

ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТИ, РАССТОЯНИЯ ОТ ДУГ ДО СТЕН НА КПД ДУГ И РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

А.Н. Макаров

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2020

Аннотация. Исследовано влияние расстояния от дуги до стен во всем номенклатурном ряде дуговых сталеплавильных печей (емкостью от 0,5 до 120 тонн) на КПД дуг и удельный расход электроэнергии в печах. В малотоннажных дуговых сталеплавильных печах дуги близко расположены к стенам, КПД дуг мал и составляет 30...35 %, а удельный расход электроэнергии на расплавление – 650 кВт·ч/т. В большегрузных дуговых сталеплавильных печах дуги расположены от стен далеко, КПД дуг составляет 46...49 % при отсутствии слоя шлака, а удельный расход электроэнергии на расплавление – 375...385 кВт·ч/т.

Ключевые слова: электрическая дуга, сталь, печь, теплообмен, энергосбережение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-72-81

ВВЕДЕНИЕ

В [1] изложены результаты расчета и анализа теплообмена в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) малой и большой емкости, однако отсутствует объяснение значительно большего удельного расхода электроэнергии в ДСП малой емкости по сравнению с ДСП большой емкости. Необходимо исследовать влияние расстояния от дуг до стен во всем номенклатурном ряде дуговых сталеплавильных печей от 0,5 до 120 тонн на КПД дуг и удельный расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах, а также установить пропорциональную взаимосвязь между КПД дуг и удельным потреблением электроэнергии печами.

ТЕПЛООБМЕН И КПД ДУГ В ДСП

Электрические дуги являются основными источниками тепловой энергии в дуговых сталеплавильных печах, на их долю приходится 55...65 % тепловой энергии, поступающей в современную высокомогущную ДСП [1]. От газокислородных горелок, экзотермических реакций окисления железа и других элементов шихты кислородом, реакций окисления кокса и электродов в ДСП поступает 35...45 % энергии [1, 2]. Вся электрическая энергия в дугах ДСП преобразуется в тепловую энергию, тепловой поток. По результатам многочисленных экспериментальных исследований тепловой поток дуг на 90...96 % формируется тепловым излучением [3–11, 13–16]. На долю теплопроводности, конвекции приходится 4...10 % мощности дуг. В дугах, горящих в вакууме, на теплопроводность приходится 91 %, на тепловое излучение 9 % [12].

Мощность, выделяющаяся в дуге P_D , распределяется следующим образом: большая часть мощности выделяется в столбе дуги $P_{ст}$, часть мощности выделяется в анодно-катодных пятнах $P_{ак}$, высота которых составляет несколько микрон, часть мощности забирают конвекцией омывающие дугу печные газы P_k :

$$P_D = P_{ак} + P_k + P_{ст}. \quad (1)$$

На основании результатов исследований В. Пашкис, Н.В. Окоров [7], А.В. Егоров [8], Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Н.Л. Кузнецов [6], А.Н.Макаров [10] принимают, что в дугах высокомогущных большегрузных дуговых сталеплавильных печей в столбе дуги выделяются 90 % мощности дуги в виде потока теплового излучения. На долю анодно-катодных пятен и омывающих дугу газов приходится 10 % мощности дуги:

$$P_D = P_{ак} + P_k + P_{ст} = 0,1P_D + 0,9P_D. \quad (2)$$

Отношение полезной мощности дуги $P_{пол}$, идущей на нагрев, расплавление металла и шлака, к мощности дуги P_D характеризует коэффициент полезного использования тепла дуги или коэффициент полезного действия дуги:

$$\eta_D = \frac{P_{пол}}{P_D}. \quad (3)$$

Так как опорное анодно-катодное пятно дуги на ванне теплопроводностью передает всю выделяющуюся в нем мощность металлу, опорное пятно на графитовом электроде, интенсивно излучающее на ванну металла, и газ, омывающий дугу, передают не менее 80 % выделяющейся в них мощности ванне металла, то выражение для расчета КПД дуги большегрузных ДСП имеет вид [1]

$$\eta_D = \frac{P_{пол}}{P_D} = \frac{(0,8 \cdot 0,1)P_D + 0,9P_D\varphi_{ДМ}}{P_D} = 0,08 + 0,9\varphi_{ДМ}, \quad (4)$$

где $\varphi_{ДМ}$ – средний угловой коэффициент излучения столба дуги на металл, показывающий долю мощности, излучаемую столбом дуги на ванну металла и металлошихту.

