

С. Н. Тимошенко¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., докторант, e-mail: stimoshenko155@gmail.com

А. В. Дорошенко², нач. лаборатории

Б. П. Дядьков², вед. инженер-технолог

П. И. Тищенко³, канд. техн. наук, гл. специалист

С. П. Онищенко³, директор

¹Донецкий национальный технический университет, Покровск

²ПАО «Сумское НПО», Сумы

³ЧП «Фирма РОУД», Киев

Энергоэффективные решения при модернизации малотоннажных дуговых сталеплавильных печей литейного класса

Численное моделирование теплообмена и газодинамики в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) литейного класса вместимостью 3 т показало, что при длительности простоев печи 18–20 часов и более, замена 40 % футеровки стен и 16–20 % футеровки свода водоохлаждаемыми элементами с объемной структурой обеспечивает паритет с исходной печью по расходу электроэнергии при существенной экономии огнеупоров. Уменьшение диаметра ванны с 2,1 до 1,8 м и увеличение ее глубины при данной вместимости печи снижает потери теплоты излучением на 13–18 %. Применение системы рассредоточенной аспирации уменьшает пылегазовые выбросы в электродные зазоры в 2 раза, приток воздуха в печь на – 11 % и эмиссию плавильной пыли – на 20 % в сравнении с порталной аспирационной камерой. Практикой эксплуатации 3-т ДСП с комбинированным сводом подтверждено снижение расхода огнеупоров на 6,5–11 и графитированных электродов на 1,2–1,5 кг/т, соответственно.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь литейного класса, энергоэффективность, водоохлаждаемые элементы с объемной структурой, «глубокая» ванна, система рассредоточенной аспирации.

Введение. В литейных цехах машиностроительных заводов широкое распространение получили дуговые сталеплавильные печи (ДСП) вместимостью 3–6 т. Невысокая (до 0,5–0,7 МВА/т) удельная мощность трансформатора в сочетании с энергоемкой классической технологией, повышенными потерями теплоты и длительными (до суток и более) простоями, неэффективная система аспирации определяют низкую, в сравнении с ДСП «большой» металлургии, энергоэффективность и экологичность, повышенный удельный расход огнеупоров и электродов на печах литейного класса.

Анализ последних исследований и публикаций. Постановка проблемы. Для «малой» металлургии характерна классическая технология выплавки стали, осуществляемая в ДСП с огнеупорной футеровкой, минимальным набором средств интенсификации (расходная трубка для продувки ванны кислородом) и порталной системой аспирации.

В ДСП литейных цехов США достаточно широко используют средства интенсификации плавки: топливно-кислородные горелки и кислородные фурмы с когерентной струей совместно с энергоносителем SiC в количестве 0,4–0,6 % массы шихты [1]. Удельный расход электроэнергии в среднем составляет 527 кВтч/т, а потери энергии не превышают 23–29 %. При неритмичной работе ДСП такие показатели недостижимы. По данным [2], суточный простой 6-т

ДСП приводит к снижению средней температуры футеровки до 200 °С, и только для восстановления ее энтальпии требуется ввод энергии на уровне теоретического расхода на выплавку стали.

Следует отметить, что применительно к ДСП «малой» металлургии концепция водоохлаждаемых элементов (ВЭ) окончательно не сформулирована, в отличие от печей «большой» металлургии с интенсивной технологией и коротким периодом работы с жидкой ванной. Поэтому, актуальны компромиссные решения по ВЭ с учетом энерготехнологических особенностей конкретного производства, позволяющие достичь паритета с кирпичной футеровкой по расходу электроэнергии при существенной экономии огнеупоров. Применительно к 12-т ДСП постоянного тока, работающей в условиях длительных простоев, обоснована целесообразность замены энергоемкой футеровки свода на ВЭ с объемной структурой [3] с целью минимизировать потери теплоты за счет использования теплоаккумулирующих и теплоизолирующих характеристик гарнисажа.

Проблема повышенных потерь теплоты излучением усугубляется традиционными представлениями технологов о необходимости мелкой и плоской сталеплавильной ванны для рафинирования стали в ДСП. Современные средства донной продувки стали инертным газом позволяют компенсировать снижение межфазной поверхности металл-шлак более

интенсивным перемешиванием реагирующих фаз. Поэтому, целесообразным представляется, при данной массе плавки, увеличение глубины ванны, что позволит уменьшить ее диаметр, мощность излучения и потери теплоты в ВЭ [4].

Недостатком традиционной для малотоннажных ДСП портальной системы аспирации является неэффективность локализации неорганизованных выбросов пылегазовой среды в электродные зазоры и существенный приток воздуха в печь. Следствием является повышенный угар шихты (до 20–22 кг/т) и электродов, экологические проблемы, усиливающиеся при износе кирпичного свода в зоне распада электродов [5].

