

УДК 44.31.03:53.07.00:45.43.00

**РАСЧЕТ ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДУГ  
ПО ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ И СТЕН ВЫСОКОМОЩНЫХ  
ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ.  
ЧАСТЬ I. ТЕПЛООБМЕН ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ  
В ВАННЕ МЕТАЛЛА**

*А.Н. Макаров**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2024

**Аннотация.** Отмечено, что в России, в Тверском государственном техническом университете, открыты законы теплового излучения электрических дуг дуговых сталеплавильных печей и факелов факельных нагревательных печей, топков паровых котлов, камер сгорания газотурбинных установок электростанций. На основе открытых законов разработана методика расчета тепловых потоков излучения дуг по поверхности ванны металла и шаровых сегментов под дугами в ванне, которая изложена в данной статье. В ходе расчетов установлено, что с ростом высоты слоя шлака происходит перераспределение потока теплового излучения дуг между поверхностями стен, свода, ванны (с одной стороны) и поверхностями шаровых сегментов в ванне под дугами (с другой). Сделан вывод, что шаровые сегменты образовались в ванне под действием электромагнитных сил дуг.

**Ключевые слова:** сталь, электрические дуги, теплообмен, тепловое излучение, ванна металла.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-51-62****ВВЕДЕНИЕ**

Электрические дуги являются основными источниками тепловой энергии в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). На долю дуг приходится 55–65 % энергии, поступающей в современную высокомоощную ДСП. От газокислородных горелок, инжекторов для вдувания углеродосодержащего порошка, экзотермических реакций, реакций окисления углерода, железа и других элементов шихты кислородом в ДСП приходит 35–45 % тепловой энергии. Вся подведенная к дугам электрическая энергия преобразуется в них в тепловую энергию, или тепловой поток. Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям, тепловой поток дуг ДСП на 92–96 % состоит из потока теплового излучения [1–6]; на долю теплопроводности, конвекции приходится 4–8 % мощности дуг.

В работе [7] аналитическим путем получено выражение для расчета КПД дуг ДСП всего номенклатурного ряда вместимостей от 0,5 до 200 т. В малотоннажных печах (ДСП-0,5–ДСП-6) дуги близко расположены к стенам, расстояние от дуг до стен составляет 0,31–0,69 м, в связи с чем в отсутствии слоя шлака КПД дуг равно 30–35 %. В большегрузных ДСП (ДСП-100–ДСП-200) расстояние от дуг до стен большое и составляет 2–3 м [8–14], а КПД дуг в отсутствии слоя шлака – 45–50 %. С ростом высоты слоя шлака и заглубления дуг КПД дуг повышается и достигает в большегрузных высокомоощных ДСП при полном погружении дуг в шлак 78–80 %. В книге [14] доказано, что с ростом высоты слоя шлака и КПД дуг удельный расход электроэнергии, потребляемой печью,

уменьшается. При увеличении высоты слоя шлака и КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии уменьшается на 0,75–1 %. Необходимо связать заглубление дуг в шлак, КПД дуг и удельный расход электроэнергии графической зависимостью для проведения анализов теплообмена и совершенствования энерготехнологических режимов плавок в ДСП.

В работе [14] изложены результаты расчета плотностей потоков тепловых излучений дуг по высоте стен высокоомощной 100-тонной ДСП (ДСП-100) при различной длине дуг и высоте слоя шлака. В ходе расчетов установлено, что с ростом заглубления дуг в шлак с 70 до 300 мм плотности потоков тепловых излучений дуг уменьшаются в среднем в 1,6 раза по всей высоте стен печи. С увеличением высоты слоя шлака доля теплового излучения дуг на стены и свод уменьшается в 1,6 раза, а на ванну металла и шлак – увеличивается в 1,6 раза, КПД дуг повышается также в 1,6 раза. Рассчитаем распределение плотностей потоков тепловых излучений электрических дуг по ванне металла и теплообмен дуг в ванне металла высокоомощной печи (ДСП-100) при различных высоте слоя шлака и длине дуг.

