



## Исследование эксплуатационных характеристик эркерной панели дуговой сталеплавильной печи

S. N. Timoshenko /Cand. Sci. (Tech.)/

Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine

N. G. Malich /Cand. Sci. (Tech.)/

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

A. V. Velikiy

“MZ “Dniprostal” Ltd, Dnipro, Ukraine

### Investigation a possibility of increasing the performance of the EAF EBT panel

**Цель.** Исследование теплового состояния крышки эркера дуговой сталеплавильной печи (ДСП) и термических напряжений при использовании медных и стальных водоохлаждаемых элементов.

**Методика.** Математическое моделирование, численный эксперимент.

**Результаты.** Определены условия замены медных водоохлаждаемых элементов менее затратными стальными без снижения эксплуатационных характеристик с учетом температурных зависимостей допускаемых напряжений и фактора карбонатных отложений на охлаждаемой поверхности.

**Научная новизна.** Рассчитана максимальная величина плотности теплового потока к воде в эркерной панели ДСП, которая составляет около 600 кВт/м<sup>2</sup>. Установлено влияние тепловой нагрузки и теплофизических характеристик материала трубы на величину эквивалентных термических напряжений в эркерной панели с учетом существенного влияния карбонатных отложений на теплопередачу.

**Практическая значимость.** Показано, что в условиях эксплуатации эркерной панели ДСП замена медной трубы стальной возможна при уменьшении толщины стенки с 10 до 6 мм для стали 20К и до 8 мм для стали 09Г2С с коэффициентом запаса по термическим напряжениям 1,17–1,20. (Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.)

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, водоохлаждаемая эркерная панель, тепловая нагрузка, термические напряжения.

**Постановка проблемы.** Современные высокопроизводительные ДСП оборудованы эркером, который служит для донного беспшлакового выпуска стали в ковш. Сверху эркер закрывает специальная крышка, которая представляет собой теплопринимающую водоохлаждаемую панель с трубчатыми контурами охлаждения. В панели выполнены отверстия для обслуживания канала выпуска стали и для комбинированной фурмы-горелки, используемой для интенсификации процесса плавки.

Фирмы-изготовители металлургического оборудования [1–3] поставляют медные панели эркера, тогда как панели свода и стен ДСП, как правило, выполнены из котельной стали, например Р265GH, по стандарту EN (Сталь Ст20К по ДСТУ, ГОСТ). Выбор меди обусловлен ее высокой теплопроводностью, что позволяет под-

держивать минимальный перепад температуры, а следовательно, минимальные термические напряжения в стенке трубы при характерной для эркера повышенной плотности теплового потока к воде. Это является фактором эксплуатационной надежности панели.

Основным недостатком медных панелей является их высокая стоимость. Кроме того, медь подвержена окислению и характеризуется низкой механической прочностью, особенно при повышенной температуре и окисленности в рабочем пространстве ДСП.

Важной задачей является повышение эксплуатационных характеристик и минимизация расходов, связанных с изготовлением и обслуживанием эркерной панели. Одним из путей ее решения является замена медной трубы водоохлаждаемого контура на стальную трубу. Ин-

формация по данному вопросу в доступных источниках практически отсутствует.

Таким образом, актуальным является получение объективных данных о тепловом состоянии крышки эркера ДСП для расчета термических напряжений в стенке трубы, и, в конечном счете, для принятия обоснованных проектных и конструктивных решений по модернизации панели.

**Целью работы** является исследование теплового состояния и оценка термических напряжений в эркерной панели, выполненной из медной и стальной труб, в условиях эксплуатации.

**Основной материал.** В расчетной модели (рис. 1а) учитывается специфика теплообмена в вынесенной из основного рабочего пространства печи эркерной зоне. Эркерная панель под-

вержена излучению близко расположенной жидкой сталеплавильной ванны – условной излучающей поверхности. Излучение поверхности электродов на эркерную панель практически не попадает, как и излучение дуг, принимая во внимание, что последние, согласно интенсивной технологии выплавки полупродукта, в жидкий период плавки экранированы вспененным шлаком с целью повышения энергоэффективности дугового нагрева ванны.