Рассмотренные методы повышения энергоэффективности и экологической безопасности исследованы для условий 12–20-т ДСП, и требуют уточнения для печей литейного класса вместимостью 3–6 т в силу масштабного фактора.

Цель, задачи и методика исследований. Целью работы является повышение энергоэффективности, экономичности и экологичности малотоннажных (3–6 т) ДСП литейного класса. Задача состоит в исследовании тепловой работы и движения пылегазовой среды в рабочем пространстве ДСП. Методика исследований заключается в численном моделировании задачи при варьировании относительной площади ВЭ, геометрии ванны и системы аспирации.

Материал исследований. Исследования выполнены применительно к ДСП переменного тока вместимостью 3 т и мощностью трансформатора 1,8 МВА. Схема, отражающая теплообмен и газодинамику в рабочем пространстве ДСП, а также предлагаемые решения по повышению энергоэффективности и экологичности приведены на рис. 1. Рассмотрены два случая тепловой работы печи при простоях: при наличии скрапа в рабочем пространстве на следующую плавку (100 % завалки с учетом расходного коэффициента) и при отсутствии скрапа в печи (из-за неопределенности выплавляемой после простоя марки стали). Для каждого из случаев предусмотрены варианты: без ВЭ (базовый) и с ВЭ. Рассматривали как традиционные ВЭ с плотной структурой труб, так и энергосберегающие ВЭ с объемной структурой и развитой гарнисажной футеровкой [3]. Относительная площадь ВЭ стен, исходя из безопасности эксплуатации печи при технологических наклонах, принята 0,4. Относительная площадь ВЭ свода β варьируется от 0 до 1. Для энергосберегающих ВЭ дополнительно оценивали влияние геометрии ванны: исходная и «глубокая» (при данной массе плавки) на потери теплоты излучением. Параметры «глубокой» ванны (D_1, H_1) относительно исходной ванны (D, H) определяли исходя из положений [4]: рост относительного излучения поверхности электродов и ограничения, связанные с размещением загружаемой шихты.

Изменение энтальпии футеровки во время простоя печи продолжительностью $\tau_{пр}$ описывается в одномерной постановке следующим уравнением:

$$dQ / d\tau_{пр} = P_{10} + P_{12} + P_{13}, \quad (1)$$

где P_{10}, P_{12}, P_{13} – мощность потерь энергии внешней поверхностью печи в окружающую среду и внутренней поверхностью футеровки на ВЭ и скрап соответственно (см. рис. 1).

Параметр P_{10} включает радиационную и конвективную составляющие, рассмотренные в [3], с учетом эмпирической зависимости коэффициента теплоотдачи конвекцией от времени простоя, полученной обработкой экспериментальных данных [2]. Скрап, нагреваясь, передает часть теплоты P_{32} ВЭ, что отражается на процессе, описываемом (1), через текущую температуру скрапа. При оценке параметров теплообмена P_{12}, P_{13}, P_{32} в условиях инженерного расчета, учитывали только радиационную составляющую.

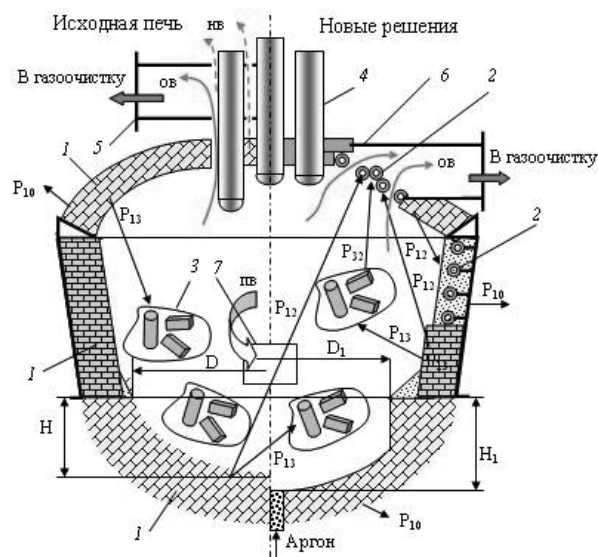


Рис. 1. Схема теплообмена и аспирации в рабочем пространстве малотоннажной ДСП: 1 – огнеупорная футеровка; 2 – сводовые и стеновые ВЭ с объемной структурой; 3 – шихта; 4 – электроды; 5 – портальная камера; 6 – система рассредоточенной аспирации; 7 – рабочее окно; ов, нв, пв – организованные, неорганизованные выбросы пылегазовой среды и приток воздуха в печь, соответственно

