

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 44.31.03:53.07.00:45.43.00

**РАСЧЕТ ПОТОКОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ
ПО ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ И СТЕН
ВЫСОКОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ.
ЧАСТЬ II. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ
ПО ПОВЕРХНОСТИ СТЕН***А.Н. Макаров**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2024

Аннотация. В статье рассчитано распределение тепловых потоков излучения коротких дуг по ванне металла. Указано, что при работе на коротких дугах тепловое излучение дуг не достигает откосов и расплавление шихты на них осуществляется путем теплопроводности и конвекции из шаровых сегментов под дугами в ванне; с ростом заглубления дуг в шлак тепловые потоки излучения дуг на стены снижаются в 3–4 раза. Отмечено, что расчетные и экспериментальные данные по тепловым потокам излучения дуг на водоохлаждаемые панели стен совпадают.

Ключевые слова: сталь, печь, электрическая дуга, ванна металла, теплообмен, тепловое излучение, теплопроводность, конвекция.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-43-51**ВВЕДЕНИЕ**

Тепло, поступающее при излучении от электрических дуг на поверхность шарового сегмента [1–4], нагревает ее и от поверхности передается соседним слоям металла и шлака за счет теплопроводности и конвекции, интенсифицируемой электродинамическим выдуванием дуг от осей к периферии электродов. При электродинамическом перемещении дуг от осей к периферии электродов дуги выбрасывают далеко от осей электродов из шаровых сегментов жидкий металл и шлак [1–6], поступающие в сегмент под действием архимедовой гидростатической подъемной силы, создавая таким образом их мощный конвективный теплообмен. При полном погружении дуг в шлак его количество, участвующее в конвективном теплообмене, увеличивается, конвективный тепловой поток на ванну металла и шлак возрастает, КПД дуг достигает максимального значения 78–80 % [7, 8]. Коэффициент полезного действия дуг – это отношение их полезной мощности, идущей на расплавление шихты, нагрев жидкого металла и шлака, к мощности дуг. Методика и результаты расчета КПД дуг подробно изложены в источниках [9, 10]. Необходимо рассчитать результаты распределения плотностей потоков тепловых излучений коротких дуг по ванне и исследовать взаимосвязь длины дуг, высоты слоя шлака, КПД дуг и удельного расхода электроэнергии в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ КОРОТКИХ ДУГ НА ВАННУ МЕТАЛЛА

По методике, изложенной в работе [10], рассчитали плотности потоков тепловых излучений коротких дуг, падающих на поверхность ванны печи ДСП-100. В расчетах принимали длину дуг 256 мм, высоту слоя шлака – 143 и 256 мм. Остальные параметры дуг и печи ДСП-100 приведены в источнике [7]. Результаты расчета распределения плотностей потоков тепловых излучений коротких дуг длиной 256 мм по диаметру ванны даны на рис. 1, где графики 1 и 2 характеризуют распределение плотностей потоков при высоте заглибления дуг 143 мм в прозрачной 1 и поглощающей 2 атмосфере печи. Графики 3 и 4 характеризуют распределение плотностей потоков при высоте заглибления дуг 256 мм в прозрачной 3 и поглощающей 4 атмосфере печи.