### **ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ И ФАКЕЛОВ**

Согласно открытым в России, в Тверском государственном техническом университете (ТвГТУ), в 1996–2001 гг. законам теплового излучения газовых объемов [14] (электрические дуги в ДСП – это ионизированные излучающие газовые объемы), излучение цилиндрического газового объема может быть заменено излучением его цилиндрической оси симметрии. В книге [14] доказано, что, сосредоточив радиальным усилием все излучающие атомы, или всю излучаемую мощность электрической дуги, по цилиндрической оси симметрии последней, при расчетах теплообмена получим результат, аналогичный тому, который имеет место при рассредоточенном расположении излучающих атомов по всему объему электрической дуги. В соответствии с 1-м законом теплового излучения газовых объемов плотность потока теплового излучения  $q$ , падающего от цилиндрического газового объема, электрической дуги на расчетную площадку, прямо пропорциональна мощности дуги  $P_d$ , локальному угловому коэффициенту квантового излучения электрической дуги на расчетную площадку  $\varphi_{дF}$  и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения газовой среды  $k$ , средней длине пути лучей от всех излучающих атомов дуги до расчетной площадки  $r$  и площади расчетной площадки  $F$ :

$$q = \frac{\varphi_{дF} P_d}{F e^{kr}}.$$

Согласно 2-му закону теплового излучения газовых объемов [14], средняя длина пути лучей от излучающих атомов газового объема (электрической дуги) до расчетной площадки равна среднearифметическому расстоянию от оси симметрии дуги до площадки. По 5-му закону теплового излучения газовых объемов, плотности потоков тепловых излучений цилиндрических газовых объемов большого диаметра и их цилиндрической оси симметрии на расчетную площадку равны при равенстве выделяющихся в них тепловых мощностей. Расчет угловых коэффициентов теплового излучения газовых объемов на расчетные площадки представляет собой сверхсложную задачу, так как для ее решения требуется трехкратное интегрирование геометрических и тригонометрических зависимостей [15–20]. В зональном и численном методах расчета теплообмена излучением

газовые объемы разбивают на 1–1,5 млн ячеек, представляющих собой прямоугольные параллелепипеды бесконечно малых размеров [15]. Угловые коэффициенты теплового излучения  $j$ -го параллелепипеда, заполненного излучающим газом, на площадку  $F$  находят с помощью трехкратного интегрирования по ширине  $a_j$ , глубине  $b_j$ , высоте  $h_j$  топки:

$$\varphi_{jF} = \int_{a_j} \int_{b_j} \int_{h_j} \frac{\cos \alpha_j \cos \beta_j}{2\pi r_j^2} d\alpha_j d\beta_j dr_j,$$

где  $\alpha_j$  – угол между перпендикуляром к грани параллелепипеда и кратчайшей прямой  $r_j$  до расчетной площадки  $F$ ;  $\beta_j$  – угол между перпендикуляром к расчетной площадке  $F$  и прямой  $r_j$ .

Практические решения трехкратных интегралов для расчета угловых коэффициентов излучения газовых объемов на расчетные площадки отсутствуют как в России [16], так и за рубежом [18–20]. Сформулированные в РФ законы теплового излучения газовых объемов [14, 21] позволяют моделировать тепловое излучение газовых объемов любой формы и размеров вписанными в них цилиндрическими газовыми объемами, а в расчетах теплообмена – осями симметрии цилиндрических газовых объемов. Открытые законы теплового излучения газовых объемов позволили перейти в расчетах угловых коэффициентов излучения газовых объемов от тройного интеграла по ширине, глубине, высоте газового объема к однократному интегрированию по высоте цилиндрической оси симметрии газового объема и разработать в ТвГТУ методику расчета теплообмена в ДСП. В работах [5, 14] решены однократные интегралы и получены формулы для определения локальных угловых коэффициентов излучения цилиндрических газовых объемов при любом пространственном положении их цилиндрических осей симметрии и расчетной площадки. Воспользуемся таблицами с формулами для нахождения локальных угловых коэффициентов излучения цилиндрических газовых объемов на расчетные площадки с целью расчета теплообмена в ДСП-100 [14].

#### **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ НА ВАННУ МЕТАЛЛА**

На рис. 1 (масштаб 1 : 30), 2 изображены необходимые построения для расчетов.

Условные обозначения на указанных рисунках:  $h_{СТ}$  – высота стен ДСП-100, м;  $d_Э$  – диаметр электродов, м;  $h_З$ ,  $h_М$ ,  $h_Ш$  – высота заглибления дуги общая, в металл, в шлак соответственно, мм;  $D_В$ ,  $d_Р$  – диаметр ванны и распада электродов соответственно, мм;  $I$ – $III$  – расчетные площадки на поверхности ванны металла;  $l_Д$  – длина дуги, м;  $l_{ОТК}$  – длина открытой части дуги, излучающей тепловой поток на расчетную площадку на поверхности ванны, м;  $r$  – луч, или расстояние от дуги до расчетной площадки на поверхности шлака, м;  $\beta$  – угол, под которым открытая часть дуги излучает на расчетную площадку, град;  $\Theta$  – угол электродинамического отклонения дуги от оси электрода, град (определяется по методике, изложенной в работе [5]);  $O_1O_2$  – ось симметрии электрода;  $O_3O_4$  – ось симметрии печи;  $D_1D_2$  – ось симметрии ванны металла;  $I$ – $III$  – номера электродов фаз (А, В, С соответственно).