В формуле (4), по которой определяли КПД дуг большегрузных 100-тонных ДСП в конце 1990-х – начале 2000-х гг., доля мощности, выделяющейся в столбе дуги, принята равной 0,9, в анодно-катодных областях – 0,1. В 2000-е гг. мощность электропечных трансформаторов, питающих 100-тонные ДСП, увеличили, с этого времени начали использовать при плавлении металла длинные дуги. При использовании длинных дуг доля мощности, выделяющейся в столбе дуги, увеличилась, следовательно, необходима корректировка выражения (4) для расчета КПД дуг. В печах вместимостью 3...50 тонн доля мощности дуги, выделяющейся в столбе дуги, несколько меньше 90 %, следовательно, выражение (4) для них должно быть скорректировано.

ИССЛЕДОВАНИЕ КПД ДУГ ДСП

Долю мощности, выделяющейся в столбе дуги, определяли по выражению

$$\frac{P_{ст}}{P_D} = \frac{I_D U_{ст}}{I_D U_D} = \frac{U_{ст}}{U_D}, \quad (5)$$

где I_D , $U_{ст}$ – соответственно ток дуги и напряжение на столбе дуги.

Долю мощности, выделяющуюся в анодно-катодных пятнах, определяли по выражению

$$\frac{P_{ак}}{P_D} = \frac{I_D U_{ак}}{I_D U_D} = \frac{U_{ак}}{U_D}, \quad (6)$$

где $U_{ак}$ – анодно-катодное падение напряжения, $U_{ак} = 20$ В [1].

Результаты расчета распределения мощности дуги в столбе и анодно-катодных областях для окончания периода расплавления шихты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Распределение падения напряжения в столбе
и анодно-катодных областях дуги ДСП
всего номенклатурного ряда вместимостей

ДСП \ Параметр	ДСП-0,5	ДСП-3	ДСП-6	ДСП-25	ДСП-50	ДСП-100 короткие дуги	ДСП-100 длинные дуги	ДСП-120
U_D , В	111	128	140	163	185	200	280	320
$U_{ст}$, В	91	108	120	143	165	180	260	300
$U_{ак}/U_D$	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,07	0,06
$U_{ст}/U_D$	0,82	0,84	0,88	0,88	0,89	0,90	0,93	0,94

Из результатов расчета и анализа расчетных данных табл. 1 следует, что доля мощности, выделяющейся в столбе дуги, изменяется от 0,82 в ДСП-0,5 до 0,94 в ДСП-120.

Доля мощности, выделяющаяся в анодно-катодных пятнах дуги, изменяется от 0,18 в ДСП-0,5 до 0,06 в ДСП-120.

С учетом вышеизложенного аналитическое выражение (4) для расчета КПД дуг ДСП всего номенклатурного ряда вместимости печей принимает вид

$$\eta_D = \frac{P_{\text{пол}}}{P_D} = \frac{0,8 \left(\frac{P_{\text{пол}}}{P_D} \right) P_D + \left(\frac{U_{\text{ст}}}{U_D} \right) P_D \varphi_D}{P_D} = 0,8 \left(\frac{U_{\text{ак}}}{U_D} \right) + \left(\frac{U_{\text{ст}}}{U_D} \right) \varphi_{\text{ДМ}}. \quad (7)$$

Исследовали влияние конструкции печей, в частности влияние диаметра расплава и электродов и расстояния от дуг до стен печей на КПД дуг всего номенклатурного ряда вместимостей от 0,5 до 120 тонн (рис. 1). На рис. 1 построена часть рабочего пространства ДСП, стена, ванна металла, электроды, электрические дуги. Футеровка пода, откосов, водоохлаждаемые панели стен не показаны. На рис. 1 совмещены ДСП-0,5...ДСП-120. Расположение электродов, дуг и стен печей в масштабе повторяет их расположение в печах ДСП-0,5...ДСП-120. Технические данные ДСП приведены в табл. 2. На рис. 1 приведен пример нахождения дуги печи ДСП-100 под толстым слоем шлака.