Решением (1), выполненным численно с шагом 0,1 час в пакете Mathcad-V14, получены значения затрат энергии на аккумуляцию теплоты ограждением рабочего пространства (футеровка, ВЭ) в зависимости от β и $\tau_{пр}$. Они были использованы для оценки энергоэффективности модернизации ДСП, которая состояла в сравнении удельных затрат электроэнергии для исходной печи с огнеупорной футеровкой и вариантов установки ВЭ. Ввиду сопоставительного характера расчета, в энергобалансе ДСП ряд расходных (потери теплоты с пылегазовой средой, через футеровку на плавке, электрические потери), а также приходных составляющих (теплота экзотермических реакций) приняты для рассмотренных вариантов одинаковыми, и их оценка выполнена согласно [6]. В расчете теоретического расхода энергии на процессы нагрева, плавления металлошихты и перегрева ванны до температуры выпуска стали, шлакообразования и легирования учитывали остаточную энтальпию скрапа.

Потери теплоты с водой определены с учетом конструктивных решений ВЭ: традиционных (с плотной структурой труб) и энергосберегающих [3] по методике [4]. Рассматривается период работы с жидкой ванной, как наиболее теплонапряженный. Результирующий тепловой поток на ВЭ является функцией взаимного излучения ванны, поверхности электродов, пылегазовой среды и собственного излучения поверхности ВЭ в рабочем пространстве ДСП и учитывается приведенным коэффициентом излучения [7]. Излучение дуг, экранированных электродами и шлаком, учитывается косвенно через температуру поверхности ванны. Мощность теплового потока с поверхности излучения $P_{изл}$ на единицу принимающей поверхности определяется законом Стефана-Больцмана:

$$P_{изл} = \sigma \cdot \varepsilon^* \cdot (T_1^4 - T_2^4) \iint_S \left[(\cos\theta \cdot \cos\gamma) / r^2 \right] \cdot dS. \quad (2)$$

Мощность потерь энергии излучения $P_{пот}$ принимающей поверхностью ВЭ S_1 составляет:

$$P_{пот} = k \cdot \int_{S_1} P_{изл} \cdot dS_1, \quad (3)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; T_1, T_2 – температура излучающей (S) и принимающей (S_1) энергию поверхностей; ε^* – приведенный коэффициент излучения; r – радиус-вектор в направлении от излучающей поверхности к принимающей; θ, γ – направляющие углы; k – коэффициент усреднения результирующего теплового потока на ВЭ. Подинтегральное выражение в (2) представляет собой коэффициент взаимной облученности поверхностей теплообмена.

Параметр k для ВЭ с плотной структурой труб принят равным 1. Для ВЭ с объемной структурой и развитой гарнисажной поверхностью величину k оценивали на основании распределения теплового потока потерь $q_{пот}$ на характерном участке теплопринимающей поверхности ВЭ (межтрубный интервал x), полученного решением стационарной задачи тепло-

обмена в пакете прикладных программ ELCUT 6.2. Результаты расчета, выполненного в соответствии с методикой и граничными условиями [3], приведены на рис. 2. Для стеновых ВЭ с разреженной структурой труб и для сводовых ВЭ со смещенными осями труб величина k равна 0,59 и 0,63, соответственно.

Вариант «глубокой» ванны может быть реализован без существенных конструктивных изменений рабочего пространства печи путем уменьшения диаметра излучающей поверхности расплава с $D = 2,1$ до $D_1 = 1,8$ м (см. рис. 1). При этом глубина ванны H_1 относительно исходной H увеличивается, согласно уравнению объема цилиндро-сферического тела, с 0,17 до 0,22 м.

Расчетные удельные потери энергии с водой $Q_{пот}$, полученные численным решением (2) и (3) в пакете прикладных программ Mathcad-V14, при допущении, что потери теплоты излучением имеют место в условный период работы с жидкой ванной длительностью 1,2 часа, приведены на рис. 3.

При использовании энергосберегающих ВЭ с объемной структурой, потери теплоты с водой снижаются на 37–39 %, в сравнении с ВЭ с плотной структурой труб. «Глубокая» ванна позволяет дополнительно уменьшить потери на 13–18 %, а с увеличением β от 0,16 до 1, эффект снижения излучающей поверхности расплава на тепловые потери возрастает в 1,5 раза.