Для взаимного расположения цилиндрической оси симметрии дуги и расчетной площадки, изображенных на рис. 1, 2, по таблице [5] находим аналитическое выражение для определения локальных угловых коэффициентов излучения электрической дуги на площадку 2:

$$\varphi_{ДФ} = \frac{\alpha_{СТ} l_{ОТК} \sin^2 \beta F}{2\pi^2 r l_D^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{СТ}$  – доля мощности, выделяющаяся в столбе дуги, для ДСП-100 ( $\alpha_{СТ} = 0,92$ );  $F$  – прочность расчетной площадки,  $m^2$  [14].

Подставив уравнение (1) в 1-й закон теплового излучения газовых объемов, получим аналитическое выражение для расчета плотностей потоков теплового излучения дуги на расчетные площадки 1–13, расположенные по поверхности ванны металла по оси симметрии ванны  $D_1 D_2$  (см. рис. 1, 2):

$$q = \frac{\alpha_{СТ} P_D l_{ОТК} \sin^2 \beta}{2\pi^2 r l_D^2 e^{kr}}. \quad (2)$$

Для каждой расчетной площадки по выражению (2) определили плотности потоков тепловых излучений, падающих от дуг электродов I–III. Результаты расчетов суммировали, рассчитав для каждой из 13 расчетных площадок плотность потока теплового излучения, падающего на площадку от трех дуг фаз А, В, С. В расчетах по формуле (2) принимали к использованию средний коэффициент поглощения пылегазовой атмосферы печи  $k = 0,7$  (для поглощающей атмосферы),  $k = 0$  (для лучепрозрачной атмосферы печи) [5].

Информация о диапазоне изменения линейного  $U_{2л}$  и фазного  $U_{2ф}$  напряжения, электропечного трансформатора при изменении ступеней напряжения, то есть о параметрах печи ДСП-100 и ее дуг, представлена ниже:

| $D_B,$<br>м | $d_P,$<br>м | $h_{СТ},$<br>м | $d_Э,$<br>м | $U_{2л},$<br>В | $U_{2ф},$<br>В | $P_D,$<br>Вт | $U_D,$<br>В | $I_D,$<br>кА | $l_D,$<br>мм | $h_3,$<br>мм                   |
|-------------|-------------|----------------|-------------|----------------|----------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------------------------|
| 5,4         | 1,4         | 2,5            | 600         | 829–300        | 479–173        | 18           | 360,<br>225 | 50,<br>80    | 425,<br>526  | 70, 160, 300,<br>425, 143, 256 |

По формуле (2) рассчитали плотности потоков тепловых излучений, падающих от 3 дуг на 13 расчетных площадок, пять из которых (1–5) расположены на поверхности ванны напротив электрода и дуги фазы I, а 8 площадок (6–13) – на поверхности ванны между электродами и дугами фаз II, III.

Под действием осевого электродинамического усилия дуга образует в ванне металла и шлаке мениск, или шаровой сегмент, высотой  $h_3$  (см. рис. 1, 2). Для определения влияния высоты слоя шлака на распределение плотностей потоков тепловых излучений длинных дуг по поверхности ванны приняли четыре значения высоты слоя шлака и заглубления дуг в ванну металла и шлак (см. параметры выше): 1-е –  $h_3 = 70$  мм; 2-е –  $h_3 = 160$  мм; 3-е –  $h_3 = 300$  мм; 4-е –  $h_3 = 425$  мм. С целью выявления влияния длины дуг на теплообмен приняли в расчетах короткие и длинные дуги, равные соответственно 256 и 425 мм. Для коротких дуг взяли высоту слоя шлака и заглубления дуг в металл и шлак 143 и 256 мм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДУГ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ

Рассмотрим результаты расчета распределения плотностей потоков тепловых излучений, падающих от трех дуг на участки поверхности ванны 1–5, расположенные напротив дуги фазы I, и на участки 6–13, находящиеся между дугами фаз II, III в поглощающей атмосфере печи. На рис. 3а представлены итоги расчета плотностей потоков тепловых излучений, падающих от трех дуг на участки поверхности ванны, расположенные около оси дуги фазы I, на рис. 3б – распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по диаметру ванны  $D_B$ . Для обеих частей рис. 3  $l_D = 425$  мм при  $h_3 = 70$  мм (график 1),  $h_3 = 160$  мм (2),  $h_3 = 300$  мм (3),  $h_3 = 425$  мм (4).

