

УДК 44.31.03:53.07.00:45.43.00

**ВЛИЯНИЕ ЗАДЫМЛЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ И ВЫСОТЫ ШЛАКА
НА ТЕПЛООБМЕН В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ.
ЧАСТЬ II. ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ШЛАКА НА ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ
НА СТЕНЫ И РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ***А.Н. Макаров**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2021

Аннотация. Исследовалось влияние высоты слоя шлака на тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен дуговых сталеплавильных печей. Установлено, что потоки теплового излучения дуг на водоохлаждаемые панели стен максимальны при незаглубленных дугах и лучепрозрачной атмосфере печи. С увеличением высоты слоя шлака и поглощательной способности пылегазовой атмосферы печи тепловые нагрузки от дуг на водоохлаждаемые панели стен уменьшаются и достигают минимума при полностью погруженных в шлак дугах и максимальном коэффициенте поглощения пылегазовой атмосферы печи.

Ключевые слова: электросталь, электрическая дуга, теплообмен, тепловое излучение, печь.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-4-80-88**ВВЕДЕНИЕ**

Электрические дуги являются основными источниками тепловой энергии в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), на их долю приходится 55–65 % тепловой энергии, поступающей в современную ДСП [1–13]. Для снижения потребления электрической и тепловой энергии необходимо организовать режим работы дуг ДСП таким образом, чтобы тепловой поток излучения дуг максимально попадал на металлошихту и ванну металла и минимально на футерованные откосы, водоохлаждаемые панели стен и свода. Согласно многолетним экспериментальным исследованиям научно-исследовательских коллективов [1–7], тепловой поток дуг в ДСП на 92–96 % состоит из потока теплового излучения; на потоки теплопроводности, конвекции приходится 4–8 % мощности [3–5].

В XX веке отсутствовали данные аналитического исследования распределения тепловых потоков излучения дуг по поверхности стен, свода, ванны металла. В конце XX века автором статьи была разработана пионерская теория теплообмена в ДСП [1], которая позволяет рассчитать тепловые потоки излучения дуг на поверхности стен, свода, ванны металла. Воспользуемся методикой расчета теплообмена, подробно изложенной в работах [1, 2], для анализа влияния высоты слоя шлака на тепловые нагрузки от дуг на водоохлаждаемые панели стен и на удельный расход электроэнергии в ДСП.

СХЕМА ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТОКА ТЕПЛОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДУГ НА СТЕНЫ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Схема для расчета потоков тепловых излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен представлена на рис. 1, где использованы следующие обозначения:

l_d – длина дуги;

$l_{отк}$ – длина открытой части дуги;

α, β, r – углы и расстояние, определяемые из построений в программах AutoCAD и Excel. Плотность потока теплового излучения дуги, падающего на расчетную площадку на стенах ДСП, определяли по выражению [1]

$$q = \frac{\alpha_{ст} P_d \cos \alpha \cos \beta l_{отк}}{\pi^2 r^2 l_0} \cdot e^{-kr},$$

где $\alpha_{ст}$ – доля мощности, выделяющейся в столбе дуги; P_d – мощность дуги; k – коэффициент поглощения газовой среды ДСП, $k = 0-0,7$.

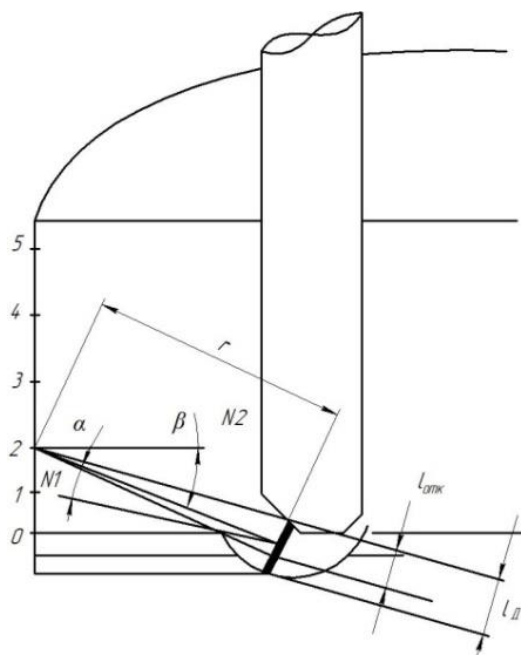


Рис. 1. Схема для расчета потоков тепловых излучений дуг на стены:
1–5 – номера расчетных площадок на стене ДСП