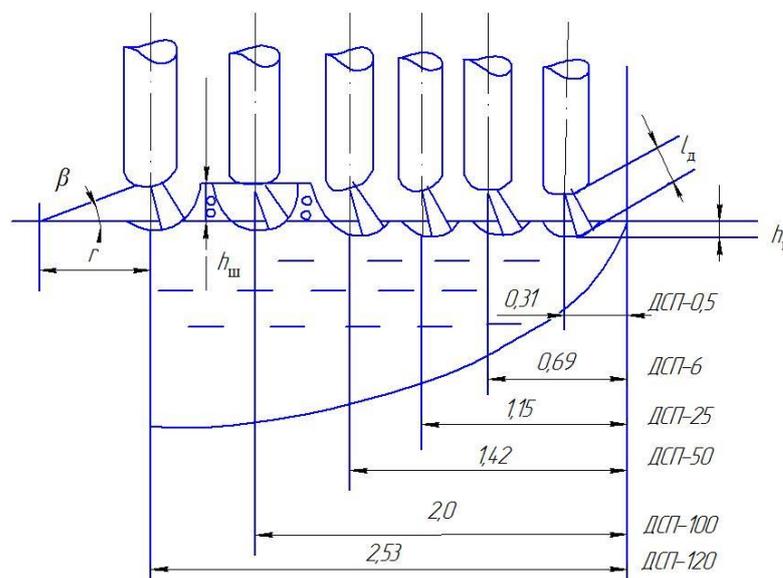


Рис. 1. Расположение дуг в печах малой и большой вместимости ДСП-0,5...ДСП-120 и расстояние от дуг до стен

Таблица 2

Технические данные дуговых сталеплавильных печей

Параметр Печь	G, т	S, МВА	D _в , м	d _р , м	r _{ст} , м	G _э , кВт·ч/т	U _{2л} , В	I _д , кА
ДСП-0,5	0,5	0,63	1,1	0,48	0,31	650	98...216	1,7
ДСП-1,5	1,5	1,25	1,5	0,52	0,49	540	103...225	3,2
ДСП-3	3	2,5	1,8	0,7	0,55	520	140...245	5
ДСП-6	6	5,0	2,27	0,9	0,69	475	130...291	9

Окончание табл. 2

Параметр Печь	G, т	S, МВА	D _в , м	d _р , м	r _{ст} , м	G _э , кВт·ч/т	U _{2л} , В	I _д , кА
------------------	------	--------	--------------------	--------------------	---------------------	--------------------------	---------------------	---------------------

ДСП-12	12	9,0	2,7	1,0	0,85	450	115...318	17
ДСП-25	25	15,0	3,54	1,25	1,15	440	130...390	23
ДСП-50	50	40,0	4,56	1,6	1,48	420	133...417	50
ДСП-100	100	80	5,4	1,4	2,0	385	300...829	80
ДСП-120	120	100	6,8	1,75	2,53	375	600...1 100	75

Примечание. G – вместимость, т; S – мощность трансформатора, МВА; D_b – диаметр ванны на уровне откосов, м; d_p – диаметр распада электродов, м; $r_{ст}$ – расстояние от стен до дуг, м; G_s – удельный расход электроэнергии на расплавление, кВт·ч/т; $U_{2л}$ – вторичное линейное напряжение электропечного трансформатора, В; I_d – ток дуги, кА.

Для того чтобы исключить влияние высоты слоя шлака на КПД дуг и выявить влияние конструктивных особенностей печей, расстояния от дуг до стен на КПД дуг, расчет КПД дуг осуществляли для окончания периода расплавления при отсутствии во всех печах слоя шлака $h_{ш}$ на ванне металла. Длину дуги определяли по выражению [1]

$$l_d = \frac{U_d - U_{ак}}{grad U_{ст}}, \quad (8)$$

где $grad U_{ст} = 0,8$ В/мм – градиент напряжения в столбе дуги.

Высота заглубления дуги h_3 при отсутствии шлака равна высоте заглубления дуги в металл h_m :

$$h_3 = h_m, h_3 = k_3 I_d, \quad (9)$$

где k_3 – коэффициент заглубления дуги в ванну металла, определяется по графикам [1], $k_3 = 0,8$ мм/кА для токов до 10 кА, $k_3 = 1,25...1,40$ для токов 60...80 кА соответственно.