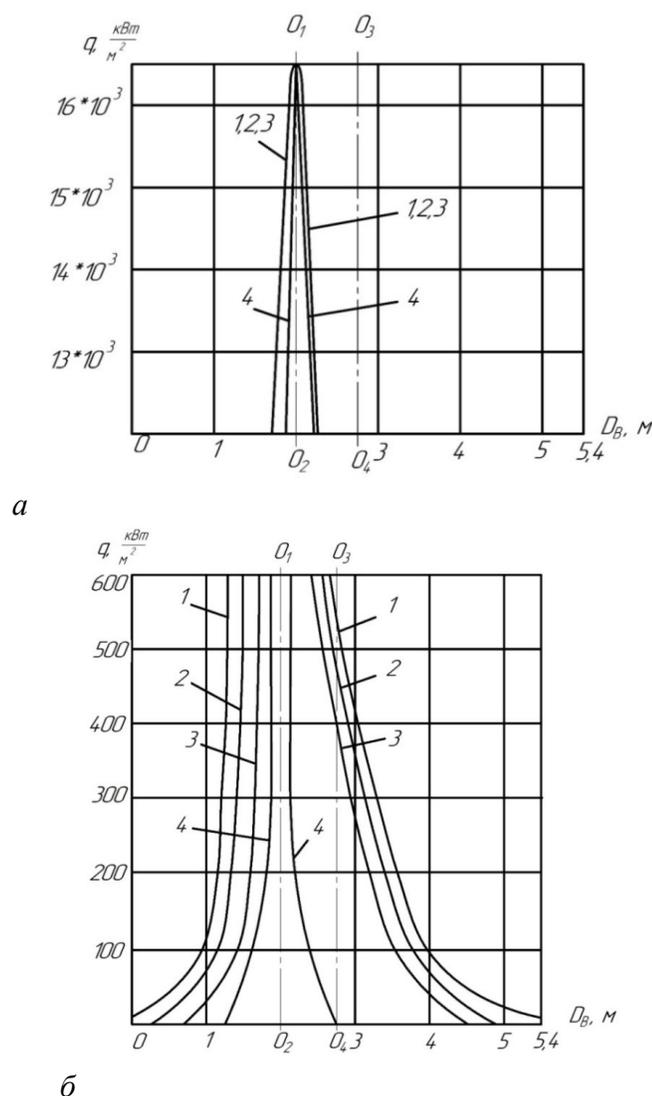


Рис. 3. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг:  
а – по поверхности ванны в поглощательной атмосфере печи на расстоянии 0,5 м  
от оси дуги  $O_1O_2$ ; б – по диаметру ванны

Для участков ванны, расположенных на расстоянии 5 см от оси дуги фазы  $I$ , угол  $\beta$  стремится к  $90^\circ$ ,  $\sin\beta \approx 1$ ,  $l_{\text{отк}}/l_{\text{д}} = 1$ ,  $e^{k \cdot r} = 1$ . Подставив эти данные в выражение (2), получим

$$q = \frac{\alpha_{\text{ст}} \cdot P_{\text{д}} \cdot l_{\text{отк}} \cdot \sin^2 \beta}{2\pi^2 \cdot r \cdot l_{\text{д}}^2 \cdot e^{k \cdot r}} = \frac{0,92 \cdot 18 \cdot 10^3 \cdot 0,425 \cdot 1}{2\pi^2 \cdot 0,05^2 \cdot 0,425^2 \cdot e^{0,7 \cdot 0,05}} = 16,56 \cdot 10^3 \text{ кВт/м}^2.$$

Таким образом, максимальные потоки теплового излучения дуг находятся на поверхности ванны в шаровом сегменте, образуемом электродинамическим давлением дуги на жидкометаллическую ванну, и составляют  $16,56 \text{ МВт/м}^2$  при любой высоте шлака и любом заглублении дуги в жидкометаллическую ванну (см. рис. 3а). Такие мощные тепловые потоки, падающие от дуг на поверхности шарового сегмента, и среднemasсовая температура дуги  $6000^\circ\text{C}$  должны вызвать интенсивное испарение металла и шлака из зоны шарового сегмента. Однако это не так: в зоне дуг испаряется не более 10 % всего угара металла, а основная масса (90 %) – это угар металла в зонах продувки ванны кислородом [22]. Причины небольшой массы металла, испаряемого из зоны дуг, можно понять, проведя расчет и анализ теплообмена дуг и поверхностей ванны и шарового сегмента.