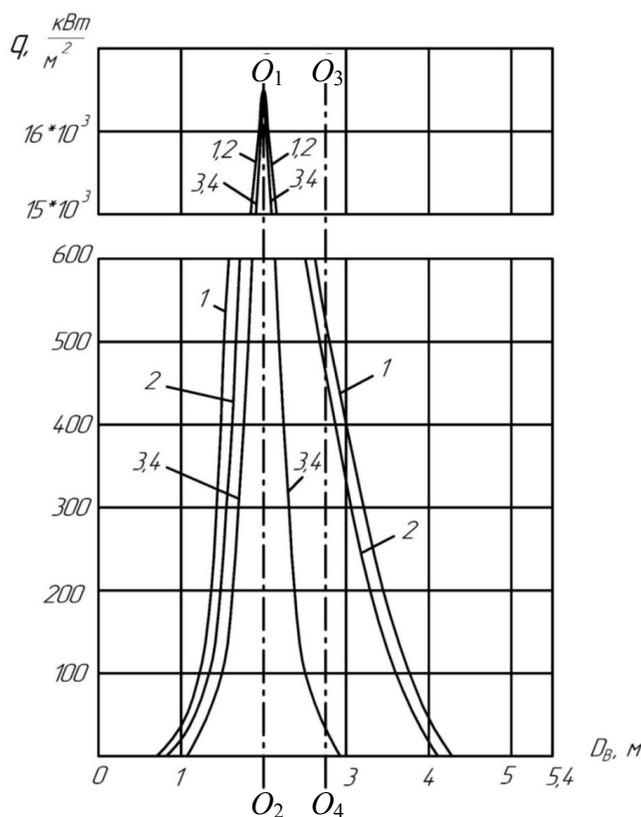


Рис. 1. Распределение плотностей потоков тепловых излучений коротких дуг по диаметру ванны: $\ell_D = 256$ мм при $h_3 = 143$ мм в прозрачной (1), поглощающей (2) атмосфере печи; при $h_3 = 256$ мм в прозрачной (3) и поглощающей (4) атмосфере печи (графики 3, 4 совпали); O_1O_2 – ось электрода; O_3O_4 – ось ванны

Как видно из рис. 1, при работе на коротких дугах их тепловое излучение практически не достигает откосов, поэтому расплавление шихты на последних осуществляется за счет теплопроводности от поверхности ванны, теплопроводности и конвекции из шаровых сегментов, образуемых электромагнитным давлением дуг в ванне металла и шлаке, а также за счет тепла факелов газокислородных горелок, рафинировочных кислородных горелок, инжекторов углеродосодержащего порошка, устанавливаемых в стенах по периферии ванны.

При высоте заглибления дуг в металл и шлак, составляющей 143 мм, тепловые потоки излучения дуг в поглощающей среде на участки ванны напротив дуг составляют следующие значения: на расстоянии 1 м от стены – 12 кВт/м²; 1,66 м от стены – 295 кВт/м²; 2 м от стены (под дугой) – 16,56 МВт/м². Тепловые потоки на участки ванны между дугами составляют значения: на расстоянии 1 м от стены – 0 кВт/м²; 1,66 м от стены – 20 кВт/м²; 2 м от стены – 225 кВт/м². Тепловые потоки, падающие на участки ванны, расположенные напротив дуг, превосходят тепловые потоки, падающие на участки ванны, расположенные между дугами, в следующее количество раз: на расстоянии 1 м от стен – в 12 раз; 1,66 м от стен – в 15 раз; 2 м от стен – в 74 раза. Таким образом, при работе высокоомощных дуговых сталеплавильных печей как на длинных ($\ell_d = 425$ мм), так и на коротких ($\ell_d = 256$ мм) дугах сохраняется значительная неравномерность распределения плотностей потоков тепловых излучений по ванне: тепловые потоки на участки ванны, расположенные напротив дуг, в 6–74 раза превосходят тепловые потоки на участки ванны, расположенные между дугами. Такое распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по ванне приводит к ускоренному расплавлению шихты на откосах напротив дуг и замедленному расплавлению шихты на откосах между дугами. Для выравнивания тепловых потоков и скорости расплавления шихты на периферии ванны устанавливают газокислородные горелки в водоохлаждаемых панелях стен (как правило, между дугами).

График 1 (см. рис. 1) повторяет график 2, однако значение плотностей потоков в лучепрозрачной среде превосходит значение плотностей потоков на те же расчетные площадки в поглощающей среде на 20–60 %. На рис. 1 (графики 3, 4) приведены результаты расчетов распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны при их полном погружении в шлак ($h_3 = 256$ мм). Во время погружения дуги практически не излучают на поверхность ванны, но при этом излучают тепло на поверхность шаровых сегментов в ванне металла и шлаке. Тепло из шаровых сегментов ванне металла и шлаку передается за счет теплопроводности и интенсивного конвективного теплообмена. На дуги действуют аксиальные и радиальные электромагнитные силы. Аксиальные силы вызывают электромагнитное давление дуг на ванну металла и шлак, создавая в них заглибления в виде шаровых сегментов, а радиальные вызывают горизонтальные перемещения электрических дуг от оси электродов к поверхности ванны. В процессе перемещения дуги захватывают жидкий металл и шлак из шаровых сегментов и выбрасывают их далеко на поверхность шлака. Под действием архимедовой гидростатической подъемной силы новые слои жидкого металла и шлака поступают в шаровой сегмент, и процесс электромагнитного выбрасывания, перемешивания металла, шлака повторяется, конвективный теплообмен металла, шлака интенсифицируется, КПД дуг возрастает.