В качестве тепловоспринимающей поверхности рассматривается цилиндрическая поверхность трубы. Величина теплового потока от ванны рассчитывалась в соответствии с методикой [4] с учетом горизонтальной и вертикальной составляющих ( $q_1, q_2$ ) (рис. 1а):

$$q_1 = \frac{2\sigma \cdot \epsilon_{np} \cdot (T_{\theta}^4 - T_{пан}^4) \cdot H^2}{\pi} \int_{-R}^R \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} \frac{1}{[(\rho-x)^2 + y^2 + H^2]^2} dy dx \quad (1)$$

$$q_2 = \frac{2\sigma \cdot \epsilon_{np} \cdot (T_{\theta}^4 - T_{пан}^4)}{\pi} \int_{-R}^R \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} \frac{H \cdot (\rho-x)}{[(\rho-x)^2 + y^2 + H^2]^2} dy dx \quad (2)$$

В выражениях (1), (2) подынтегральные функции представляют собой коэффициенты взаимной облученности; R – радиус условной излучающей поверхности ванны;  $\epsilon_{np}$  – приведенная степень черноты поверхностей теплообмена;  $T_{\theta}, T_{пан}$  – температура поверхности ванны и панели соответственно;  $\rho$  – текущая радиальная координата.

Результирующий тепловой поток на водоохлаждаемый элемент является сложной функцией взаимного излучения ванны, футеровки и пылегазовой среды в рабочем пространстве ДСП. Для стационарного теплового режима

печи можно в первом приближении считать сумму векторов (1), (2) действующим на стенку трубы тепловым потоком  $q$  (рис. 1а).

Гарнисаж на рабочей поверхности труб водоохлаждаемых панелей ДСП не является стабильным фактором [5], поэтому расчет термических напряжений проводили для наиболее жестких условий эксплуатации – без гарнисажа.

Результаты расчета плотности теплового потока, выполненного в пакете прикладных программ «Mathcad-v14», приведены на рис. 1б.

Приняты следующие значения расчетных параметров: максимальная температура реак-

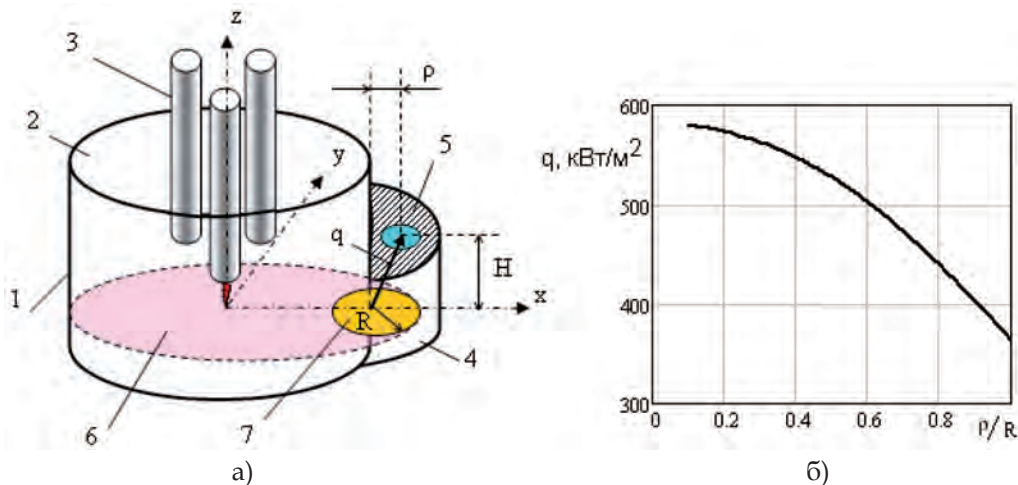


Рис. 1. Расчетная схема излучения ванны на крышку эркера (а) и зависимость плотности теплового потока  $q$  от радиальной координаты  $\rho/R$  (б)

1 – корпус ДСП» 2 – свод; 3 – электроды; 4 – эркер; 5 – эркерная панель; 6 – ванна; 7 – условная излучающая поверхность (другие обозначения – в тексте)

ционной зоны при продувке стали кислородом через эркерную фурму  $T_{\text{г}} = 2170 \text{ K}$ ;  $T_{\text{пан}} = 600 \text{ K}$ ;  $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,77$  [6];  $R = 1,45 \text{ м}$ ;  $H = 1,4 \text{ м}$  (рис. 1а).