Расчет КПД дуг ДСП-0,5, ДСП-100, ДСП-120 осуществляли по выражению (7). Для расчетов использовали данные табл. 1 и 2. Средний угловой коэффициент излучения дуги на ванну металла определяли по методике, изложенной в [10], в соответствии с которой поверхность ванны металла разбивается на несколько сотен расчетных площадок одинаковой площади F_k (в данном случае расчета на 216 площадок (рис. 2)), на каждую из которых по формулам, изложенным в [10], определяется доля излучения столба дуги с учетом его заглубления в ванну металла, т.е. определяется локальный угловой коэффициент излучения столба дуги на расчетную площадку. Для расчета локальных и среднего углового коэффициента излучения дуги на ванну металла использовали пакет программ Microsoft, Excel, MathCad, Visual Fortran 6.0.

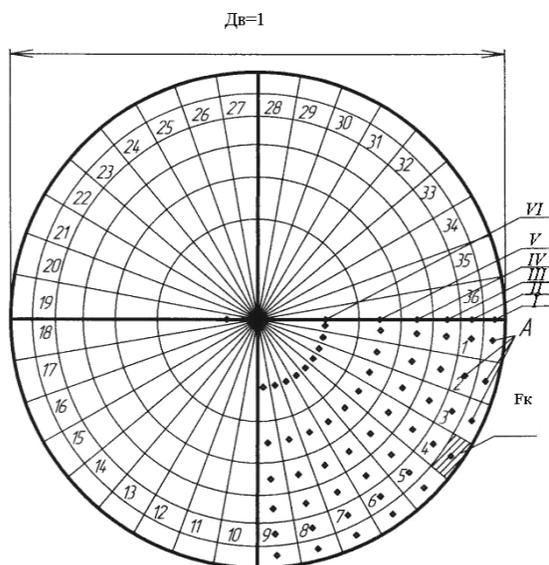


Рис. 2. Разбиение ванны металла на 216 элементарных расчетных площадок F_k

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КПД ДУГ В ДСП

На рис. 3 представлены результаты расчета средних угловых коэффициентов излучения дуги на ванну металла $\varphi_{\text{дм}}$, средних угловых коэффициентов излучения дуги на стены и свод печи $\varphi_{\text{дс}}$, КПД дуг $\eta_{\text{д}}$. Как видно из рис. 3, чем ближе дуги расположены к стенам ДСП, тем меньше средний угловой коэффициент излучения дуги на ванну металла и КПД дуги и тем больше средний угловой коэффициент излучения дуги на стены и свод печи и удельный расход электроэнергии на расплавление.

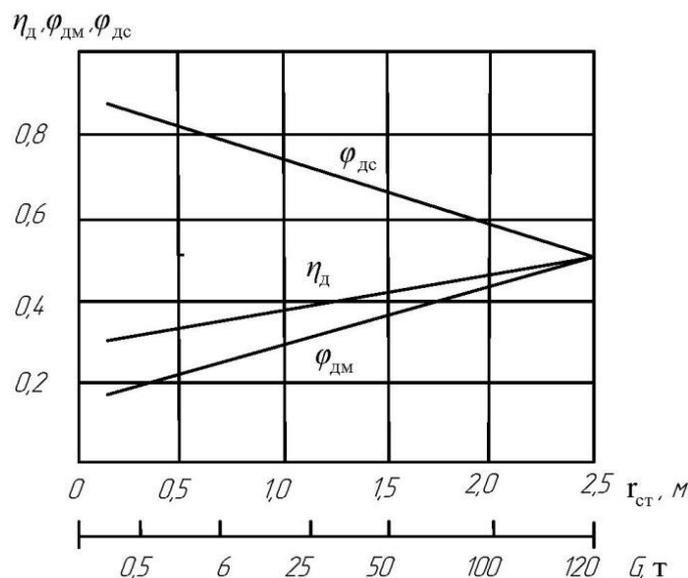


Рис. 3. Зависимость КПД дуг, средних угловых коэффициентов излучения столба дуг на ванну металла, стены и свод от расстояния от дуг до стен и емкости печей

