

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

OSEI-OWUSU Raymond – Graduate Student, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: orajmond2008@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Sokolova Yu.M., Osei-Ovusu R. Risk and reliability management in power supply systems // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 56–67.

УДК 44.31.03:53.07.00:45.43.00

**ВЛИЯНИЕ ЗАДЫМЛЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ И ВЫСОТЫ ШЛАКА
НА ТЕПЛООБМЕН В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ.
ЧАСТЬ I. ВЛИЯНИЕ ЗАДЫМЛЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ
НА ПОТЕРИ С ГАЗАМИ И ВОДОЙ**

А.Н. Макаров

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2021

Аннотация. Состав пылегазовой атмосферы влияет на теплообмен в дуговой сталеплавильной печи. При значительной запыленности атмосферы печи тепловой поток дуг, излучаемый ими в свободное, не заполненное шихтой, пространство в основном поглощается пылегазовой средой и уносится из печи в виде тепловых потерь с отходящими газами. В лучепрозрачной атмосфере печи тепловой поток дуг, излучаемый ими в свободное пространство, достигает стен, поглощается водой водоохлаждаемых панелей и уносится из печи в виде тепловых потерь с охлаждающей водой.

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

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-67-77

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире, в частности в России, до 40 % стали производят в электросталеплавильных цехах (рис. 1) в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). На протяжении долгого времени отсутствовала методика расчета теплообмена в ДСП. В конце XX – начале XXI вв. в Тверском государственном техническом университете была разработана теория теплообмена в ДСП [1]. Воспользуемся разработанными теорией и методикой расчета теплообмена в ДСП для анализа влияния состава пылегазовой атмосферы и высоты слоя шлака на теплообмен и удельный расход электроэнергии в ДСП. Электрические дуги являются основными источниками энергии в ДСП (рис. 2).



Рис. 1. Металлургическая китайская компания с электросталеплавильным цехом производительностью 6 млн т стали в год

