта представлен на рис. 2.

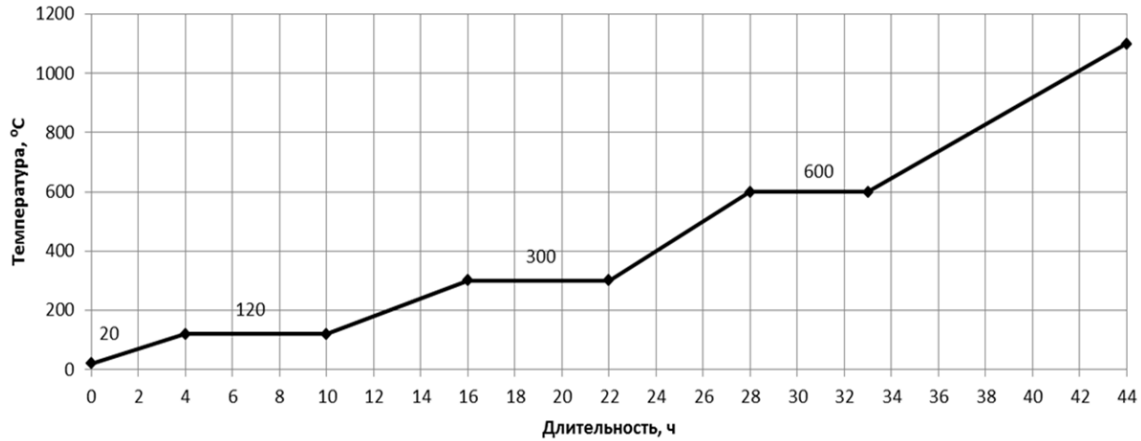


Рис. 2 – График режима сушки и последующего нагрева сталеразливочных ковшей массой 350т после капитального ремонта

Результаты расчетов для нескольких режимов представлены на рис. 3.

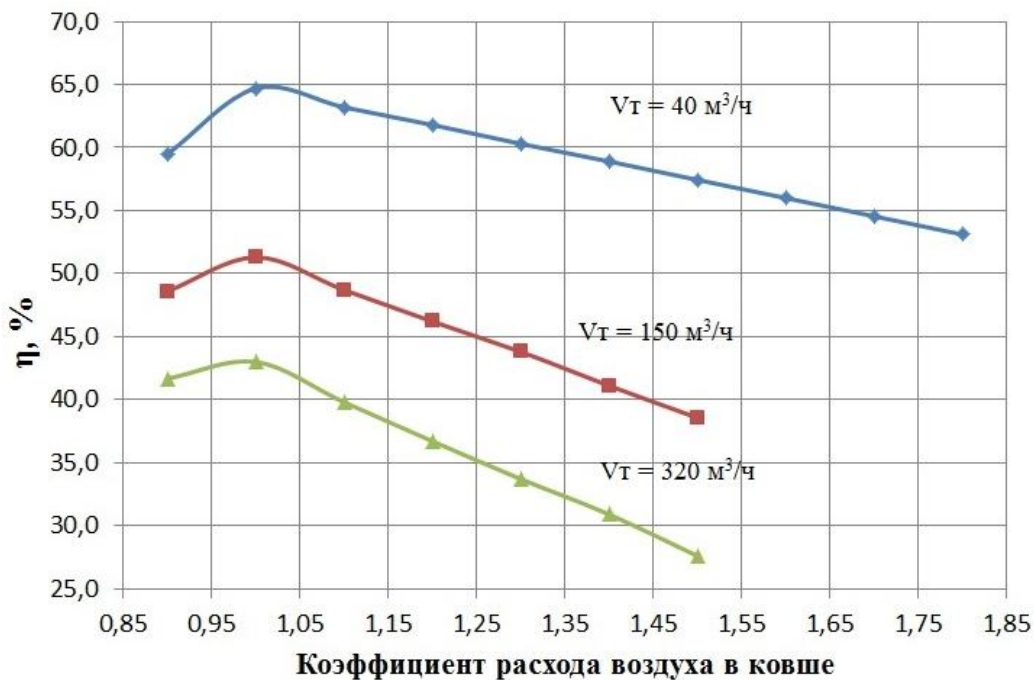


Рис. 3 – Зависимость коэффициента  $\eta$  от коэффициента расхода воздуха в ковше

Значение  $\eta$  в рабочей точке для каждого режима будет отличаться от максимального на величину  $\Delta\eta$ . Значения  $\Delta\eta$  для разных режимов:

- нагрев при  $V_T = 320 \text{ м}^3/\text{ч}$   $\Delta\eta = 1\%$ ;
- сушка при  $V_T = 150 \text{ м}^3/\text{ч}$   $\Delta\eta = 4,5\%$ ;
- сушка при  $V_T = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$   $\Delta\eta = 11,5\%$ .