При высоте заглубления дуг в металл и шлак  $h_3 = 70$  мм тепловые потоки от дуг составляют на участок ванны  $I$ , расположенный напротив дуги  $I$  около стены на откосах,  $35 \text{ кВт/м}^2$ , на расстоянии 1 м от стены –  $118 \text{ кВт/м}^2$ , 1,33 м –  $528 \text{ кВт/м}^2$ , 1,66 м –  $2794 \text{ кВт/м}^2$ , 2 м от стены под дугой –  $16,56 \text{ мВт/м}^2$ . С удалением расчетных площадок от дуги и оси  $O_1O_2$  плотность тепловых потоков излучений дуг на ванну уменьшается и составляет по вертикальной оси печи и ванны металла  $O_3O_4$   $545 \text{ кВт/м}^2$ , на расстоянии 2 м от противоположной стены, от точки  $D_2$ , –  $275 \text{ кВт/м}^2$ , на расстоянии 1,66 м от указанной точки –  $125 \text{ кВт/м}^2$ , на расстоянии 1,33 м от точки  $D_2$  –  $84 \text{ кВт/м}^2$ , на расстоянии 1 м от точки  $D_2$  –  $46 \text{ кВт/м}^2$ ; на откосах у точки  $D_2$  –  $6 \text{ кВт/м}^2$ . Таким образом, тепловые потоки, падающие от трех дуг на участки ванны, расположенные напротив дуги, превышают тепловые потоки, падающие на участки ванны, находящиеся между дугами, в следующее количество раз: на откосах – в 6 раз; на расстоянии 1 м от стен – в 2,6 раза; на расстоянии 1,33 м от стен – в 6,3 раза; на расстоянии 1,66 м от стен – в 22,4 раза; на расстоянии 2 м от стен – в 60 раз.

Вышеизложенные тепловые потоки излучения дуг падают на ванну после прорезки колодцев и горения дуг на ванну металла при отсутствии слоя шлака или его небольшой высоте на протяжении большей части времени расплавления шихты. Проведенные расчеты объясняют большую скорость расплавления шихты, расположенной напротив дуг, и замедленное расплавление шихты, находящейся на участках между дугами: тепловые потоки на участки, расположенные напротив дуг, в 6–60 раз превышают тепловые потоки на участки между дугами. Практика эксплуатации высокоомощных ДСП, процессов расплавления шихты в ДСП подтверждает результаты расчетов распределения тепловых потоков дуг по ванне. Расплавление шихты, находящейся на откосах между дугами, происходит с меньшей скоростью по сравнению со скоростью расплавления шихты, расположенной на откосах напротив дуг, так как расчетные и действительные тепловые потоки на откосах между дугами в 6 раз меньше по сравнению с расчетными и действительными тепловыми потоками на откосах напротив дуг. Итоги расчетов объясняют случаи наличия остатков нерасплавившегося лома, имеющегося на откосах между дугами по окончании расплавления шихты. Выравнивание тепловых потоков на периферии ванны осуществляют рациональным расположением газокислородных горелок, рафинировочных кислородных горелок, инжекторов для вдувания углеродосодержащего порошка на

водоохлаждаемых панелях стен между электродами и напротив зон с пониженной температурой ванны металла [23–27].