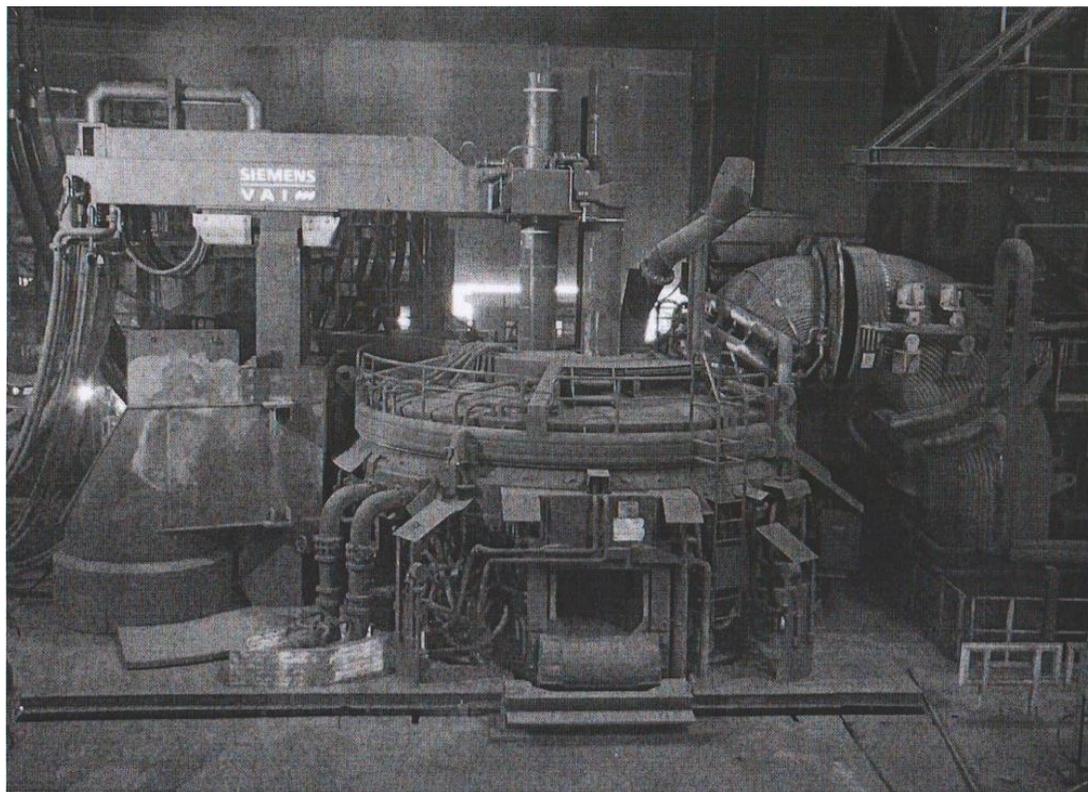


Рис. 2. Дуговая сталеплавильная печь фирмы Simens VAI

По данным энергетических балансов плавки стали в ДСП [2], на долю дуг приходится 55–65 % энергии, газокислородных горелок (ГКГ), экзотермических реакций окисления железа и других элементов шихты – 35–45 % энергии, поступающей в современную высокомоощную ДСП. Вся электрическая энергия в дугах ДСП преобразуется в тепловую. Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям теплообмена, проведенным несколькими группами исследователей в течение 10 лет на ДСП всего ряда вместимостей (от 3 до 200 т), тепловой поток дуг ДСП на 92–96 % состоит из потока теплового излучения и на 4–8 % из конвективного потока и потока, передаваемого теплопроводностью [3–7]. В статье проведен анализ влияния высоты слоя шлака и задымленности атмосферы на теплообмен и удельный расход электроэнергии в современных высокомоощных ДСП: ДСП-100, ДСП-120, ДСП-150 вместимостью 100, 120, 150 т соответственно. Сравниваемые печи работают как на ломе, так и на металлизированных окатышах с загрузкой шихты загрузочными корзинами и загрузочным конвейером с подогревом шихты. В печах применяют все современные способы интенсификации процесса плавки стали: ГКГ, инжекторы угольного порошка, кислородные фурмы, автоматизированные системы управления производственным процессом. Перечисленные печи работают в одинаковых энергетических режимах и имеют следующие показатели [8, 9]: удельная мощность трансформатора 700–800 кВА/т; расход кислорода 20–30 м³/т, природного газа 5–10 м³/т, угля 5–15 кг/т; продолжительность плавки 45–60 мин; удельный расход электроэнергии 375–440 кВт·ч/т (при плавлении окатышей и лома удельный расход электроэнергии 530–550 кВт·ч/т).

ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ В ДСП С ОТХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ И ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДОЙ

Удельные потери с отходящими газами в печах ДСП-100–ДСП-150 изменяются от максимального значения (242 кВт·ч/т) в ДСП-120 Consteel с конвейерной загрузкой нагретой шихты отходящими газами, что составляет 31 % расходной части энергобаланса, до минимального (140 кВт·ч/т; 22 % расходной части энергобаланса) в ДСП-120 с загрузкой шихты корзинами. Большое пылегазообразование в печи ДСП-120 Consteel по сравнению с ДСП-120 обычной конструкции объясняется использованием в Consteel на 65 % большей массы коксового порошка для поддержания пенистого шлака в течение всей плавки и повышения КПД дуг до 0,60–0,73 [2]. Дуги в печах Consteel в течение всего времени плавки горят на ванну металла, и их постоянно необходимо экранировать шлаком для увеличения доли мощности теплового излучения дуг на ванну металла и шлак, уменьшения доли мощности теплового излучения дуг на стены и свод печи.

В печах ДСП-120 обычной конструкции определенную часть времени плавки наводить шлак не нужно, так как после завалки шихты и прорезки колодцев дуги горят в колодцах, экранированы колодцами и полезно излучают 93–80 % мощности на ванну металла и металлошихту в колодцах. КПД дуг в ДСП-120 в вышеописанный период составляет 0,93–0,80 [2]. Максимальному значению удельных потерь с отходящими газами (242 кВт·ч/т) в ДСП-120 Consteel соответствует минимальное значение потерь с охлаждающей водой в этих печах (48 кВт·ч/т), которое составляет 7 % расходной части энергобаланса. В энергобалансе ДСП-120 с загрузкой шихты корзинами минимальному значению удельных потерь с отходящими газами 140 кВт·ч/т соответствует максимальное значение потерь с охлаждающей водой (50–60 кВт·ч/т, или 8–9 % расходной части энергобаланса). Анализ энергетических балансов ДСП-100–ДСП-150 выявил зависимость:

чем больше расход кислорода и угольного порошка в процессе плавки, тем больше объем отходящих газов, тем больше тепловые потери с отходящими газами и тем меньше тепловые потери с охлаждающей водой. Печи работают в близких энергетических режимах и с близкой удельной мощностью дуг, вода используется для охлаждения панелей стен и свода печей.