Среднее значение  $\Delta\eta$  для полного цикла сушки и нагрева составит приблизительно  $\Delta\eta = 3-5\%$ .

Таким образом, контролируя подсосы холодного воздуха и поддерживая коэффициент расхода воздуха в ковше на уровне 1,05, можно получить экономию природного газа порядка 3-5%. Добиться этого можно путем регулирования разрежения в ковше на минимально необходимом уровне, достаточного для полного удаления продуктов сгорания.

### Выводы

Разработанная модель позволяет оценить потери тепла, связанные с подсосами холодного воздуха через зазор между крышкой и обечайкой ковша. Минимизация подсосов воздуха позволит снизить расход топлива для подогрева сталеразливочного ковша на 3-5%. Для этого необходимо осуществлять регулирование разрежения в ковше на минимально необходимом уровне, достаточном для полного удаления продуктов сгорания.

### Список использованных источников:

1. Автоматизированная система управления стандом вертикальной сушки ковшей / В. Переходченко [и др.] // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 3. – С. 32-36.
2. Опыт работы установки для сушки и нагрева сталеразливочных ковшей / В.А. Спирин [и др.] // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 50-51.
3. Разработка и внедрение футерованной крышки для стандов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей и новых режимов их тепловой обработки / А.С. Безчерев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. – 2009. – № 5. – С. 62-66.
4. Современные установки для сушки и высокотемпературного нагрева ковшей / Б.С. Чайкин [и др.] // Электрометаллургия. – 2006. – № 4. – С. 37-42.
5. Семахин В.В. Оптимизация сушки и высокотемпературного нагрева футеровки сталеразливочных ковшей / В.В. Семахин, Л.Е. Вяльшина // Металлург. – 2004. – № 6. – С. 58-59.
6. Бейцун С.В. Исследование на компьютерной модели разогрева сталеразливочных ковшей / С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, В.Ю. Мурдый // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2015. – Вип. 30. – Т. 1. – С. 106-111. – (Серія: Технічні науки).
7. Ladle Heating Procedure and Its Influence on the MgO-C-Oxidation / O. Volkova [et al.] // Materials and Manufacturing Processes. – 2008. – Vol. 23. – Iss. 8. – Pp. 758-763.
8. Glaser B. Thermal Modelling of the Ladle Preheating Process / B. Glaser, M. Gornerup, D. Sichen // Steel research. – 2011. – № 12. – Pp. 1425-1434.
9. Development and commercial introduction of a pulse regime for heating stands used to dry and heat steelpouringladles / A.V. Sushchenko, O.V. Nosochenko, M.L. Khaznaferov, I.I. Taushan, A.I. Travinchev // Metallurgist. – 2002. – Т. 46. – № 9-10. – С. 271-275.
10. Теоретические основы / В.А. Кривандин [и др.]. – М. : Металлургия, 1986. – 422 с. – (Металлургическая теплотехника : учебник для вузов : в 2-х т.; Т. 1).

### References:

1. Perehodchenko V., Rebedak A., Garkavenko S., Shevchenko O., Levina L., Borisov A., Hmol'janinova N., Kolesnichenko D. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya stendom vertikal'noy sushki kovshei [Automated control system for the ladle preheating vertical stand]. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizacii – Modern automated technologies*, 2006, no.3, pp. 32-36. (Rus.)
2. Spirin V.A., Chernavin S.B., Aleksandrov V.B., Chistjakov V.V., Kulakov V.V. Opyt ustanovki dlya sushki i nagreva staleplavil'nykh kovshey [The experience of the plant for drying and heating the steel pouring ladles]. *Stal' - Steel*, 2000, no.11, pp. 50-51. (Rus.)
3. Bezcherev A.S., Gorchach N.I., Popov Ju.N., Starikovskij N.L., Berdnik V.P., Harin A.K. Razrabotka i vnedreniye futerovannoi kryshki dlya stendov dlya sushki i nagreva staleplavil'nykh kovshey i novykh rezhimov ikh termoobrabotki [Development and introduction of a lined cover for stands for drying and heating of steel pouring ladles and new modes of their heat treatment]. *Chernaia metallurgiya – Ferrous metallurgy*, 2009, no.5, pp. 62-66. (Rus.)
4. Chajkin B.S., Map'janchik G.E., Panov E.M., Shaposhnikov P.T., Vladimipov V.A., Volovik I.S., Makapevich B.A. Sovremennyye ustanovki dlya sushki i vysokotemperaturnogo nagreva kovshei [Modern installations for ladle drying and high-temperature heating]. *Elektrometallurgiya – Elec-*