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛИННЫХ ДУГ ПО ПОВЕРХНОСТИ СТЕН

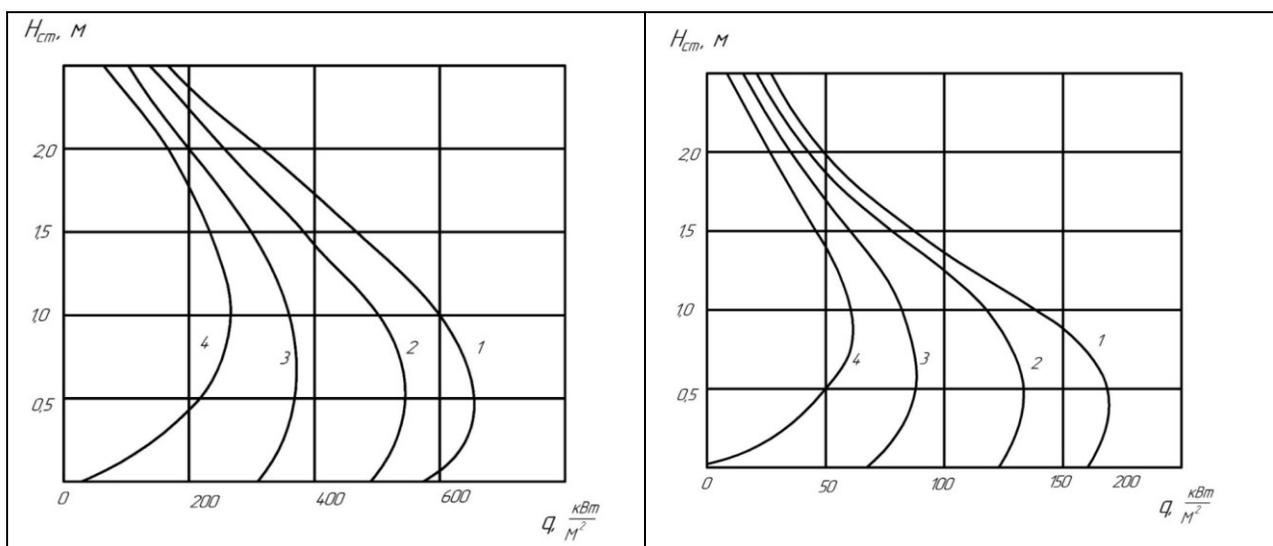
Для анализа взаимосвязи теплообмена, высоты слоя шлака, длины и КПД дуг, а также удельного расхода электроэнергии рассчитали распределение потоков тепловых излучений дуг длиной 425 мм по высоте стен при различном заглиблении. Результаты экспериментальных исследований тепловых нагрузок на своды печей ДСП-100 приведены в работе [1]. В источнике [7] указаны результаты исследования влияния высоты слоя шлака на КПД дуг, а также его влияния на распределение плотностей потоков тепловых

$$q = \frac{\varphi_{ДФ} P_{Д}}{F e^{kr}} = \frac{\alpha_{ст} P_{Д} \cos \alpha \cos \beta l_{отк}}{\pi^2 r^2 l_{д}} \cdot e^{-kr},$$

где $\varphi_{ДФ}$ – локальный угловой коэффициент излучения электрической дуги на расчетную площадку, имеющую площадь F , $\varphi_{ДФ}$ определяется по таблицам [5]; $\alpha_{ст} = 0,92$ [10]; $P_{Д}$ – мощность дуги, $P_{Д} = 18$ МВт; k – коэффициент поглощения пылегазовой атмосферы печи, $k = 0,7$ [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ ПО ПОВЕРХНОСТИ СТЕН