Пылегазовая атмосфера печи представляет собой взвесь твердых и жидких частиц в газовой среде. Газовая среда ДСП включает в себя азот, оксиды и диоксиды азота, кислород, оксиды и диоксиды углерода. В газовой среде во взвешенном состоянии находится пыль, состоящая из Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , MnO . Запыленность газов ДСП зависит от периода плавки и изменяется от 5 до 50 г/м³ [10], т. е. в 10 раз в процессе плавки. Максимального значения (40–50 г/м³) запыленность газов достигает в период продувки ванны кислородом или подачи в ДСП порошкообразного углерода. Размер частиц пыли – от 0,01 до 100 мкм [11]. Температура парогазовой смеси на выходе из печи изменяется по ходу плавки в широком диапазоне: от 300–600 °С в процессе расплавления шихты до 1500–1600 °С в период интенсивной продувки ванны кислородом. Плотность электросталеплавильной пыли составляет 0,9 т/м³ [10].

При значительном изменении в процессе плавки запыленности пылегазовой смеси (от 5 до 50 г/м³), размеров пыли от 0,01 до 100 мкм коэффициент поглощения пылегазовой атмосферы печи k изменяется в следующих пределах: $k = 0–1,4$ [1, 2]. В расчетах теплообмена в ДСП использовали коэффициент поглощения $k = 0,1$ для лучепрозрачной атмосферы печи и средний коэффициент поглощения $k_{\text{ср}} = 0,7$ для запыленной атмосферы печи. При этом удовлетворительно совпали экспериментальные и расчетные данные теплообмена в ДСП с водоохлаждаемыми сводом и стенами [1, 2]. При коэффициенте поглощения пылегазовой атмосферы печи, равном 0,7 с помощью расчетов и измерений получены близкие по величине (различие составляет лишь 10–20 %) тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен и свода [1].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДУГ НА СТЕНЫ ДСП

Выясним влияние объема отходящих из печей газов и высоты слоя шлака на тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен и тепловые потоки с охлаждающей водой. Необходимые построения для расчетов, выполненные в масштабе в программах AutoCAD и Excel, даны на рис. 3.

Плотность потока теплового излучения дуги q , падающего на расчетную площадку, расположенную на стенах ДСП, определяли по выражению [1]

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

где $\alpha_{\text{ст}}$ – доля мощности дуги, выделяющаяся в столбе дуги, определяется по методике, изложенной в работе [1]; $P_{\text{д}}$ – мощность дуги, кВт; k – коэффициент поглощения газовой атмосферы печи (изменяется в ДСП в пределах от 0,1 до 1,4) [1].