- trometallurgy*, 2006, no.4, pp. 37-42. (Rus.)
5. Semahin V.V., Vjal'shina L.E. Optimizatsiya sushki i vysokotemperaturnogo nagreva futerovki kovshei [Optimization of drying and high temperature heating of ladle lining]. *Metallurg – Metallurgist*, 2004, no.6, pp. 58-59. (Rus.)
  6. Beicun S.V., Michalovsiy N.V., Murdij V.Ju. Issledovaniye na komp'yuternoy modeli dlya nagreva kovshei [Research on a computer model for heating ladles]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu. Seriya: Tehnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences.*, 2015, iss. 30, no.1, pp. 106-111. (Rus.)
  7. Volkova O., Sahebkar B., Hubalkova J., Aneziris C.G., Scheller P.R. Ladle Heating Procedure and Its Influence on the MgO-C-Oxidation. *Materials and Manufacturing Processes*, 2008, vol. 23, iss. 8, pp. 758-763.
  8. Glaser B., Gornerup M., Sichen D. Thermal Modelling of the Ladle Preheating Process. *Steel research*, 2011, no.12, pp. 1425-1434.
  9. Sushchenko A.V., Nosochenko O.V., Khaznaferov M.L., Taushan I.I., Travinchev A.I. Development and commercial introduction of a pulse regime for heating stands used to dry and heat steel-pouring ladles. *Metallurgist*, 2002, vol. 46, no.9-10, pp. 271-275.
  10. Krivandin V.A. *Metallurgicheskaya teplotekhnika* [Metallurgical heat-engineering]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 424 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛПТУ»

Статья поступила 15.08.2017

УДК 629.128:621.359.7

© Філіпчук О.М.\*

### ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОГО СОЛЕВМІСТУ ВОДОМАЗУТНИХ ЕМУЛЬСІЙ

*Представлено аналіз статистичних даних і результатів експериментальних досліджень швидкостей високотемпературної корозії сталей (ВТК) 1Х18Н10Т і сталі 20 в елементах суднових енергетичних установок при спалюванні з надлишком повітря  $\alpha = 1,5$  й  $3,0$  водомазутних емульсій (ВМЕ) з водовмістом  $W^r = 30\%$  із солевмістом у діапазоні  $16,9 \dots 490$  мг/л. На підставі побудованих номограм надається можливість вибору необхідного солевмісту ВМЕ для забезпечення допустимого рівня інтенсивності ВТК при різних температурах металу стінки поверхні нагрівання і надлишках повітря різних марок сталі.*

**Ключові слова:** високотемпературна корозія, водопровідна вода, дистиллят, мазут, водомазутна емульсія, солевміст.

**Филипчук А.Н. Определение допустимого соледержания водомазутных эмульсий.** Представлен анализ статистических данных и результатов экспериментальных исследований скоростей высокотемпературной коррозии (ВТК) сталей 1Х18Н10Т и стали 20 в элементах судовых энергетических установок при сжигании с избытком воздуха  $\alpha = 1,5$  и  $3,0$  водомазутных эмульсий (ВМЭ) с водосодержанием  $W^r = 30\%$  с соледержанием в диапазоне  $16,9 \dots 490$  мг/л. На основании построенных номограмм предоставляется возможность выбора необходимого соледержания ВМЭ для обеспечения допустимого уровня интенсивности ВТК при различных температурах металла стенки поверхности нагрева и избытках воздуха разных марок стали.

\* ст. викладач, Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Херсон, [filipschuk5@gmail.com](mailto:filipschuk5@gmail.com).