Значительные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен вызывают повреждения панелей, вытекание воды из поврежденных панелей на ванну металла, что является аварийной ситуацией. Необходимо выполнить расчеты тепловых потоков дуг на водоохлаждаемые панели стен в высокомошных ДСП-100 вместимостью 100 тонн, мощностью 90 МВА. Следует выяснить, какова максимальная величина тепловых потоков излучения дуг на водоохлаждаемые панели стен, как влияет поглощательная способность пылегазовой среды на величину тепловых потоков излучения дуг на стены. Необходимо также выяснить, каково влияние высоты слоя шлака на тепловые потоки излучения дуг на водоохлаждаемые панели стен. Параметры каждой из трех дуг ДСП-100: $P_d = 18$ МВт, $l_d = 300$ мм, $\alpha_{изл} = 0,92$. Коэффициент поглощения для лучепрозрачной атмосферы печи $k = 0$; для запыленной атмосферы $k = 0,7$.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ ШЛАКА НА ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ НА СТЕНЫ И КПД ДУГ

Для увеличения высоты слоя шлака до 250–350 мм необходимо интенсифицировать работу инжектора угольного порошка, при этом из печи удаляется максимальный объем пылегазовой смеси (рис. 2).

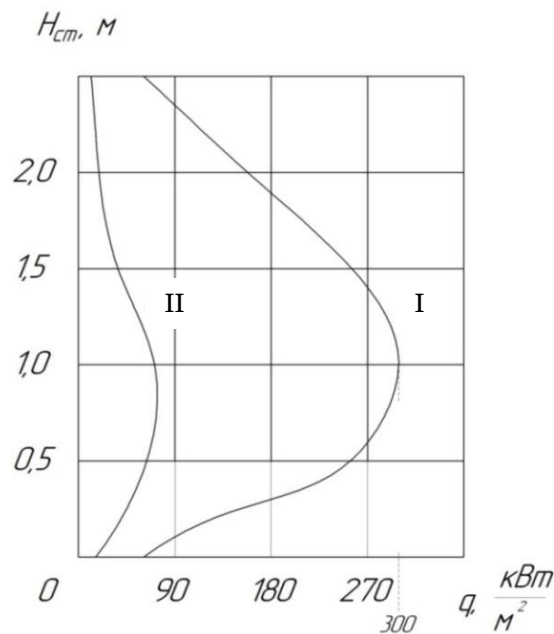


Рис. 2. Система удаления газов из ДСП

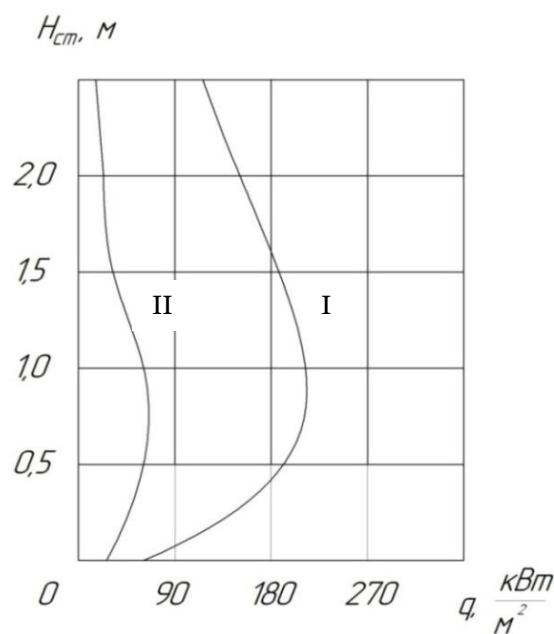
Выполнили расчет потоков тепловых излучений дуг на стены ДСП-100 при заглублении дуг в ванну металла и шлак на 300 мм. Длина дуг составляет 300 мм, следовательно, они полностью погружены в ванну металла и шлак. Результаты расчета приведены на рис. 3.

При полностью погруженных в шлак дугах максимальные потоки теплового излучения дуг на участки стен, расположенные напротив дуг, составляют 300 кВт/м^2 в лучепрозрачной среде и 230 кВт/м^2 в поглощающей среде, что в 2–1,6 раза меньше по сравнению с работой печи с открытыми дугами при их заглублении в ванну металла на 70 мм. Тепловые потери с охлаждающей водой пропорциональны тепловым потокам излучения дуг, падающим на водоохлаждающие панели. Следовательно, при уменьшении тепловых потоков излучения дуг на стены в 2–1,6 раза на аналогичную величину уменьшаются тепловые потери с охлаждающей водой и на столько же увеличиваются полезные потоки теплового излучения дуг на ванну металла и шлак, повышается КПД дуг, уменьшается удельное потребление печью электроэнергии. Результаты расчета КПД дуг печи ДСП-100 показывают [14–16], что при заглублении дуг в ванну металла и шлак с 70 до 300 мм КПД дуг возрастает с 0,46 до 0,74, т.е. в 1,61 раза. Известно, что КПД дуги – это отношение полезной мощности дуги, излучаемой столбом дуги на ванну металла и шлак, к мощности дуг. Известно, что чем больше высота не заглубленной в ванну металла и шлак столба дуги, тем меньше ее КПД [14–16]. Наименьший КПД дуг имеют плазменно-