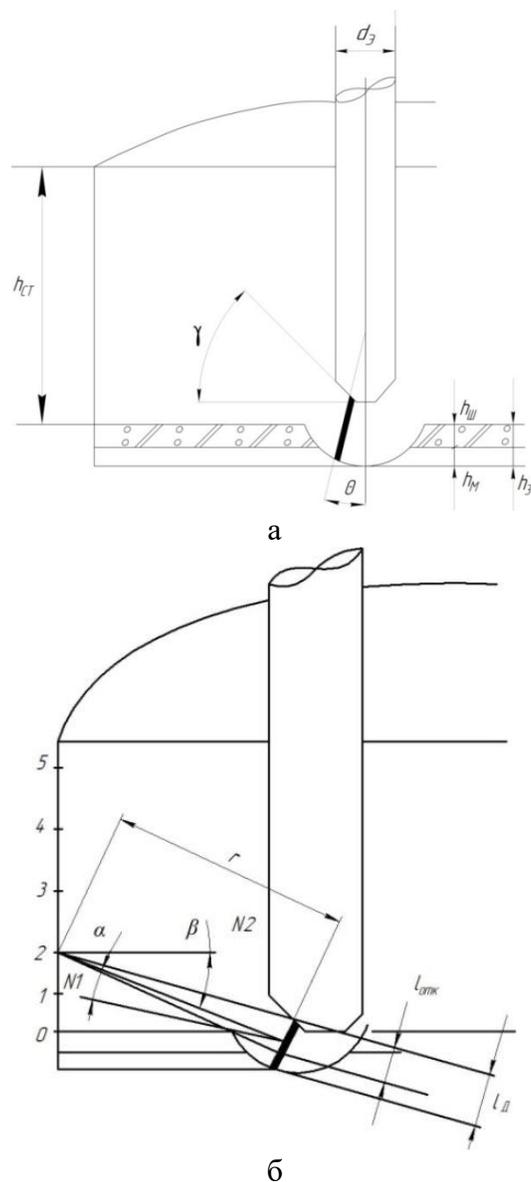


Рис. 3. Схемы взаиморасположения: а – дуги, шлака, стен;

б – для расчета потоков тепловых излучений дуг на стены; $h_{ст}$ – высота стен ДСП, м; d_3 – диаметр электрода, м; h_3 , h_m , $h_{ш}$ – высота заглубления дуги общая, в металл, в шлак соответственно, м; γ – угол, образованный горизонтальной плоскостью торца электрода и наклонной плоскостью, возникающей на электроде вследствие электродинамического перемещения дуги от оси электрода к его периферии, град.; 0–5 – расчетные точки на стенах печей; l_d – длина дуги, м; $l_{отк}$ – длина открытой части дуги, излучающей тепловой поток на расчетную площадку, м; r – луч, расстояние от дуги до расчетной точки на стенах, м; α – угол между лучом r от середины открытой части дуги и перпендикуляром $N1$ к оси дуги, проведенным в начало луча r на дуге, град.; β – угол между нормалью $N2$ к поверхности стен в расчетную точку и лучом r , град.; Θ – угол электродинамического отклонения оси дуги от оси электрода (определяется по методике, изложенной в работе [1])

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПЫЛЕГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ ПЕЧИ НА ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ НА СТЕНЫ И ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ С ОТХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ И ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДОЙ

Расчет потоков тепловых излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен выполнили для печи ДСП-100 для периода окончания расплавления шихты (дуги горят на жидкометаллическую ванну). На рис. 4 видны ванна металла, водоохлаждаемые панели, кожух, футерованная часть стен, рабочее окно, эркерный выпуск.

Параметры каждой из трех дуг: мощность 18 МВт; напряжение 260 В; ток 69,2 кА; длина 300 мм; $\alpha_{\text{изл}} = 0,92$. Расчет тепловых потоков излучения дуг выполнен на участки стен, расположенные напротив электродов и между электродами при высоте заглибления дуг в печах и ванну металла 70 мм и 300 мм в лучепрозрачной ($k = 0$) и поглощающей ($k = 0,7$) атмосфере печи.