По мере расплавления высота шихты в рабочем пространстве печи уменьшается, водоохлаждаемые панели стен освобождаются от шихты, закрывающей панели от прямого теплового излучения дуг. Для защиты указанных панелей от прямого теплового излучения дуг и с целью повышения КПД дуг высоту слоя шлака увеличивают [7, 9]. На рис. 3б графики 2, 3 характеризуют распределение потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны при высоте заглибления дуг  $h_3 = 160$  мм и  $h_3 = 300$  мм соответственно. Как видно из рис. 3б, с повышением высоты слоя шлака дуги погружаются в него и их тепловое излучение не достигает откосов. Напротив дуги на расстоянии 1 м от стен тепловые потоки на ванну составляют 56 и 14 кВт/м<sup>2</sup> при высоте слоя шлака 160 и 300 мм соответственно. Еще меньше тепловые потоки на ванну между дугами на расстоянии 1 м от точки  $D_2$ : они составляют 17 и 3 кВт/м<sup>2</sup> при высоте шлака 160 и 300 мм соответственно. По мере приближения к дуге тепловые потоки на ванну металла возрастают. Однако неравномерность теплового излучения дуг на ванну с увеличением высоты слоя шлака сохраняется: тепловые потоки, падающие на участки ванны, расположенные напротив дуг, в 6–60 раз превышают тепловые потоки на участки ванны, находящиеся между дугами, о чем мы говорили также выше.

В ходе проведенных расчетов установлено, что с ростом заглибления дуг в шлак печи ДСП-100 с 70 до 300 мм плотность потоков тепловых излучений дуг уменьшается в среднем в 1,6 раза по всей высоте стен [7, 14]. С повышением высоты слоя шлака доля теплового излучения дуг на стены и свод снижается в 1,6 раза, а на ванну увеличивается в 1,6 раза [7, 14]. При погружении электрических дуг в шлак и ванну металла происходит перераспределение теплового излучения дуг между поверхностью ванны и поверхностью шарового сегмента, образуемого дугой в ванне металла и шлаке (см. рис. 1). С увеличением высоты слоя шлака тепловое излучение дуг на поверхность ванны уменьшается, а на поверхность шарового сегмента в ванне металла и шлаке возрастает.

На рис. 3б (график 4) приведены результаты расчета распределения тепловых потоков излучения дуг по поверхности ванны при полном погружении дуг в шлак ( $h_3 = 425$  мм). Как видно из результатов расчетов, при полном погружении дуг в шлак и ванну металла на поверхность ванны дуги практически не излучают тепловые потоки. Тепловой поток излучения дуг сосредоточен на поверхности шарового сегмента в ванне металла и шлаке, среднemasсовая температура дуги 6000 °С [1–6]. Температура поверхности части шарового сегмента высотой  $h_m$ , образуемого электродинамическим давлением дуги на жидкометаллическую ванну, не превышает температуру кипения железа  $t_m = 2735$  °С.

Температура поверхности шлака высотой  $h_{ш}$  в шаровом сегменте не превышает температуру испарения шлака  $t_{ш} = 2500$  °С [28, 29]. Тепло к ванне расплавляемого металла передается теплопроводностью и конвекцией от горячей поверхности шарового сегмента в жидкометаллической ванне и шлаке. На рис. 2 процесс преобразования тепловых потоков излучения дуг в потоки конвективные (волнистые линии) и теплопроводности (прямые линии – стрелки) в шаровых сегментах показан на примере дуги фазы II. Аналогичные процессы преобразования потоков теплового излучения дуг в потоки конвективные и теплопроводности происходят и под дугами фаз I и III. При постоянной величине тока с ростом высоты слоя шлака увеличивается доля теплового потока излучения, получаемого шлаком от дуг и передаваемого шлаком ванне расплавляемого металла теплопроводностью и конвекцией. Перегретый шлак из шарового сегмента передает тепло как ванне металла, так

и соседним слоям шлака. Ванна металла получает тепло от горячих шаровых сегментов, находящихся под электродами, путем теплопроводности и вынужденной конвекции, возникающей под влиянием электродинамических сил электрических дуг. Дуга под действием отклоняющей электродинамической силы перемещается в шаровом сегменте с частотой 50 Гц от оси электрода  $O_1O_2$  до поверхности шлака, далеко выбрасывает металл и шлак и образует шаровой сегмент в ванне металла [1, 5]. Механизм образования шарового сегмента подробно описан в учебнике [5]. Согласно закону Архимеда, под действием гидростатической подъемной силы новые слои металла и шлака взамен выброшенных дугой поступают в шаровой сегмент (см. рис. 1) и процессы перемешивания, выбрасывания металла, шлака из сегмента повторяются, создавая постоянно действующий мощный перемешивающий эффект металла, шлака, конвективный теплообмен в ванне интенсифицируется. При увеличении высоты слоя шлака все большее количество шлака участвует в конвективном теплообмене и конвективный теплообмен ванны и шарового сегмента интенсифицируется, возрастает перенос тепла из шарового сегмента к соседним слоям шлака и ванны металла, КПД дуг повышается.