Согласно расчетам (рис. 1б), максимальная плотность теплового потока на эркерную панель при заданных параметрах составляет около  $600 \text{ кВт/м}^2$ .

Термические напряжения в стенке трубы водоохлаждаемой панели под воздействием теплового потока определяли по методике [7]. Эквивалентные напряжения  $\sigma$  от трех составляющих: радиальной  $\sigma_r$ , кольцевой  $\sigma_y$  и осевой  $\sigma_z$  сопоставляли с допускаемыми напряжениями для материала трубы при температуре наружной поверхности стенки  $t_e = t_i + Dt$ . Температуру охлаждаемой внутренней поверхности стенки трубы принимали  $t_i = 75 \text{ }^\circ\text{C}$  как параметр, рекомендуемый практикой по условиям предотвращения образования карбонатных отложений из воды (соли жесткости). Возникающие напряжения  $\sigma$  пропорциональны перепаду температуры в стенке  $Dt$ :

$$\sigma = \sqrt{0,5 \cdot [(\sigma_r - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2]} \quad (3)$$

где  $\sigma_r = -M[\ln(k_1) / \ln(k_2) + [(k_1)^2 - 1] / [(k_2)^2 - 1]]$ ;  
 $k_1 = r_e / r$ ;  $k_2 = r_e / r_i$ ;  
 $\sigma_y = -M[\ln(k_1) - 1] / \ln(k_2) + [(k_1)^2 + 1] / [(k_2)^2 - 1]]$ ;  
 $M = E \cdot \alpha \cdot \Delta t / [2 / (1 - \nu)]$ ;  
 $\sigma_z = -M[2 / [(k_1)^2 - 1] + [2 \ln(k_2) - 1] / \ln(k_2)]$ ;  
 $q$  – расчетный тепловой поток;  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $E$  – коэффициент теплопроводности, коэффициент Пуассона и модуль нормальной упругости материала трубы;  $r$  – средний по толщине стенки радиус трубы.

$\Delta t$  вычисляется для условий стационарного режима для однослойной цилиндрической стенки:

$$\Delta t = (q / \lambda) \cdot r_e \cdot \ln(r_e / r_i) \quad (4)$$

где  $r_e$ ,  $r_i$  – наружный и внутренний радиусы трубы соответственно.

Рассмотрены исходный вариант панели: медная труба  $\text{Ø}89 \times 10 \text{ мм}$  и альтернативные варианты: труба из стали Ст20К, а также из стали 09Г2С. Механические и теплофизические характеристики, а также температурные зависимости допускаемых напряжений при температуре рабочей поверхности трубы  $t_e$  для исходного и альтернативного вариантов приняты по данным [7]. Влияние карбонатных отложений учитывали введением дополнительного теплового сопротивления в (4).

Определенный интерес представляет оценка относительной долговечности панели по методике Коффина [8], которая состоит в определении количества циклов термического нагружения до разрушения материала вследствие малоциклового усталости. Методика основана на зависимости амплитуды деформации и числа циклов  $N_p$  до появления усталостных трещин, которая для данного материала определяется его механическими характеристиками: модулем нормальной упругости  $E$ , относительным сужением при разрушении  $\psi$  и эквивалентными напряжениями  $\sigma$ .

$$N_p = [(1/16) \cdot (\ln(\frac{1}{1-\psi}))^2] / (\sigma/E)^2 \quad (5)$$

Результаты расчета термических напряжений в зависимости от плотности теплового пото-