Результаты расчета распределения плотностей потоков тепловых излучений от трех дуг по высоте стен печи ДСП-100 на участках, расположенных напротив дуг, представлены на рис. 3 для прозрачной (рис. 3а) и поглощающей (рис. 3б) атмосферы печи. На графиках показано распределение по высоте стен плотностей потоков тепловых излучений дуг длиной 425 мм, заглубленных в жидкий металл и шлак на высоту 70, 160, 300 и 425 мм. Как видно из рис. 3а, с ростом заглубления дуг в шлак максимальные потоки теплового излучения дуг на участки стен, расположенные на высоте 0,5 м, уменьшаются с 650 кВт/м² при $h_3 = 70$ мм до 262 кВт/м² при $h_3 = 425$ мм в лучепрозрачной среде и с 165 кВт/м² при $h_3 = 70$ мм до 63 кВт/м² при $h_3 = 425$ мм в поглощающей среде, т.е. в 2,5–2,6 раза.



а

б

Рис. 3. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по высоте стен печи на участках стен, расположенных напротив дуг: $l_{Д} = 425$ мм при $h_3 = 70$ мм (1); $h_3 = 160$ мм (2); $h_3 = 300$ мм (3); $h_3 = 425$ мм (4); а – прозрачная атмосфера печи; б – поглощающая

Чем выше расположены расчетные площадки на поверхности стен, тем меньше плотность потоков тепловых излучений дуг на площадки. Плотность тепловых потоков

излучений дуг при их незначительном заглублении, составляющем 70 мм (см. рис. 3а, кривая 1), на высоте 0,5 м равна 650 кВт/м^2 , а на высоте 2,5 м (под сводом) – 175 кВт/м^2 , т.е. в 3,7 раза меньше. Такая большая разница плотностей тепловых потоков излучений дуг в нижней и верхней частях стен объясняется тем, что, например, расстояние r от дуг, расположенных напротив стен, возрастает для площадок на высотах 0,5 и 2,5 м с 1,9 до 2,8 м соответственно, т.е. в 1,5 раза, а плотность потоков тепловых излучений дуг, рассчитанная по вышеуказанной формуле, уменьшается пропорционально квадрату расстояния r , т.е. в 2,25 раза. Кроме того, для расчетной площадки 5 увеличиваются углы α и β , а косинусы углов уменьшаются в 1,45 раза, что приводит к суммарному снижению плотностей потоков тепловых излучений от трех дуг на стены на высоте 2,5 м в 3,7 раза по сравнению с тепловыми потоками на высоте 0,5 м.

При заглублении дуг длиной 425 мм в ванну и шлак максимальная плотность потоков их тепловых излучений на высоте 0,5 м снижается с 650 кВт/м^2 при $h_3 = 70 \text{ мм}$ до следующих значений: 545 кВт/м^2 при $h_3 = 160 \text{ мм}$; 370 кВт/м^2 при $h_3 = 300 \text{ мм}$; 208 кВт/м^2 при $h_3 = 425 \text{ мм}$ (см. рис. 3а). На высоте стен 2,5 м плотность потоков тепловых излучений дуг снижается со 175 кВт/м^2 при $h_3 = 70 \text{ мм}$ до следующих значений: 153 кВт/м^2 при $h_3 = 160 \text{ мм}$; 98 кВт/м^2 при $h_3 = 300 \text{ мм}$; 56 кВт/м^2 при $h_3 = 425 \text{ мм}$. Таким образом, при полном заглублении дуг в ванну и шлак плотность потоков их тепловых излучений снижается приблизительно в 3 раза по всей высоте стен по сравнению с незначительным заглублением дуг или отсутствием их заглубления.

Прозрачная атмосфера с коэффициентом поглощения, близким к нулю, и вышеперечисленные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен могут существовать в печи ДСП-100 кратковременно при отключенных инжекторах для вдувания углеродосодержащего порошка и при отсутствии продувки ванны металла кислородом. Подавляющую часть времени после расплавления основной массы шихты в печи работают инжектор для вспенивания шлака, рафинировочные кислородные горелки для продувки ванны металла кислородом, а также поддерживается лучепоглощающая атмосфера. В поглощающей атмосфере максимальные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен составляют следующие значения (см. рис. 3б) на высоте 0,5 м: 165 кВт/м^2 при $h_3 = 70 \text{ мм}$; 137 кВт/м^2 при $h_3 = 160 \text{ мм}$; 86 кВт/м^2 при $h_3 = 300 \text{ мм}$; 51 кВт/м^2 при $h_3 = 425 \text{ мм}$.

Тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели в поглощающей атмосфере печи (см. рис. 3б) снижаются по высоте стен и составляют следующие значения на высоте 2,5 м: 25 кВт/м^2 при $h_3 = 70 \text{ мм}$; 17 кВт/м^2 при $h_3 = 160 \text{ мм}$; 11 кВт/м^2 при $h_3 = 300 \text{ мм}$; 6 кВт/м^2 при $h_3 = 425 \text{ мм}$. Из сравнения графиков 1–4 на рис. 3а и 3б следует, что максимальные тепловые нагрузки, находящиеся на высоте стен 0,5 м, снижаются в поглощающей атмосфере печи в 4–4,3 раза по сравнению с прозрачной атмосферой. Аналогичные данные получены при экспериментальном исследовании тепловых нагрузок на водоохлаждаемые свод и стены [11–16] дуговой сталеплавильной печи ДСП-100. В случае лучепрозрачной среды тепловые нагрузки на свод ДСП-100 составляют $350\text{--}534 \text{ кВт/м}^2$, при максимальной запыленности тепловые потоки снижаются в 4–4,5 раза до $80\text{--}115 \text{ кВт/м}^2$ [14]. Таким образом, расчетные и экспериментальные данные по изменению в 4–4,5 раза тепловых нагрузок на водоохлаждаемые панели стен и свода при переходе от лучепрозрачной к запыленной атмосфере печи совпадают [1]. Плотности потоков тепловых излучений расположены на своде довольно неравномерно: увеличиваются со $100\text{--}180 \text{ кВт/м}^2$ на периферии (у стен) до $400\text{--}550 \text{ кВт/м}^2$ у электродных отверстий в лучепрозрачной среде и

с 25–45 кВт/м² на периферии до 100–140 кВт/м² у электродных отверстий в поглощающей среде вследствие значительного теплового излучения трех электродов на свод печи [14].

При полном погружении в шлак дуги, а именно в расчетную точку 0, на поверхности стен практически не излучают [10]. Результаты выполненных расчетов, а также расчетов статьи [11] подтверждают, что с ростом заглубления дуг в шлак происходит перераспределение теплового излучения дуг с поверхностей стен, свода на поверхности ванны и шарового сегмента, образуемого в ванне электродинамическими силами дуг [11]. При полном погружении дуг в шлак их тепловое излучение на стены и свод невелико, не превышает 20 % суммарного теплового излучения дуг, большая часть его попадает на поверхности шаровых сегментов, увеличивая КПД дуг до 80 % [10]. Тепловые потоки излучения дуг, падающие на поверхности шаровых сегментов в жидком металле и шлаке, преобразуются в шаровых сегментах в потоки конвективные и теплопроводности. Из шаровых сегментов в ванну металла и шлак тепло передается за счет интенсивной конвекции и теплопроводности соседним слоям жидкого металла и шлака, в том числе слоям, расположенным на откосах печи. Под действием электродинамических сил дуг жидкий металл и шлак перемещаются из шаровых сегментов, выбрасываются из сегментов далеко, иногда до откосов стен напротив дуг. Под действием архимедовой гидростатической подъемной силы новые слои жидкого металла и шлака занимают место в шаровых сегментах, и процесс их перемещения, перемешивания дугами повторяется. Под действием электродинамической и гидростатической подъемной сил процесс конвективного теплообмена в ванне интенсифицируется, что приводит к ускорению расплавления шихты на откосах и выравниванию температуры металла по объему ванны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При работе высокоомощной дуговой сталеплавильной печи ДСП-100 на коротких дугах длиной 250 мм имеется значительная неравномерность распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по ванне: тепловые потоки на участке ванны, расположенные напротив дуг, в 6–74 раза превышают тепловые потоки на участки ванны, расположенные между дугами. Такое распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по ванне ускоряет расплавление шихты на откосах напротив дуг и замедляет расплавление шихты, находящейся на откосах между дугами.