дуговые печи, у которых столб дуги полностью открыт и излучает до 80 % мощности в свободное пространство, а около 20 % – на ванну металла (рис. 4). КПД дуг плазменно-дуговых печей составляет 20–25 % [1].



а



б

Рис. 3. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг высотой 300 мм по высоте стен печи ДСП-100 при высоте заглибления дуг 300 мм в прозрачной атмосфере

печи (I), в поглощающей атмосфере печи (II) по участкам стен, расположенным напротив дуги (а) и между дугами (б)

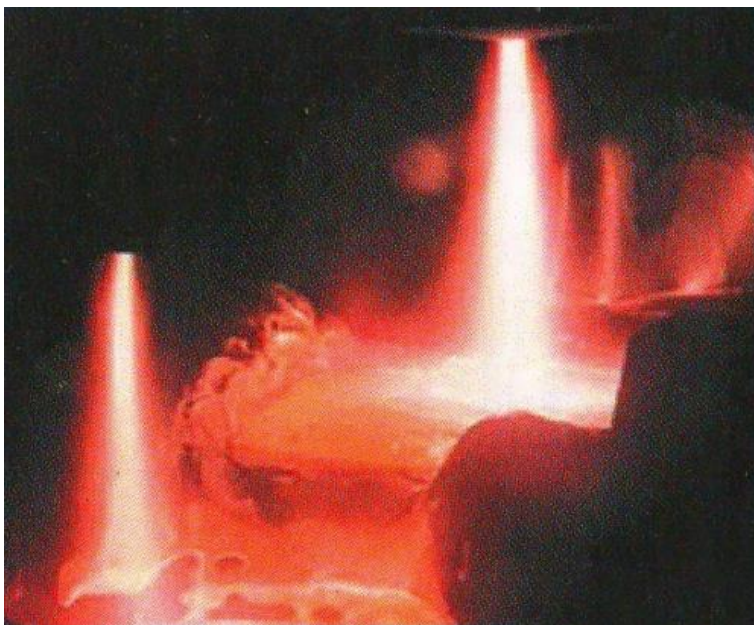


Рис. 4. Столб дуги в плазменно-дуговой печи

Результаты расчета плотностей потоков тепловых излучений дуг на стены ДСП-100 подтверждены практикой эксплуатации ДСП. С увеличением высоты слоя шлака с 238 до 325 мм в печи ДСП-120 улучшилось экранирование тепловых излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен и свода, увеличились потоки теплового излучения дуг на ванну металла, шлак, повысился КПД дуг, на 22 % снизился удельный расход электроэнергии [17]. Аналогичные данные о возрастании усвоения тепла дуг ванной металла в 1,5–1,8 раза при повышении высоты слоя шлака до полного заглубления дуг в шлак приведены в источниках [18, 19]. Таким образом, расчетные и экспериментальные данные [17–19] находятся в полном соответствии друг другу: при увеличении высоты слоя шлака на действующих печах уменьшились потоки теплового излучения дуг на стены, увеличились потоки теплового излучения дуг на ванну металла и шлак, повысились теплоусвоение ванны и КПД дуг, снизился удельный расход электроэнергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из выполненного анализа энергобалансов плавки стали в ДСП следует, что в процессе продувки ванны кислородом и работы инжектора угольного порошка для вспенивания шлака пылегазовая атмосфера печи характеризуется максимальным коэффициентом поглощения. При этом тепловое излучение дуг в свободное пространство печи поглощается пылегазовой атмосферой печи. При максимальном коэффициенте поглощения пылегазовая атмосфера экранирует водоохлаждаемые панели стен и свода от теплового излучения дуг, при этом тепловые потери с отходящими газами максимальны, а с охлаждающей водой – минимальны.

В отсутствие продувки ванны кислородом и при неработающем инжекторе угольного порошка атмосфера печи лучепрозрачна, тепловое излучение дуг бес-

препятственно проходит через свободное пространство печи и падает на водоохлаждаемые панели стен и свода. При лучепрозрачной атмосфере печи тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен достигают максимальных значений в 600 кВт/м^2 и выше. Период работы с лучепрозрачной атмосферой является наиболее опасным, наиболее теплонапряженным для панелей стен и свода печи. При лучепрозрачной атмосфере печи тепловые потери с охлаждающей водой максимальны, с отходящими газами – минимальны.