Конструктивное исполнение комбинированного свода малотоннажной ДСП представлено на рис. 4. В нем использованы ВЭ в центральной, наиболее теплонапряженной и изнашиваемой части, и огнеупоры в периферийной зоне. Центральная часть свода 1 опирается на кольцо 2 посредством нескольких трубчатых водоохлаждаемых спиц 3 и газоотводящего патрубка системы рассредоточенной аспирации 4. При этом футеровка периферийной части разбивается на несколько областей 5. В центральной части свода в местах прохода электродов установлены огнеупорные наливные вставки-экономайзеры 6, которые обеспечивают электроизоляцию и, в определенной мере, газоплотность рабочего пространства, что спо-

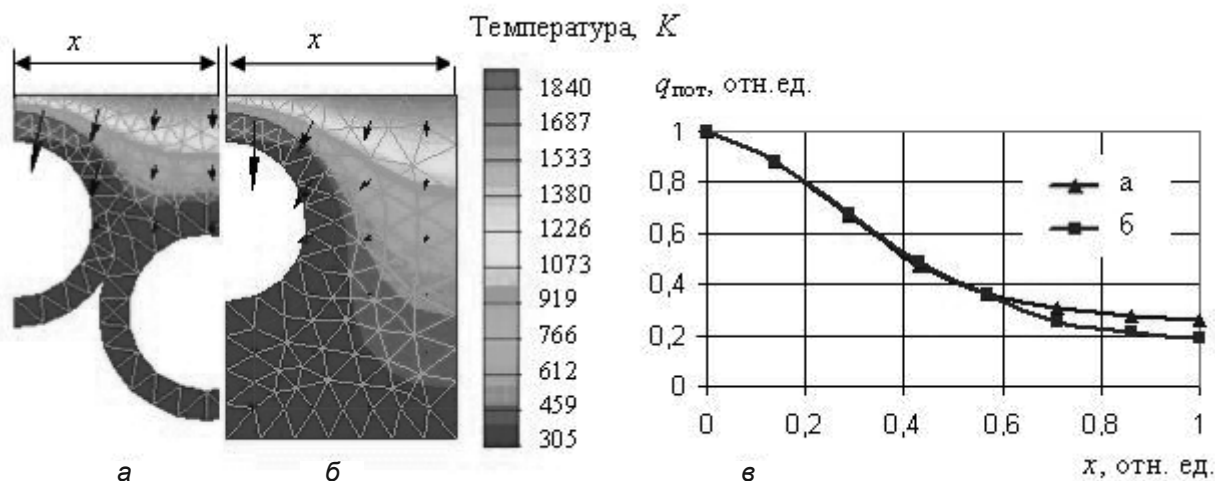


Рис. 2. Температурное поле сводовых (а) и стеновых (б) ВЭ с объемной структурой и оценка средней величины результирующего теплового потока потерь с водой (в). Стрелками показано направление и величина теплового потока

сопутствует снижению неорганизованных пылегазовых выбросов и угара графитированных электродов.

В пакете прикладных программ Excel получены следующие эмпирические уравнения удельных потерь теплоты с водой для традиционных ВЭ с плотной структурой ($Q_{потI}$), ВЭ с объемной структурой ($Q_{потII}$) и ВЭ с объемной структурой и «глубокой» ванной ($Q_{потIII}$) от относительной поверхности охлаждения свода β , кВтч/т:

$$Q_{потI} = 138,80 \ln(\beta \cdot 100) - 204,68; \quad (4)$$

$$Q_{потII} = 87,98 \ln(\beta \cdot 100) - 134,30; \quad (5)$$

$$Q_{потIII} = 68,36 \ln(\beta \cdot 100) - 92,66. \quad (6)$$

Характеристикой энергоэффективности предложенных решений по модернизации ДСП малой вместимости литейного класса является отношение у расчетного удельного расхода электроэнергии в модернизированной печи к данному параметру в базовом варианте (печь с огнеупорной футеровкой). На основе совместного решения (1) с учетом входящих параметров и (4–6), получены зависимости ψ от $\tau_{пр}$ и от β , приведенные на рис. 5, для случаев простоя ДСП с предварительно загруженным скрапом и без него.

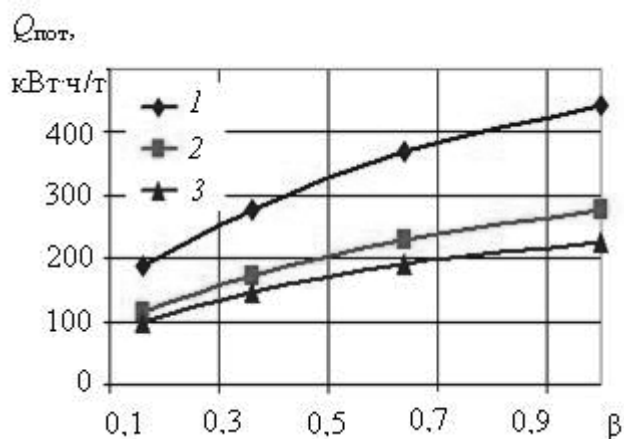


Рис. 3. Зависимость удельных потерь теплоты с водой $Q_{пот}$ от относительной поверхности охлаждения свода β : 1 – ВЭ с плотной структурой; 2 – ВЭ с объемной структурой; 3 – ВЭ с объемной структурой + «глубокая» ванна