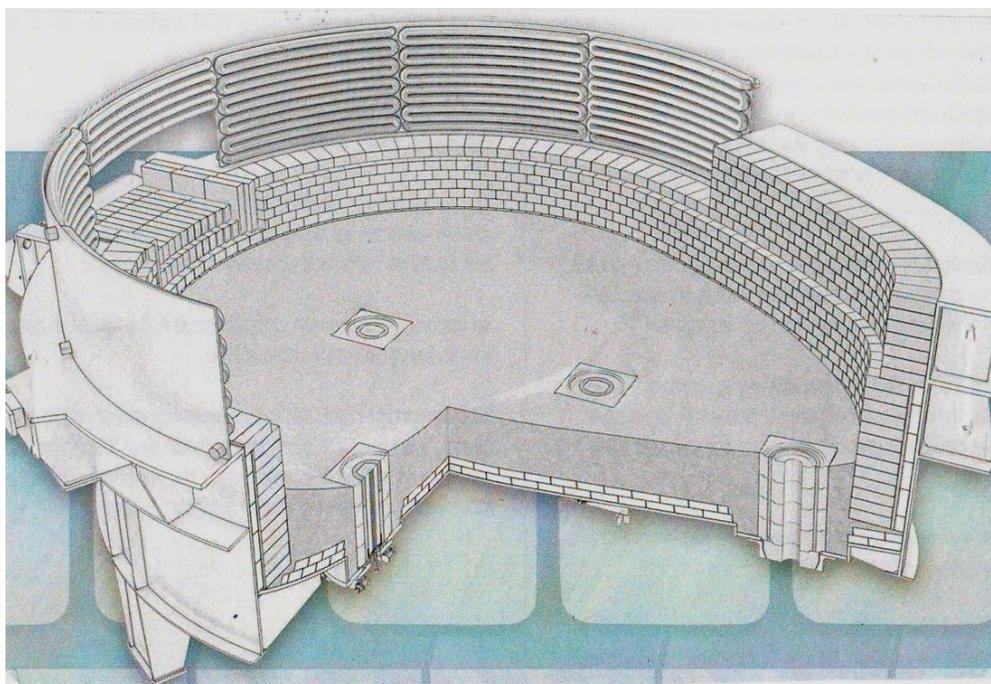


Рис. 4. Внутренний вид свободного пространства ДСП-150

Результаты расчета плотностей потоков тепловых излучений дуг на участки стен, расположенные напротив дуг и между дугами в лучепрозрачной *I* и поглощающей *II* атмосфере печи, представлены на рис. 5.

При отсутствии продувки ванны кислородом и подачи угольного порошка в инжекторы атмосфера печи приближается к лучепрозрачной с $k = 0-0,1$ и тепловые потоки излучения дуг на стены достигают максимальных значений в 600 кВт/м^2 на высоте 0,5 м от уровня ванны металла, тепловые потоки излучения дуг уменьшаются по высоте стен до 260 кВт/м^2 на уровне 2 м от ванны. Аналогичные значения плотностей тепловых потоков на водоохлаждаемые панели стен получены в результате экспериментальных измерений: плотность теплового потока на водоохлаждаемые панели стен изменяется от $100-300 \text{ кВт/м}^2$ в квазистационарных режимах до $600-1000 \text{ кВт/м}^2$ в динамичных процессах [12].

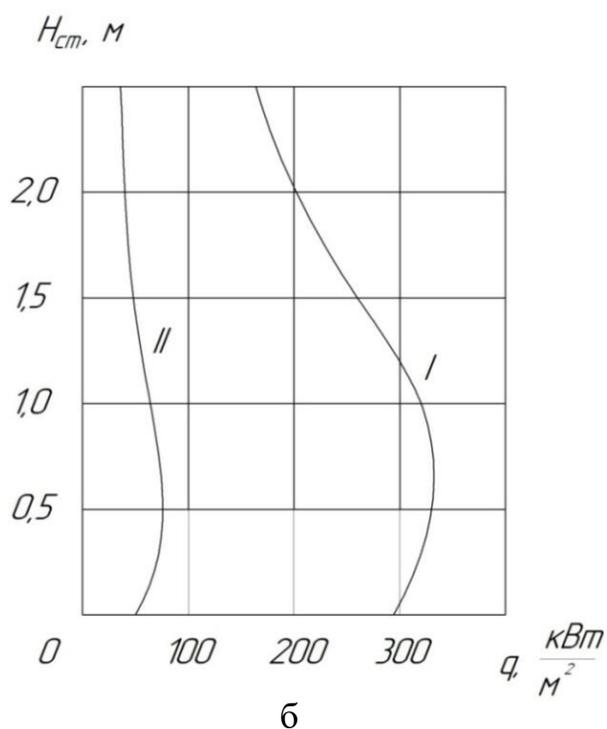
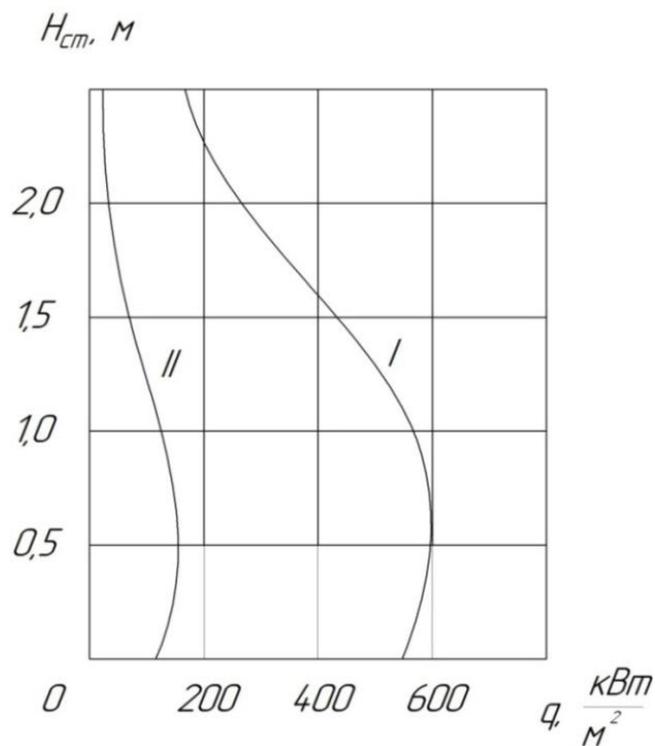