Тепловые потоки, падающие на водоохлаждаемые панели стен, максимальны в лучепрозрачной среде и при незначительном заглублении дуг в шлаки достигают значений 600 кВт/м^2 и выше. При незначительной высоте слоя шлака КПД дуг мал и составляет 0,46, усвоение тепла дуг ванной незначительно, расход электроэнергии увеличен. При увеличении высоты слоя шлака КПД дуг и теплоусвоение ванны возрастают. При полном погружении в шлак КПД дуг достигает значения 0,74–0,78, теплоусвоение ванны максимально, удельный расход электроэнергии уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань. 2014. 384 с.
2. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ. 2021. 324 с.
3. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия. 1981. 344 с.
4. Окорочков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия. 1971. 347 с.
5. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия. 1985. 280 с.
6. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг, горящих в парах металлов // *Электromеталлургия*. 2009. № 11. С. 19–24.
7. Макаров А.Н., Кузнецов А.В., Рыбакова В.В., Галичева М.К. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубление в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах // *Промышленная энергетика*. 2014. № 10. С. 10–15.
8. Makarov A.N. Change in arc efficiency during melting in steel-melting arc furnaces // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. № 3-4, pp. 298–302.
9. Makarov A.N. Effect of the architecture on energy efficiency of electric arc furnaces of conventional and Consteel designs // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. № 9-10, pp. 882–891.
10. Нефедов А.В., Нефедова Е.В. Импортзамещающая технология выгрузки пыли из бункеров электросталеплавильного цеха ОАО «Уральская сталь» // *Сталь*. 2015. № 12. С. 74–76.
11. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система / Л.М. Симонян, А.А. Хилько, А.А. Лысенко [и др.] // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. № 11. С. 68–75.
12. Водоохлаждаемые узлы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / М.Г. Кузьмин, В.С. Чередниченко, Р.А. Бикеев [и др.] // *Электromеталлургия*. 2014. 7. С. 8–16.
13. Сосонкин О.М., Кудрин В.А. Этапы проведения работ и результаты освоения плавки стали в ДСП с водоохлаждаемым сводом и стенами // *Электromеталлургия*. 2008. № 11. С. 14–19.

14. Makarov A.N. Calculation and analysis of energy parameters of meltings in EAFS of conventional and Consteel design // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. № 9-10, pp. 974–978.
15. Makarov A.N. Calculation and analysis of the relationship between the efficiency and position of electric arcs and power consumption in electric arc furnaces (EAF) of smaller and larger capacity. Part I. Calculation and analysis of the relationship between arc efficiency and power consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. № 3-4, pp. 341–349.
16. Makarov A.N. Calculation and analysis of the relationship between the efficiency and position of electric arcs and power consumption in electric arc furnaces (EAF) of smaller and larger capacity. Part II. Calculation and analysis of the relationship between position of arcs, walls and power consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. № 5-6, pp. 441–450.
17. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали в дуговой печи / М.С. Кузнецов, Е.В. Якушев, С.А. Кулагин [и др.] // *Электротехнология*. 2010. № 2. С. 2–6.
18. Сязанов А.В., Меркер Э.Э., Кочетов А.И. Взаимосвязь шлакового режима с параметрами плавки окатышей в дуговой печи // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. № 5. С. 66–67.
19. Меркер Э.Э., Харламов Д.А. Энергосбережение при электроплавке стали в дуговых печах. Старый Оскол: ТНТ. 2019. 308 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Влияние задымленности атмосферы и высоты шлака на теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Часть II. Влияние высоты шлака на тепловые нагрузки на стены и расход электроэнергии // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 4 (12). С. 80–88.

INFLUENCE OF ATMOSPHERIC SMOKE AND SLAG HEIGHT ON HEAT EXCHANGE IN ARC STEEL MELTING FURNACES. PART II. INFLUENCE OF SLAG HEIGHT ON WALL THERMAL LOADS AND ELECTRICITY CONSUMPTION

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The influence of the height of the slag layer on the thermal loads on the water-cooled panels of the walls of arc steel-making furnaces was investigated. The fluxes of thermal radiation from arcs to water-cooled wall panels are maximum when the arcs are not buried and

the atmosphere of the furnace is transparent. With an increase in the height of the slag layer and the absorption capacity of the furnace dust and gas atmosphere, the thermal loads from the arcs on the water-cooled wall panels decrease and reach a minimum when the arcs are completely immersed in the slag and the maximum absorption coefficient of the furnace dust and gas atmosphere.