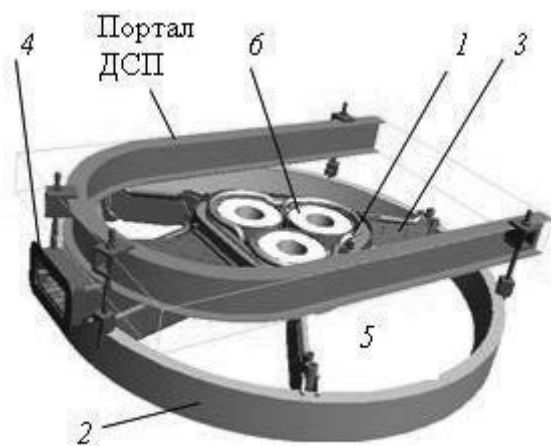


Рис. 4. Комбинированный свод малотоннажной ДСП. Обозначения – в тексте

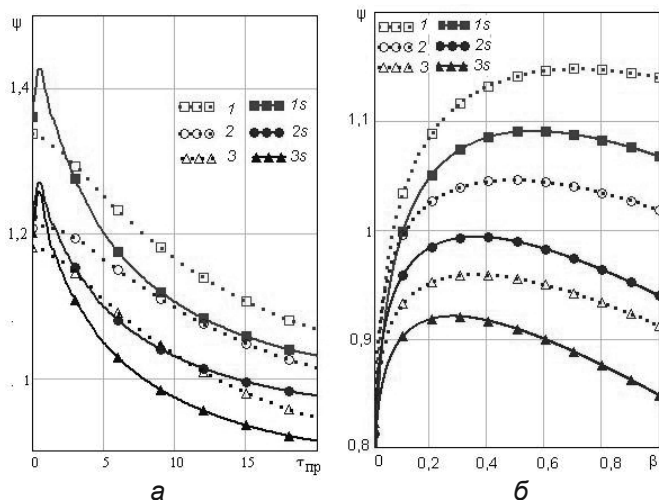


Рис. 5. Зависимость энергоэффективности ДСП ψ от продолжительности простоев печи $\tau_{пр}$, час при $\beta = 0,16$ (а) и от относительной водоохлаждаемой поверхности свода β , при $\tau_{пр} = 20$ час (б): 1 – ВЭ с плотной структурой труб; 2 – ВЭ с объемной структурой; 3 – ВЭ с объемной структурой + «глубокая» ванна. Индекс «s» у кривых означает скрап, загруженный в ДСП в период простоя

Согласно данным численного моделирования, при длительности простоев 3-т ДСП 18–20 часов и более создаются условия для энергоэффективной замены части огнеупорной футеровки ВЭ с пространственной структурой: 40 % стен и до 20 % свода.

Предварительная загрузка скрапа и использование «глубокой» ванны повышает возможности рассмотренных решений как в сторону уменьшения пороговой для модернизации ДСП продолжительности простоев, так и увеличения относительной площади водоохлаждения.

Комбинированный свод позволяет при малых потерях электроэнергии, которые на практике за длительный период работы печи нивелируются другими эксплуатационными параметрами, сократить удельный расход огнеупоров за счет их замены ВЭ в центральной части, обычно лимитирующей стойкость свода в целом. При этом повышается стойкость периферийной части и технико-экономические показатели печи без заметного негативного влияния на шлаковый режим и продолжительность плавки (табл. 1) [8].

Таблица 1
Технико-экономические показатели комбинированного свода 3-т ДСП

Тип свода	Стойкость свода, относительных единиц		Экономия, кг/т стали	
	динасовый	магнезитовый	огнеупоров	электродов
Традиционный кирпичный	1	1	–	–
Комбинированный	1,4	2,0–2,5	6,5–11	1,2–1,5

Дальнейшим развитием работы представляется оснащение ДСП эффективной системой аспирации на базе комбинированного водоохлаждаемого свода.

Взамен традиционной порталной аспирационной камеры предлагается система рассредоточенной аспирации (см. рис. 1). В ней реализованы принципы приближения аспирационной поверхности к области электродных кольцевых зазоров и ее рассредоточения между центром и периферией подсводового пространства ДСП. С этой целью в центральной части свода предусмотрена невысокая верхняя камера с горизонтальным газоотводящим водоохлаждаемым патрубком, снабженным газораспределительной решеткой. Данное техническое решение направлено на снижение неорганизованных выбросов пылегазовой среды (ПГС), сокращение расхода электродов и сводового кирпича (по месту установки газоотводящего патрубка).