Рис. 5. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг высотой 300 мм по высоте стен печи ДСП-100 при высоте заглиблення дуг 70 мм в прозрачной и поглощающей атмосфере печи по участкам стен, расположенным: а – напротив дуги; б – между дугами

При продувке ванны металла кислородом и вдувании угольного порошка инжекторами в ванну коэффициент поглощения атмосферы печи увеличивается до $k = 0,7$, тепловые потоки излучения дуг на стены снижаются в 3–8 раз и составляют 150 кВт/м^2 на высоте 0,5 м от уровня ванны металла и 30 кВт/м^2 на уровне 2 м от ванны. Следовательно, при отсутствии продувки ванны металла кислородом и при неработающем инжекторе угольного порошка тепловые нагрузки на стены достигают максимальных значений. Этот период работы является наиболее тяжелым для водоохлаждаемых панелей стен. В лучепрозрачной атмосфере печи тепловые потери с охлаждающей водой панелей достигают максимальных значений, а тепловые потери с газами – минимальных (см. рис. 5). Результаты расчетов и вышеизложенный вывод подтверждают результаты экспериментальных исследований работы печи ДСП-10 и ДСП-100 с водоохлаждающим сводом [13]. Тепловые потери с водой водоохлаждаемых панелей зависят от периода плавки и, соответственно, задымленности атмосферы печи. Задымленность атмосферы печи максимальна в период расплавления, снижается в окислительный период и продолжает снижаться в восстановительный. При максимальной задымленности атмосферы печи большая часть теплового излучения дуг поглощается газами, меньшая часть излучения достигает панелей стен и поглощается охлаждающей водой. При максимальной задымленности атмосферы печи тепловые потери с водой минимальны.

При минимальной задымленности и лучепрозрачной атмосфере печи основная часть теплового излучения дуг достигает водоохлаждаемых панелей стен и поглощается водой. При минимальной задымленности атмосферы тепловые потери с водой максимальны. Таким образом, в зависимости от коэффициента поглощения пылегазовой атмосферы печи перераспределяются тепловые потери излучения дуг, уносимые отходящими газами и водой водоохлаждаемых панелей. Результаты расчетов подтверждаются результатами экспериментальных исследований: в период плавления шихты, когда коэффициент поглощения атмосферы печи имеет максимальное значение, потери с охлаждающей водой составляют 10 % от всех потерь с охлаждающей водой за плавку, в окислительный период этот показатель равен 35 %; в восстановительный период, когда атмосфера печи близка к лучепрозрачной, тепловые потери с охлаждающей водой панелей составляют 55 % от тепловых потерь с охлаждающей водой за плавку [13]. Следовательно, результаты экспериментальных исследований тепловых потоков, падающих на водоохлаждаемые панели, и тепловых потерь с охлаждающей водой подтверждают результаты расчетов тепловых потоков излучений дуг на стены в печи ДСП-100 в лучепрозрачной и поглощающей атмосфере.