Keywords: electric steel, electric arc, heat exchange, heat radiation, furnace.

REFERENCES

1. Makarov A.N. *Teploobmen v elektrodugovyh i fakel'nyh metallurgicheskikh pechah i energeticheskikh ustanovkakh* [Heat transfer in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants]. St. Petersburg: Lan. 2014. 384 p.
2. Dorofeev G.A., Zinyagin G.A., Makarov A.N. *Proizvodstvo stali na osnove zheleza pryamogo vosstanovleniya* [Production of steel based on direct reduced iron]. Stary Oskol: TNT. 2021. 324 p.
3. Nikolsky L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. *Teplovaya rabota dugovyh staleplavil'nyh pechej* [Thermal work of arc steel-making furnaces]. Moscow: Metallurgy. 1981. 344 p.
4. Okorokov N.V. *Dugovye staleplavil'nye pechi* [Electric arc furnaces]. Moscow: Metallurgy. 1971. 347 p.
5. Egorov A.V. *Elektroplavil'nye pechi chernoj metallurgii* [Electric melting furnaces for ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgy. 1985. 280 p.
6. Makarov A.N., Sokolov A.Yu. Electrical, geometric, thermal parameters of arcs burning in metal vapors. *Electrometallurgy*. 2009. No. 11, pp. 19–24. (In Russian).
7. Makarov A.N., Kuznetsov A.V., Rybakova V.V., Galicheva M.K. On the influence of the shape of the electrode and the parameters of the arc on its deepening into the metal bath in arc steel-making furnaces. *Promyshlennaya energetika*. 2014. No. 10, pp. 10–15. (In Russian).
8. Makarov A.N. Change in arc efficiency during melting in steel-melting arc furnaces. *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. No. 3-4, pp. 298–302. (In Russian).
9. Makarov A.N. Effect of the architecture on energy efficiency of electric arc furnaces of conventional and Consteel designs. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. No. 9-10, pp. 882–891. (In Russian).
10. Nefedov A.V., Nefedova E.V. Import-substituting technology for unloading dust from bunkers of the electric steel-making shop of OJSC Ural Steel. *Steel*. 2015. No. 12, pp. 74–76. (In Russian).
11. Electric steel-smelting dust as a dispersed system / L.M. Simonyan, A.A. Khilko, A.A. Lysenko [et al.]. *Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*. 2010. No. 11, pp. 68–75. (In Russian).
12. Water-cooled units of heavy-duty arc steel-making furnaces / M.G. Kuzmin, V.S. Cherednichenko, R.A. Bikeev [et al.]. *Electrometallurgy*. 2014. No. 7, pp. 8–16. (In Russian).
13. Sosonkin O.M., Kudrin V.A. Stages of work and the results of mastering steel melting in a chipboard with a water-cooled roof and walls. *Elektrometallurgiya*. 2008. No. 11, pp. 14–19. (In Russian).
14. Makarov A.N. Calculation and analysis of energy parameters of meltings in EAFS of conventional and Consteel design. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. No. 9-10, pp. 974–978. (In Russian).

15. Makarov A.N. Calculation and analysis of the relationship between the efficiency and position of electric arcs and power consumption in electric arc furnaces (EAF) of smaller and larger capacity. Part I. Calculation and analysis of the relationship between arc efficiency and power consumption. *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 3-4, pp. 341–349. (In Russian).
16. Makarov A.N. Calculation and analysis of the relationship between the efficiency and position of electric arcs and power consumption in electric arc furnaces (EAF) of smaller and larger capacity. Part II. Calculation and analysis of the relationship between position of arcs, walls and power consumption. *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 5-6, pp. 441–450. (In Russian).
17. Influence of metal charge mass and slag thickness on steel smelting technology in arc furnace / M.S. Kuznetsov, E.V. Yakushev, S.A. Kulagin [et al]. *Electrometallurgy*. 2010. No. 2, pp. 2–6. (In Russian).
18. Syazanov A.V., Merker E.E., Kochetov A.I. The relationship of the slag mode with the parameters of the melting of pellets in the arc furnace. *Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*. 2019. No. 5, pp. 66–67. (In Russian).
19. Merker E.E., Kharlamov D.A. Energosberezhenie pri elektroplavke stali v dugovyh pechah [Energy saving in electric steel melting in arc furnaces]. Stary Oskol: TNT. 2019. 308 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: *tgtu_kafedra_ese@mail.ru*

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Influence of atmospheric smoke and slag height on heat exchange in arc steel melting furnaces. Part II. Influence of slag height on wall thermal loads and electricity consumption // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 4 (12), pp. 80–88.