Таким образом, электрические дуги излучают тепло на свод, стены, ванну металла, на поверхность шарового сегмента в ванне металла и шлаке. С повышением высоты слоя шлака тепловое излучение дуг на свод, стены, ванну металла снижается и увеличивается тепловое излучение дуг на поверхность шарового сегмента в ванне металла, шлаке, КПД дуг возрастает. При увеличении слоя шлака возрастает количество шлака, участвующего в конвективном теплообмене за счет электродинамических сил дуг, усиливается конвективный теплообмен шарового сегмента с ванной металла, шлаком, что приводит к повышению КПД дуг. Тепло, полученное шаровым сегментом тепловым излучением от дуг, из сегмента путем теплопроводности и интенсивной конвекции передается ванне металла, шлаку. При полном погружении дуг в ванну металла и шлак  $h_3 = l_d$  и большая часть теплового излучения дуг попадает на поверхность шаровых сегментов, увеличивая КПД дуг до 80 % [14]. Небольшая часть теплового излучения дуг (не более 20 %) выходит из шаровых сегментов, в которых находятся дуги, попадая на поверхность стен, свода [14]. Вследствие интенсивного конвективного теплообмена шлака, металла, постоянной заменяемости перегретых слоев шлака, металла менее нагретыми слоями в шаровом сегменте с частотой 50 раз в секунду только малая часть выделенного в шаровом сегменте дугами тепла расходуется на испарение металла и шлака. Результаты вышеизложенных аналитических исследований подтверждаются практикой эксплуатации высокоомощных ДСП: угар металла под дугами составляет 8,6 %, основная доля (91,4 %) угара металла приходится на потери Fe с шлаком и испарение металла в зоне продувки металла кислородом [29].

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе расчетов было установлено, что тепловые потоки излучения дуг распределены по ванне металла печи ДСП-100 довольно неравномерно. Тепловые потоки, падающие на участки ванны напротив дуги, превышают тепловые потоки, падающие на участки ванны, находящиеся между дугами на откосах и на расстоянии 1,33 м от стен, в 6 раз, на расстоянии 1,66 м от стен – в 22,4 раза, на расстоянии 2 м от стен – в 60 раз. Полученные результаты объясняют большую скорость расплавления шихты, расположенной напротив дуг, и меньшую скорость расплавления шихты на участках, расположенных между дугами. Итоги выполненных расчетов могут быть использованы для рационального расположения газокислородных горелок, рафинировочных кислородных горелок, инжекторов для

вдувания углеродосодержащего порошка в стенах между электродами и напротив зон с пониженной температурой ванны металла.

В ходе расчетов также было выявлено, что с ростом заглубления дуг в шлак происходит перераспределение теплового излучения дуг между поверхностями стен, свода, ванной (с одной стороны) и поверхностями шаровых сегментов, образованных электродинамическими силами дуг в ванне металла и шлаке (с другой). С увеличением высоты слоя шлака тепловое излучение дуг на поверхность стен, свода, ванну уменьшается, а на поверхности шаровых сегментов увеличивается. За счет электродинамических сил дуги углубляются в ванну и шлак, выбрасывают с частотой 50 раз в секунду жидкий металл и шлак из шаровых сегментов, создавая благоприятные условия для преобразования тепловых потоков излучения дуг в потоки конвективные и теплопроводности. Электромагнитное выдувание дуг способствует перемешиванию металла, шлака и интенсификации конвективного теплообмена, возрастанию КПД дуг [21–29]. При полном погружении дуг в шлак количество шлака, участвующего в конвективном теплообмене, увеличивается и КПД дуг достигает максимального значения 78–80 %. Вследствие интенсивного конвективного теплообмена шлака, металла в шаровом сегменте только малая часть выделяемого дугами в указанном сегменте тепла расходуется на испарение металла и шлака, подавляющая часть тепла дуг тратится на расплавление шихты и нагрев ванны металла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / под ред. Л.Е. Никольского. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
2. Окорочков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи: учебное пособие. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
3. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии: учебник для вузов по специальности «Металлургия черных металлов». М.: Металлургия, 1985. 280 с.
4. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг, горящих в парах металлов // *Электromеталлургия*. 2009. № 11. С. 19–24.
5. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие. 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 заглубление 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: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 325 с.
8. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Ашпин Н.А. Прямое получение стали из рудного сырья: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 428 с.
9. Кузнецов М.С., Якушев Е.В., Кулагин С.А., Котельников Т.И., Семин А.Е., Косырев К.Л., Кулиш Р.С. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали в дуговой печи // *Электromеталлургия*. 2010. № 2. С. 2–6.
10. Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю., Киселев А.Д. Существует ли реальная альтернатива лому в электросталеплавильном производстве? // *Электromеталлургия*. 2008. № 5. С. 27–30.
11. Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю., Киселев А.Д., Шумаков А.М. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах // *Вестник ЮУрГУ*. 2008. № 9. С. 10–13.