Для исследования газодинамики при аспирации ПГС в рабочем пространстве ДСП использовали пакет прикладных программ CosmosFloWorks. Предварительный анализ показал, что течение среды в исследуемом объекте является турбулентным. Расчет выполняли численно на основе уравнений Навье-Стокса (7) и неразрывности (8) с использованием $k-\varepsilon$ модели турбулентности:

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial \tau} + (\nabla \vec{w}) \cdot \vec{w} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p + \eta \cdot \nabla^2 \vec{w} + F; \quad (7)$$

$$\text{div} \vec{w} = 0, \quad (8)$$

где ρ – плотность, w – скорость, p – давление, τ – время, F – объемная плотность сил, η – динамическая вязкость среды.

Расчет заключается в определении поля скоростей, давлений и температур газового потока в печи при следующих допущениях, принятых в модели, и граничных условиях [5]:

- в качестве рабочей газовой смеси рассматривается воздух;
- теплообмен газа с элементами рабочего пространства отсутствует;
- в выходном сечении газоотводящего патрубка разрежение 15 Па, температура отходящих газов средняя 1000 К;
- в сечении рабочего окна нормальные условия: атмосферное давление и температура газа 293 К;
- на поверхности условной камеры над печью: атмосферное давление и температура газа 293 К;
- на условной поверхности дна «колодца» интенсивность газообразования 2 м³/с при температуре газа 1850 К и атмосферном давлении;
- ширина электродных зазоров 30 мм;
- на других поверхностях – реальная стенка с шероховатостью 1 мм.

На полученные результаты расчета поля скоростей накладывали поток частиц плавильной пыли, генерируемый источником ПГС в нижнем сечении условного проплавленного электродами «колодца». Принятые в численной модели параметры пылевыделения: интенсивность – 0,042 кг/с, средний размер частиц – 20 мкм, плотность – 3г/см³ соответствуют литературным данным по запыленности отходящих газов ДСП [9]. Число условных частиц пыли в зоне

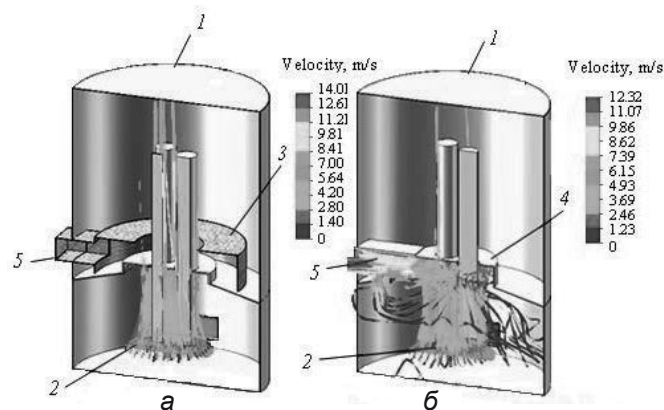


Рис. 6. Результаты численного моделирования традиционной системы аспирации малотоннажных ДСП (а) и системы рассредоточенной аспирации (б): 1 – условная камера над сводом; 2 – условная поверхность, генерирующая потоки газовой среды и частиц пыли; 3 – порталная камера; 4 – сводовая камера; 5 – газоотводящий патрубок

образования принято 100 единиц. Скорость и температура частиц пыли в численной модели «привязаны» к расчетным параметрам газового потока.

Результаты численного моделирования в виде поля скоростей и траекторий движения частиц плавильной пыли для традиционной аспирационной системы малотоннажных ДСП – порталной камеры и системы рассредоточенной аспирации, показаны на рис. 6, а и б, соответственно.

Интегральные значения параметров, характеризующих качество работы аспирационной системы, полученные в результате решения задачи, приведены в табл. 2.

Результаты моделирования показывают низкую эффективность порталной камеры при улавливании неорганизованных выбросов через электродные зазоры, которые составляют 37 % общего количества ПГС. Неудовлетворительной представляется ситуация с выбросами плавильной пыли из печи, которые достигают 42 % от ее общего количества, образующегося при плавлении шихты. Вместе с тем, порталная камера обеспечивает сравнительно небольшой приток воздуха в рабочее окно, что связано с

Таблица 2

Расчетные показатели эффективности систем аспирации 3-т ДСП

Вариант на рис. 6	Доля неорганизованных выбросов в общем объеме ПГС, %	Доля притока воздуха в общем объеме ПГС, %	Доля частиц пыли, выносимых из печи, %		
			в электродные зазоры	в газоотводящий патрубок	всего
а	37,2	18,2	42	0	42
б	18,4	16,3	2	32	34

повышенным гидравлическим сопротивлением движению печных газов. Линии тока газовой среды и траектории условных частиц пыли (рис. 6, а) подтверждают вышесказанное.