На основе выполненных расчетов распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности стен печи ДСП-100 установлено следующее. С ростом заглубления дуг длиной 425 мм плотность их максимальных тепловых потоков на стенах в лучепрозрачной атмосфере уменьшается с 650 кВт/м² (при незначительном заглублении дуг) до 262 кВт/м² (при полном заглублении в шлак). В поглощающей атмосфере печи [17–19] плотности тепловых потоков дуг на стенах снижаются со 165 кВт/м² (при незначительном заглублении дуг) до 63 кВт/м² (при полностью заглубленных в шлак дугах). Максимальные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен от незаглубленных дуг изменяются от 650 кВт/м² в лучепрозрачной атмосфере до 165 кВт/м² в лучепоглощающей атмосфере, т.е. в 4 раза. Расчетные и экспериментальные данные по плотностям тепловых потоков излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен печи ДСП-100 совпадают. Максимальные тепловые нагрузки от излучений незаглубленных дуг на водоохлаждаемые панели в лучепрозрачной атмосфере могут стать причиной термических

повреждений панелей, поэтому работа на таких дугах в лучепрозрачной атмосфере печи не только энергозатратна, но и ведет к сокращению срока службы панелей [16, 17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
2. Огороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
3. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
4. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг, горящих в парах металлов // *Электрометаллургия*. 2009. № 11. С. 19–24.
5. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
6. Макаров А.Н., Кузнецов А.В., Рыбакова В.В., Галичева М.К. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубливание в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах // *Промышленная энергетика*. 2014. № 10. С. 10–15.
7. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 325 с.
8. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Ашпин Н.А. Прямое получение стали из рудного сырья. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 428 с.
9. Макаров А.Н. Изменение КПД дуг в процессе плавки в дуговых сталеплавильных печах // *Металлург*. 2017. № 4. С. 55–58.
10. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.
11. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Расчет потоков теплового излучения дуг на ванну и теплообмен в ванне металла // *Металлург*. 2022. № 7. С. 28–34.
12. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах. Часть II. Распределение потоков теплового излучения дуг по ванне и стенам // *Металлург*. 2022. № 9. С. 50–54.
13. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах. Часть III. Взаимосвязь теплообмена, высоты слоя шлака, КПД дуг и удельного расхода электроэнергии // *Металлург*. 2022. № 11. С. 41–46.
14. Сосонкин О.М., Кудрин В.А. Водоохлаждаемый свод электродуговой печи. М.: Металлургия, 1985. 144 с.
15. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Электрические печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1984. 232 с.
16. Водоохлаждаемые узлы сверхмоощных дуговых сталеплавильных печей / М.Г. Кузьмин [и др.] // *Электрометаллургия*. 2014. № 7. С. 8–16.
17. Хумер О. Водоохлаждаемые панели современных сверхмоощных дуговых печей // *МРТ Металлургические заводы и технологии*. 1997. № 8. С. 6–14.
18. Нефедов А.В., Нефедова Е.В. Импортозамещающая технология выгрузки пыли из бункеров электросталеплавильного цеха ОАО «Уральская сталь» // *Сталь*. 2015. № 12. С. 74–76.

19. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система / Л.М. Симонян [и др.] // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. № 11. С. 68–75.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Расчет потоков теплового излучения дуг по поверхности ванны и стен высокоомощных электродуговых сталеплавильных печей. Часть II. Распределение тепловых потоков излучения дуг по поверхности стен // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 43–51.

CALCULATION OF THERMAL RADIATION FLUXES OF ARCS ON THE SURFACE OF THE BATH AND WALLS OF HIGH-POWER ELECTRIC ARC STEEL-MELTING FURNACES. PART II. DISTRIBUTION OF HEAT FLUXES OF ARC RADIATION ALONG WALL SURFACES

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article calculates the distribution of heat fluxes of radiation of short arcs on the metal bath. It is indicated that when working on short arcs thermal radiation of arcs does not reach the slopes and melting of charge on them is carried out by heat conduction and convection from ball segments under the arcs in the bath; with the growth of arcs buried in the slag heat fluxes of radiation of arcs on the walls are reduced by 3-4 times. It is noted that calculated and experimental data on heat fluxes of arc radiation on water-cooled wall panels coincide.

Keywords: steel, furnace, electric arc, metal bath, heat exchange, thermal radiation, thermal conductivity, convection.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Calculation of thermal radiation fluxes of arcs on the surface of the bath and walls of high-power electric arc steel-melting furnaces. Part II. Distribution of heat fluxes of arc radiation along wall surfaces // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2024. No. 3 (23), pp. 43–51.