В ДСП-0,5 дуги очень близко расположены к стенам: $r_{\text{ст}} = 0,31$ м, поэтому доля теплового излучения дуги на стены и свод велика и составляет $\varphi_{\text{дс}} = 0,82$, доля полезного теплового излучения дуги на ванну металла мала: $\varphi_{\text{дм}} = 0,18$, поэтому КПД дуг ДСП-0,5 очень низок: $\eta_{\text{д}} = 0,31$, а удельный расход электроэнергии высок и составляет $G_3 = 650$ кВт·ч/т на расплавление шихты. В печи ДСП-6 расстояние от дуги до стен $r_{\text{ст}} = 0,69$ м больше, чем в печи ДСП-0,5, соответственно, меньше доля теплового излучения дуги на стены и свод: $\varphi_{\text{дс}} = 0,75$, больше на ванну металла: $\varphi_{\text{дм}} = 0,25$ и больше КПД дуги: $\eta_{\text{д}} = 0,35$, меньше удельный расход электроэнергии на расплавление: $G_3 = 475$ кВт·ч/т по сравнению с печью ДСП-0,5.

В ДСП-100, ДСП-120, диаметр ванны которых 5,4 и 6,8 м соответственно, соотношение $d_p/d_b = 0,26$, что соответствует рекомендуемому, дуги приближены к центру ванны и удалены от стен на расстояние 2,0 и 2,53 м соответственно, что сказалось на повышении КПД дуг до 0,46 и 0,49 соответственно и снижении удельного расхода электроэнергии на расплавление до 385 и 375 кВт·ч/т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными аналитическими исследованиями КПД дуг установлено следующее. В печах малой емкости диаметр кожуха, ванны металла мал, дуги близко расположены к стенам и доля теплового излучения дуг на стены и свод в 4 раза больше доли теплового излучения дуг на ванну металла. У печей малой емкости КПД дуг мал, а удельный расход электроэнергии велик. В печах большой вместимости диаметр кожуха и ванны металла 5...7 м, дуги удалены от стен, доля теплового излучения дуг на ванну металла, КПД дуг возрастают по сравнению с печами малой емкости, а удельный расход электроэнергии снижается. Результаты расчета КПД дуг подтверждает практика эксплуатации ДСП.

Удельный расход электроэнергии на расплавление составляет в печах малой емкости 650...700 кВт·ч/т, в печах большой емкости 375...385 кВт·ч/т.

Таким образом, теоретические исследования, результаты расчета угловых коэффициентов теплового излучения дуг на ванну, стены, свод, КПД дуг и практика эксплуатации ДСП находятся в гармоничном соответствии друг другу, результаты расчета подтверждены практикой эксплуатации печей: чем больше КПД дуг в ДСП, полученный расчетным путем, тем меньше удельный расход электроэнергии на расплавление шихты, полученный в результате практики эксплуатации печей. Так как практика является критерием истинности теоретических разработок, то в данном случае практика эксплуатации печей подтверждает правильность методики и выполненных расчетов средних угловых коэффициентов излучения дуг на ванну металла, стены, свод, КПД дуг дуговых сталеплавильных печей всего номенклатурного ряда вместимости от 0,5 до 120 тонн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makarov A.N. Calculation and analysis the relationship between the efficiency and position of electrical arcs furnace (EAF) of smaller and harger capacity. Part I. Calculation and analysis of the relationship between arc efficiency and power consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. № 3-4, pp. 341–349. DOI: 10.1007/s11015-019-00829-4.
2. Makarov A.N. Calculation and analysis the relationship between the efficiency and position of electrical arcs furnace (EAF) of smaller and harger 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. DOI: 10.1007/s11015-019-00844-5.
3. Макаров А.Н. Влияние конструктивного исполнения на энергоэффективность дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 9. С. 30–36.
4. Макаров А.Н. Расчет и анализ энергетических параметров плавки в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 10. С. 13–15.
5. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе / Евстратов В.Г. [и др.] // *Электрометаллургия*. 2012. № 8. С. 2–6.
6. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
7. Окорочков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
8. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
9. Сойфер В.М. Выплавка стали в кислых электропечах. М.: Машиностроение, 2009. 480 с.
10. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
11. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг горящих в парах металлов // *Электрометаллургия*. 2009. № 11. С. 19–24.
12. Волохонский Л.А. Вакуумные дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
13. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
14. Тиходеев Г.М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги. М.: АН СССР, 1961. 236 с.
15. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубливание в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах / Макаров А.Н. [и др.] // *Промышленная энергетика*. 2014. № 1. С. 10–95.
16. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали в дуговой печи / Кузнецов М.С. [и др.] // *Электрометаллургия*. 2010. № 2. С. 2–6.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – д-р техн. 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 емкости, расстояния от дуг до стен на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 72–81.