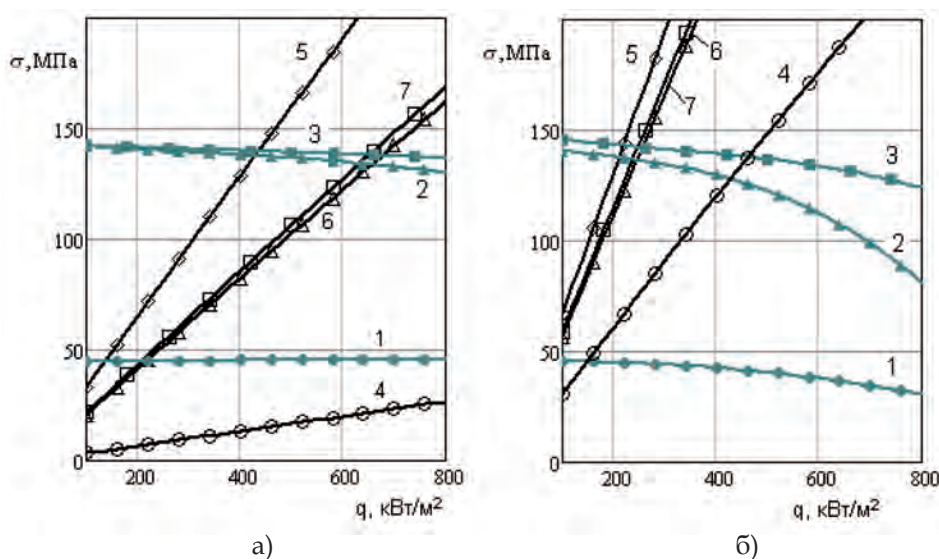


Рис. 2. Зависимость термических напряжений в панелях  $\sigma$  от плотности теплового потока  $q$  для случаев без накипи (а) и с накипью (б) на охлаждаемой поверхности  
 1, 2, 3 – допускаемые напряжения для меди, Ст20К, 09Г2С соответственно; 4, 5, 6, 7 – эквивалентные напряжения для меди (стенка 10 мм), стали Ст20К (стенка 10 и 6 мм) и стали 09Г2С (стенка 8 мм) соответственно



ка и термомеханических характеристик вариантов панели, выполненного в пакете прикладных программ «Mathcad-v14», приведены на рис. 2 и в табл. 1.

Согласно полученным данным термомеханические характеристики исходной медной панели (труба Ø89×10 мм) в условиях эксплуатации крышки эркера ДСП не вызывают сомнений. При расчетной тепловой нагрузке 600 кВт/м<sup>2</sup> эквивалентные напряжения в трубе ниже допустимых (рис. 2а).

Расчёт для панели из трубы Ст20К Ø89×10 мм, показывает, что ее характеристики не удовлетворяют условиям устойчивой эксплуатации при расчетной тепловой нагрузке: эквивалентные напряжения превышают допустимые при плотности теплового потока свыше 400–450 кВт/м<sup>2</sup>. Тем не менее, необходимого результата можно достигнуть при уменьшении толщины стенки трубы до 6 мм, при этом коэффициент запаса по термическим напряжениям составит не менее 1,20 (рис. 2а, табл. 1).

Для панели из стали 09Г2С толщина стенки трубы может быть увеличена до 8 мм при коэффициенте запаса по термическим напряжениям 1,17. Последний вариант является предпочтительным с точки зрения обеспечения механической прочности труб при динамической нагрузке, связанной с завалкой шихты в печь.

Карбонатные отложения на внутренней поверхности трубы существенно повышают тепловое сопротивление теплопередаче лучистой энергии к охлаждающей воде. При среднем коэффициенте теплопроводности карбонатных отложений 2,2 Вт/(м·К) [7] слой накипи толщиной 1–2 мм делает практически невозможной длительную эксплуатацию как стальных, так и медных эркерных панелей при расчетной плотности теплового потока из-за перегрева рабочей поверхности и резкого возрастания эквивалентных термических напряжений (рис. 2б).