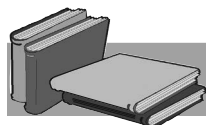
Применение системы рассредоточенной аспирации, в сравнении с традиционной порталной камерой, приводит к снижению неорганизованных выбросов в 2 раза, притока воздуха в печь – на 11 % и выноса плавильной пыли из печи – на 20 %

Выводы

Технические решения по модернизации малотоннажных ДСП на основе использования энергосберегающих водоохлаждаемых элементов с объемной структурой, совершенствования геометрии стале-плавильной ванны и системы аспирации пылегазо-выделений имеют перспективы в литейных цехах. При длительности простоев печи 18–20 часов и более, замена 40 % футеровки стен и до 20 % футе-

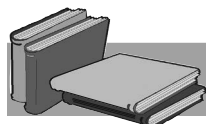
ровки свода водоохлаждаемыми элементами с объемной структурой обеспечивает паритет с исходной печью по расходу электроэнергии при существенной экономии огнеупоров. Уменьшение диаметра ванны с 2,1 до 1,8 м и увеличение ее глубины при данной вместимости печи дополнительно снижает потери теплоты с водой на 13–18 %. Применение системы рассредоточенной аспирации на основе комбинированного свода позволяет уменьшить пылегазовые выбросы в электродные зазоры в 2 раза, приток воздуха в печь – на 11 % и эмиссию плавильной пыли – на 20 % в сравнении с порталной аспирационной камерой.

Реализация предложенных решений уже осуществляется путем внедрения комбинированного водоохлаждаемого свода на 3-т ДСП [8]. Основным эффектом заключается в снижении удельного расхода огнеупоров на 6,5–11 и графитированных электродов на 1,2–1,5 кг/т соответственно.



ЛИТЕРАТУРА

1. Biswas S., Peaslee K., Lekakh S. Melting Energy Efficiency in Steel Foundries // AFS Transactions 2012 © American Foundry Society, Schaumburg, IL USA, P. 449–456. URL: <http://www.afsinc.org/files/12-040.pdf> (Last accessed 07.03.2018).
2. Mironov Yu. M., Petrov V. G. Thermal losses and power efficiency of arc steelmaking furnaces // Metally (Russian Metallurgy). – 2010. – № 12. – P. 1141–1144.
3. Тимошенко С. Н., Филиппи А. А., Онищенко С. П., Тищенко П. И. Энергоэффективные решения при модернизации дуговых печей постоянного тока литейного класса // Металл и литье Украины. – 2017. – № 8–10. – С. 12–19.
4. Timoshenko S. N. Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. Выпуск 3 (104). – Днепр, 2016. – С. 33–39.
5. Тимошенко С. Н., Тищенко П. И., Тимошенко Н. С., Семко А. Н. Моделирование системы аспирации электродуговой печи с целью повышения энергоэффективности и экологической безопасности // Экология и промышленность. – Харьков: «УкрНТЦ «Энергосталь». – 2013. – № 2 (35). – С. 66–69.
6. Toulouevski Yu. N., Zinurov I. Y. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection // Berlin: Springer, 2010. – 258 p.
7. Howell J., Pinar Menguc M., Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer, 5th Edition // CRC press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2011. – 987 p.
8. Дорошенко А. В., Дядьков Б. П., Тимошенко С. Н., Тищенко П. И. Комбинированный водоохлаждаемый свод дуговых электропечей малой вместимости // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2017. – № 5. – С. 91–95.
9. Guézennec A. G., Huber J. C., Patisson F., Sessiecq Ph., Birat J. P., Ablitzer D. Dust Formation by Bubble-burst Phenomenon at the Surface of a Liquid Steel Bath // ISIJ International. – 2004. – vol. 44. – № 8. – P. 1328–1333.



REFERENCES

1. Biswas, S., Peaslee, K., Lekakh, S. (2012). *Melting Energy Efficiency in Steel Foundries*. AFS Transactions 2012 © American Foundry Society, Schaumburg, IL USA, pp. 449–456. URL: <http://www.afsinc.org/files/12-040.pdf> (Last accessed 07.03.2018). [in English].
2. Mironov, Yu.M., Petrov, V.G. (2010). *Thermal losses and power efficiency of arc steelmaking furnaces*. Metally (Russian Metallurgy), no. 12, pp. 1141–1144 [in English].
3. Timoshenko, S.N., Filippi, A.A., Onishchenko, S.P., Tishchenko, P.I. (2017). Energoeffektivnye resheniia pri modernizatsii dugovykh pechei postoiannogo toka liteinogo klassa [Energy efficient solutions for modernization of foundry class DC EAF]. Metall i lit'o Ukrainy, no. 8–10, pp. 12–19 [in Russian].
4. Timoshenko, S.N. (2016). *Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace*. Sistemnye tekhnologii. Regional'nyi mezhvuzovskii sbornik nauchnykh rabot. Dnepr, Issue 3 (104), pp. 33–39 [in English].
5. Timoshenko, S.N., Tishchenko, P.I., Timoshenko, N.S., Semko, A.N. (2013). Modelirovanie sistemy aspiratsii elektrodugovoi pechi s tsel'iu povysheniia energoeffektivnosti i ekologicheskoi bezopasnosti [Simulation of the electric arc furnace system aspiration to improve the energy efficiency and environmental safety]. Khar'kov: UkrNTC "Energestal", №. 2 (35). – pp. 66–69 [in Russian].