INFLUENCE OF CAPACITANCE, DISTANCE FROM ARCS TO WALLS ON THE EFFICIENCY OF ARCS AND ELECTRICITY CONSUMPTION IN EAF

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The influence of the distance from the arc to the walls in the entire nomenclature row of arc steelmaking furnaces with a capacity of 0.5 to 120 tons on the efficiency of the arcs and the specific consumption of electricity in the furnaces was investigated. In low-tonnage EAF, the arcs are close to the walls and the efficiency of the arcs is small and amounts to 30...35 %, and the specific electric power consumption for melting is 650 kWh/t. In heavy-duty EAF, the arcs are located far from the walls, the arc efficiency is 46...49 % in the absence of a slag layer, and the specific electric power consumption for melting is 375...385 kWh/t.

Keywords: electric arc, steel, furnace, heat exchange, energy saving.

REFERENCES

1. Makarov A.N. Calculation and analysis the relationship between the efficiency and position of electrical arcs furnace (EAF) of smaller and harger capacity. Part I. Calculation and analysis of the relationship between arc efficiency and power consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. № 3-4, pp. 341–349. DOI: 10.1007/s11015-019-00829-4.
2. Makarov A.N. Calculation and analysis the relationship between the efficiency and position of electrical arcs furnace (EAF) of smaller and harger 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. DOI: 10.1007/s11015-019-00844-5.
3. Makarov A.N. Influence of design on energy efficiency of EAF of conventional design and Consteel. *Metallurg*. 2018. № 9, pp. 30–36.
4. Makarov A.N. Calculation and analysis of energy parameters of smelting in EAF of conventional design and Consteel. *Metallurg*. 2018. № 10, pp. 13–15.
5. Evstratov V.G., Kiselev A.D., Zinurov I.Yu. [et al.]. Features of thermal operation of the an electric furnace EAF-120 Consteel at the Ashinsky Metallurgical Plant. *Electrometallurgy*. 2012. № 8, pp. 2–6.
6. Nikolsky L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. Thermal work of EAF. M.: Metallurgy, 1981. 344 p.
7. Okorokov N.V. EAF. M.: Metallurgy, 1971. 347 p.
8. Egorov A.V. Electrosmelting furnaces of ferrous metallurgy. M.: Metallurgy, 1985. 280 p.

9. Soifer V.M. Smelting steel in acidic electric furnaces. M.: Mechanical engineering, 2009. 480 p.
10. Makarov A.N. Heat exchange in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants. St. Petersburg: Lan, 2014. 384 p.
11. Makarov A.N., Sokolov A.Yu. Electrical, geometric, thermal parameters of arcs burning in metal vapors. *Electrometallurgy*. 2009. № 11, pp. 19–24.
12. Volokhonsky L.A. Vacuum arc furnaces. M.: Energoatomizdat, 1985. 232 p.
13. Leskov G.I. Electric welding arc. M.: Mechanical Engineering, 1970. 335 p.
14. Tikhodeev G.M. Energy properties of electric welding arc. M.: USSR Academy of Sciences, 1961. 236 p.
15. Makarov A.N., Kuznetsov A.V., Rybakova V.V. [at al.]. On influence of electrode shape and arc parameters on its deepening into metal bath in EAF. *Industrial energy*. 2014. № 1, pp. 10–95.
16. Kuznetsov M.S., Yakushev E.V., Kulagin S.A. [at al.]. Influence of metal charge weight and slag thickness on steel smelting technology in arc furnace. *Electrometallurgy*. 2010. № 2, pp. 2–6.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the 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 capacitance, distance from arcs to walls on the efficiency of arcs and electricity consumption in electric arc furnace // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 72–81.