По стойкости к циклическим нагрузкам и критерию малоциклового усталости медные панели существенно превосходят стальные. Вместе с тем практика эксплуатации водоохлажда-

емых элементов ДСП свидетельствует о том, что их стойкость, как правило, лимитируют другие факторы, в частности пробой паразитной электрической дуги и механические повреждения при загрузке шихты.

Температурное поле в результате передачи теплоты теплопроводностью по сечению трубы панели эркера исследовали путем численного решения плоской стационарной задачи теплопередачи в пакете прикладных программ «ELCUT 6.2». Целью была оценка возможного превышения температурой крышки эркера как рабочего места норм безопасности при замене медных труб панели стальными. Граничные условия (рис. 3) были следующие: внешняя полуповерхность трубы, направленная в рабочее пространство, воспринимает тепловой поток плотностью 600 кВт/м<sup>2</sup>; на внутренней поверхности трубы заданы коэффициент теплоотдачи конвекцией 10 кВт/(м<sup>2</sup>·К) и температура омывающей среды 300 К; на внешней полуповерхности трубы, направленной в окружающую среду заданы коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и температура 400 К. В расчетных блоках «труба» и «накипь» задан коэффициент теплопроводности 380, 45 и 2 Вт/(м·К) для меди, стали и карбонатных отложений соответственно. Геометрические и теплофизические параметры трубы приняты такие же, как в расчетах термических напряжений.

Согласно результатам расчета (рис. 3) при наличии карбонатных отложений температура внешней поверхности медной панели крышки эркера несколько выше, чем стальной. Это объясняется повышенным коэффициентом теплопроводности меди, что при затруднении теплопередачи к воде из-за высокого теплового сопротивления слоя накипи ведет к нагреву стенки трубы. Вместе с тем во всех рассмотренных вариантах панели температура крышки эркера как рабочего места соответствует эксплуатационным нормам.

**Выводы.** Показана возможность обеспечения необходимых рабочих характеристик во-

Таблица 1

Термомеханические характеристики эркерной панели ДСП

Материал эркерной панели	Толщина стенки трубы, мм	Температура наружной стенки, °С		Эквивалентные напряжения, МПа		Допускаемые напряжения, МПа	Запас прочности		Число циклов до разрушения
		Без накипи	С накипью	Без накипи	С накипью		Без накипи	С накипью	
Медь	10	90	211	19	166	45	2,43	Нет	650 тыс.
Сталь 20К	10	192	313	179	355	136	Нет	Нет	6700
	6	145	267	115	304	139	1,21	Нет	16600
Сталь 09Г2С	8	150	271	119	314	139	1,17	Нет	15300