Участки стен, расположенные между электродами, находятся на большем расстоянии от дуг по сравнению с участками стен, расположенными напротив дуг, поэтому тепловые потоки излучения дуг на данные участки стен меньше, чем на участки, расположенные напротив электродов и дуг. Как видно из результатов расчета (см. рис. 5б), тепловые потоки излучения дуг на высоте стен 0,5 м составляют 360 кВт/м^2 в лучепрозрачной среде, что в 1,7 раза меньше потоков на участки стен, расположенные на аналогичной высоте напротив дуг. На высоте 2 м тепловые потоки излучения дуг в лучепрозрачной среде на участки стен, расположенные между электродами, составляют 200 кВт/м^2 , или в 1,3 раза меньше тепловых потоков дуг на участки стен, расположенные напротив электродов и дуг. В 1,3–1,7 раза меньше потоки теплового излучения дуг в поглощающей среде на участки стен, расположенные между электродами, по сравнению с тепловыми потоками дуг на участки стен напротив электродов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными аналитическими исследованиями установлено, что в ДСП с конвейерной загрузкой шихты дуги в течение всего времени плавки горят на ванну металла, поэтому в процессе плавки обычно стремятся поддерживать вспененный шлак для закрытия дуг, экранирования их теплового излучения на стены и свод и увеличения теплового излучения на ванну металла, шлак. Для вспенивания шлака в течение всего времени плавки используют угольный порошок, подаваемый в шлак инжектором. Работа инжектора характеризуется возрастанием количества и коэффициента поглощения газов, удаляемых из печи. Потери с отходящими газами максимальны и составляют до 31 % в расходной части энергобалансов ДСП с конвейерной загрузкой шихты. Пылегазовая атмосфера в ДСП с конвейерной загрузкой имеет максимальный коэффициент поглощения, тепловое излучение дуг поглощается пылегазовой атмосферой и тепловые потоки на водоохлаждаемые панели имеют минимальное значение, минимальны и потери с охлаждающей водой.

В печах с загрузкой шихты корзинами дуги длительное время горят в колодцах, экранированы шихтой, вследствие чего расход угольного порошка в 1,5 раза меньше по сравнению с ДСП с конвейерной загрузкой шихты, потери тепла с отходящими газами также меньше и составляют 22 %, потери с охлаждающей водой – 8 %. В ДСП тепловые потоки от дуг на стены достигают максимальных значений в лучепрозрачной среде, снижаются с ростом запыленности атмосферы и достигают минимальных значений при максимальном коэффициенте поглощения пылегазовой атмосферы печи.

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. Огороков 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. Симонян Л.М., Хилько А.А., Лысенко А.А., Михалчан А.А., Сальникова П.Ю. Электро-сталеплавильная пыль как дисперсная система // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. № 11. С. 68–75.
12. Кузьмин М.Г., Чередниченко В.С., Бикеев Р.А., Чередниченко М.В. Водоохлаждаемые узлы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей // *Электрометаллургия*. 2014. № 7. С. 8–16.
13. Сосонкин О.М., Кудрин В.А. Этапы проведения работ и результаты освоения плавки стали в ДСП с водоохлаждаемыми сводом и стенами // *Электрометаллургия*. 2008. № 11. С. 14–19.

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 задымленности атмосферы и высоты шлака на теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Влияние задымленности атмосферы на потери с газами и водой // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 67–77.

INFLUENCE OF ATMOSPHERIC SMOKING AND SLAG HEIGHT ON HEAT EXCHANGE IN ARC STEEL MELTING FURNACES. PART I. INFLUENCE OF ATMOSPHERIC HUMIDITY ON LOSSES WITH GASES AND WATER

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The composition of the dust and gas atmosphere affects the heat transfer in the arc steelmaking furnace. With a significant dustiness of the furnace atmosphere, the heat flux of arcs emitted by them into the free, not filled with charge, space is mainly absorbed by the dust-gas medium and carried away from the furnace in the form of heat losses with exhaust gases. In the radiant atmosphere of the furnace, the heat flux of the arcs, radiated by them into the free space, reaches the walls, is absorbed by the water of the water-cooled panels and is carried away from the furnace in the form of heat losses with the cooling water.

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

REFERENCES

1. Makarov A.N. *Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках* [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: Metallurgiya. 1981. 344 p.
4. Okorokov N.V. Dugovye staleplavil'nye pechi [Electric arc furnaces]. Moscow: Metallurgy. 1971. 347 p.
5. Egorov A.V. Electroplavilnye pechi chernoy metallurgii [Electric melting furnaces for ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya. 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.
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.
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. Simonyan L.M., Khilko A.A., Lysenko A.A., Mihalchan A.A., Salnikova P.Yu. Electric steel-smelting dust as a dispersed system. *Izvestiya vuzov. Ferrous Metallurgy*. 2010. No. 11, pp. 68–75. (In Russian).
12. Kuzmin M.G., Cherednichenko V.S., Bikeev R.A., Cherednichenko M.V. Water-cooled units of heavy-duty arc steel-making furnaces. *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).

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 smoking and slag height on heat exchange in arc steel melting furnaces. Part I. Influence of atmospheric humidity on losses with gases and water // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 2 (10), pp. 67–77.