12. Борн К., Грандерат Р. Потенциальные возможности и проблемы утилизации тепла в сталеплавильных цехах // *Металлургическое производство и технология*. 2013. № 2. С. 8–19.
13. Макаров А.Н. Изменение КПД дуг в процессе плавки в дуговых сталеплавильных печах // *Металлург*. 2017. № 4. С. 55–58.
14. 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.
15. Теплотехнические расчеты при автоматизированном проектировании нагревательных и термических печей: справочник / под ред. А.Б. Усачева. М.: Черметинформация, 1999. 184 с.
16. Блох А.Г., Журавлев А.Ю., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
17. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
18. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / под ред. д-ра техн. наук Б.А. Хрусталева. М.: Мир, 1975. 934 с.
19. Спэроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением / пер. с англ. С.З. Сориц, Л.М. Сорокопуда; под ред. А.Г. Блоха. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1971. 294 с.
20. Чандрасскар С. Перенос лучистой энергии / под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Издательство иностранной литературы, 1993. 432 с.
21. Макаров А.Н. Методология научных исследований в университетах и промышленных компаниях: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.; Волга: Инфра-Инженерия, 2023. 276 с.
22. Кожухов А.А., Федина В.В., Меркер Э.Э. Исследование процесса вспенивания сталеплавильного шлака и его влияния на тепловую работу дуговой сталеплавильной печи // *Металлург*. 2012. № 3. С. 42–44.
23. Макаров А.Н. Влияние конструктивного исполнения на энергоэффективность дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 10. С. 13–15.
24. Макаров А.Н. Расчет и анализ энергетических параметров плавок в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 9. С. 30–36.
25. Кузьменко А.Г., Фролов Ю.Ф., Поздняков М.А., Лебедев В.А., Саутин С.Д. Перспективы развития электросталеплавильного комплекса – электропечей и ковшовых печей для производства стали // *Электрометаллургия*. 2012. № 11. С. 2–11.
26. Макаров А.Н. Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть I. Расчет и анализ взаимосвязи КПД дуг и электропотребления // *Металлург*. 2019. № 4. С. 29–35.
27. Макаров А.Н. Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть II. Расчет и анализ взаимосвязи расположения дуг, стен и электропотребления // *Металлург*. 2019. № 5. С. 21–27.
28. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 320 с.
29. Шишимиров М.В., Сосонкин О.М. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2015. Т. 15. № 3. С. 70–79.

**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 тепловых излучений дуг по поверхности ванны и стен высокоомощных электродуговых сталеплавильных печей. Часть I. Теплообмен электрических дуг в ванне металла // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 51–62.

---

**CALCULATION OF THERMAL RADIATION FLUXES OF ARC  
ON THE SURFACE OF THE BATH AND WALLS OF HIGH-POWER ELECTRIC ARC  
STEEL-MELTING FURNACES. PART I. HEAT TRANSFER  
OF ELECTRIC ARC IN A METAL BATH**

*A.N. Makarov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** It is noted that in Russia, at Tver State Technical University, the laws of thermal radiation of electric arcs of arc steelmaking furnaces and torches of flare heating furnaces, furnaces of steam boilers, combustion chambers of gas turbine installations of power plants have been discovered. Based on open laws, a method has been developed for calculating the thermal fluxes of arc radiation along the surface of a metal bath and ball segments under arcs in the bath, which is described in this article. In the course of calculations it was established that with the growth of the slag layer height there is a redistribution of the thermal radiation flux of the arcs between the surfaces of walls, vault, bath (on the one hand) and surfaces of ball segments in the bath under the arcs (on the other hand). It is concluded that the spherical segments were formed in the bath under the action of the electromagnetic forces of the arcs.

**Keywords:** steel, electric arcs, heat exchange, thermal radiation, metal bath.

**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 arc on the surface of the bath and walls of high-power electric arc steel-melting furnaces. Part I. Heat transfer of electric arc in a metal bath // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 2 (22), pp. 51–62.