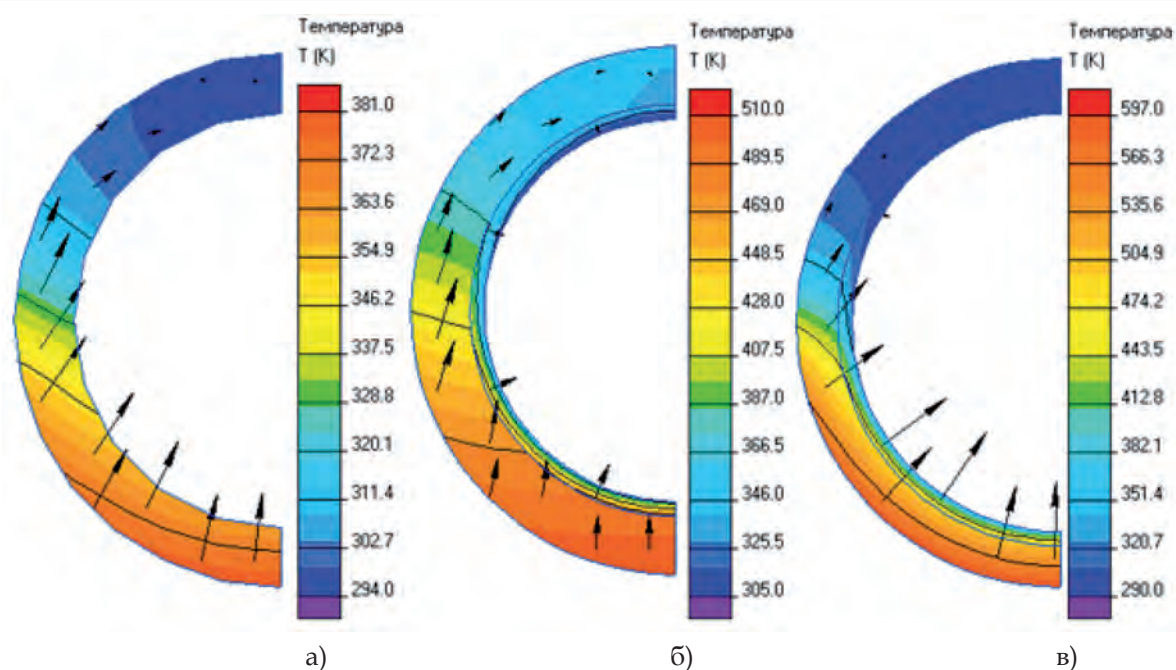


Рис. 3. Температурное поле в медной трубе  $\text{Ø}89 \times 10$  мм без накипи (а) и с накипью (б), в стальной трубе  $\text{Ø}89 \times 6$  мм с накипью (в) эркерной панели ДСП (стрелками показано направление и относительная величина теплового потока, тонкими линиями – изотермы)

доохлаждаемой панели крышки эркера ДСП при замене медной трубы с толщиной стенки 10 мм трубой из стали 20К или 09Г2С с толщиной стенки 6–8 мм при расчетной плотности теплового потока излучения  $600 \text{ кВт/м}^2$  с коэффициентом запаса термической прочности не менее 1,17–1,20. Наличие карбонатных отложений на водоохлаждаемой поверхности трубы резко снижает эксплуатационные характеристики как стальной, так и медной панели, что подчеркивает важность обеспечения водоподготовки для эксплуатации данного теплонапряженного узла. С точки зрения механических нагрузок, возникающих при загрузке шихты, предпочтительнее использовать трубу из стали 09Г2С с допустимой толщиной стенки 8 мм. Применение стальной панели крышки эркера не нарушает нормы безопасности по температуре для рабочего места обслуживающего персонала печи.

#### Библиографический список / References

1. Official site "Tekno BTM SRL", 25020 Capriano del Colle (Brescia, Italy). Available at: <http://www.teknobtm.it/> (accessed 05 March 2017).
2. Official site "ERDE Makina Imalat A.c." (Gebze, Turkey). Available at: <http://www.erdemakina.com.tr/> (accessed 05 March 2017).
3. Official site "PMP Industries S.p.A." 33030 Coseano (Udine, Italy). Available at: <http://www.pmp-industries.com/> (accessed 05 March 2017).
4. Тимошенко С. Н. Инженерная методика расчета водоохлаждаемых панелей электросталеплавильных агрегатов / С. Н. Тимошенко,

П. И. Тищенко, М. В. Колесников, З. Г. Зуйкова // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: зб. наук. праць. Вип. 7. НметАУ, Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2015. – С. 125–134.

Timoshenko S. N., Tishchenko P. I., Kolesnikov M. V., Zuykova Z. G. (2015). *Inzhenernaya metodika rascheta vodoohlazhdayemykh paneley elektrostaleplavil'nykh agregatov* [Engineering calculation method of water-cooled panels EAF units]. Dnipro, Nova Ideologija. Vol. 7, pp. 125–134 (in Russian).

5. Kruger K. Schlackenabackungen und thermische Verluste eines Drehstrofens / K. Kruger, A. Ehrbar, K. Timm // Stahl und Eisen. – 1998. – № 9 (118). – P. 63–67.

Kruger K., Ehrbar A., Timm K. (1998). *Schlackenabackungen und thermische Verluste eines Drehstrofens*. Stahl und Eisen. No. 9 (118), pp. 63–67.

6. Toulouevski Yu. N. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection / Yu. N. Toulouevski, I. Y. Zinurov. – Berlin: Springer-Verlag, 2010. – 258 p.

Toulouevski Yu. N., Zinurov I. Y. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. Berlin, Springer-Verlag, 2010, 258 p.

7. Хисматулин Е. Р. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник / Е. Р. Хисматулин, Е. М. Королев, В. И. Лившиц и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.

Hismatulin E. R., Korolev Ye. M., Livshits V. I. (1990). *Sosudy i truboprovody vysokogo davleniya*

[Vessels and high pressure pipelines]. Moscow, Mashinostrojenie, 384 p.

8. Coffin L. F. A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metals / L. F. Coffin // Trans. ASME. – 1954. – Vol. 76. – P. 931–950.

Coffin L. F. (1954). A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metals. Trans. ASME. Vol. 76, pp. 931-950.

**Purpose.** Investigation of the thermal state of the eccentric bottom tapping (EBT) lid of the electric arc furnace (EAF) and thermal stress using copper and steel water-cooled elements.

**Methodology.** Mathematical modeling, numerical simulation.

**Findings.** The conditions for replacing copper water-cooled element with less expensive steel one are determined without reducing the performance characteristics, taking into account the temperature dependences of the permissible stress and the carbonate depositions factor on the cooled surface.

**Originality.** The maximum value of the density of heat flux to water in the EBT panel is determined, which constitutes about 600 kW/m<sup>2</sup>. The influence of thermal load and thermo-physical characteristics of the pipe material on the value of equivalent thermal stress is established, taking into account the significant influence of carbonate depositions on the heat transfer.

**Practical value.** It is shown that in the operation conditions of EBT panel, the replacement of a copper pipe with steel one is possible with a reduction in the wall thickness from 10 to 6 mm for steel 20K and up to 8 mm for steel 09Г2С (Russian grades) with a thermal stress margin of 1.17–1.20.

**Key words:** electric arc furnace, water-cooled EBT panel, thermal load, thermal stress.

Рекомендована к публикации  
д. т. н. М. В. Губинским

Поступила 17.03.2017



УДК 33.013.6

Ю. М. Магера  
Н. Ю. Павлюк /к. т. н./

Наука

ПАТ «КИЇВЕНЕРГО», м. Київ, Україна  
Інститут технічної теплофізики національної  
академії наук України, м. Київ, Україна  
e-mail: nonna.ipe@gmail.com

## Створення методики експериментального визначення теплоти згоряння твердих побутових відходів

Y. M. Magera  
N. Y. Pavlyuk /Cand. Sci. (Tech.)/

PJSC “Kyivenergo”, Kyiv, Ukraine  
Institute of engineering thermophysics of Ukraine  
national academy of sciences, Kyiv, Ukraine  
e-mail: nonna.ipe@gmail.com

## Creation of method for experimental determining of msw heating value

**Мета.** Створення методики для експериментального визначення теплоти згоряння твердих побутових відходів.

**Методика.** Сутність створеної методики полягає в спаленні наважки в лабораторному котлі-утилізаторі та визначенні теплоти, що відповідає згорянню 1 кг ТПВ, в результаті розрахункової обробки показань вимірювальних приладів.

**Результат.** Отримані за допомогою створеної методики для наважки з відомим морфологічним складом значення теплоти згоряння добре кореспондують з прогностичними значеннями.

**Наукова новизна.** Теплота згоряння за допомогою створеної методики може бути визначена для довільної наважки шляхом її прямого спалювання, в той час як існуючі методики базуються на визначенні вмісту основних компонентів ТПВ і подальшому розрахунку теплоти згоряння ТПВ.

**Практична значущість.** На основі розробки на підприємствах, що спалюють ТПВ, можуть бути створені власні лабораторні установки для визначення теплоти згоряння ТПВ. (Іл. 1. Табл. 2. Бібліогр.: 5 назв.)

**Ключові слова:** тверді побутові відходи, теплота згоряння, модельна наважка, котел-утилізатор, прогнозне значення.