6. Toulouevski, Yu.N., Zinurov, I.Y. (2010). *Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection*. Berlin: Springer, 258 p. [in English].
7. Howell, J., Pinar Menguc, M., Siegel, R. (2011). *Thermal Radiation Heat Transfer, 5th Edition*. CRC press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 987 p. [in English].
8. Doroshenko, A.V., Diad'kov, B.P., Timoshenko, S.N., Tichshenko, P.I. (2017). Kombinirovanniy vodookhlazhdayemyi svod dugovykh elektropечи maloi vmestimosti [*Combined water-cooled roof of electric arc furnaces of small capacity*]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, no. 5, pp. 91–95 [in Russian].
9. Guézennec, A.G., Huber, J.C., Patisson, F., Sessieq, Ph., Birat, J.P., Ablitzer, D. (2004). *Dust Formation by Bubble-burst Phenomenon at the Surface of a Liquid Steel Bath*. *ISIJ International*, vol. 44, no. 8, pp. 1328–1333 [in English].

Анотація

С. М. Тимошенко¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., докторант, e-mail: stimoshenko155@gmail.com; **О. В. Дорошенко**², нач. лабораторії; **Б. П. Дядьков**², пров. інженер-технолог; **П. І. Тищенко**², канд. техн. наук, гол. спеціаліст; **С. П. Онищенко**³, директор

¹Донецький національний технічний університет, Покровськ

²ПАТ «Сумське НВО», Суми

³ПП «Фірма РОУД», Київ

Енергоефективні рішення при модернізації малотонажних дугових сталеплавильних печей ливарного класу

Чисельне моделювання теплообміну та газодинаміки в дуговій сталеплавильній печі (ДСП) ливарного класу місткістю 3 т показало, що при тривалості простоїв печі 18–20 годин і більше, заміна 40 % футеровки стін і 16–20 % зводу водоохолоджуваними елементами з об'ємною структурою забезпечує паритет з вихідною піччю по витраті електроенергії при істотній економії вогнетривів. Зменшення діаметра ванни з 2,1 до 1,8 м і збільшення її глибини при даній місткості печі знижує втрати теплоти випромінюванням на 13–18 %. Застосування системи розосередженої аспірації зменшує пилогазові викиди в електродні зазори в 2 рази, приплив повітря в піч – на 11 % та емісію плавильного пилу – на 20 % в порівнянні з портальною аспіраційною камерою. Практикою експлуатації 3-т ДСП з комбінованим зводом підтверджено зниження витрати вогнетривів на 6,5–11 і графітованих електродів на 1,2–1,5 кг/т, відповідно.

Ключові слова

Дугова сталеплавильна піч ливарного класу, енергоефективність, водоохолоджувані елементи з об'ємною структурою, «глибока» ванна, система розосередженої аспірації.

Summary

S. N. Timoshenko¹, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Doctoral, e-mail: stimoshenko155@gmail.com; **A. V. Doroshenko**², Head of Laboratory; **B. P. Diad'kov**², Leading Engineer-Technologist; **P. I. Tishchenko**², Candidate of Engineering Sciences, Chief Specialist; **S. P. Onishchenko**³, Director

¹Donetsk National Technical University, Pokrovsk

²PJSC "Sumy Research and Production Association", Sumy

³PE "ROUD Company", Kyiv

Energy-efficient solutions for modernization of small-capacity electric arc furnaces of a foundry class

Numerical modeling of heat transfer and gas dynamics in an electric arc furnace (EAF) of a foundry class with a capacity of 3 tons has shown that with a furnace downtime of 18–20 hours and more, replacing 40 % of the wall lining and 16–20 % of the roof lining by water-cooled elements with a volume structure provides parity with the original furnace on the consumption

of electricity with a significant saving of refractories. Reducing the diameter of the bath from 2.1 to 1.8 m and increasing its depth with a given capacity of the furnace reduces heat loss with radiation by 13–18 %. The use of a dispersed aspiration system reduces dust and gas emissions into electrode clearances by 2 times, air inflow into the furnace – by 11 %, and emission of melting dust – by 20 % in comparison with the portal aspiration chamber. The practice of operating 3 tons EAF with a combined roof confirmed a decrease in the consumption of refractories by 6.5–11 and graphite electrodes by 1.2–1.5 kg/ton, respectively.

Keywords

Foundry class EAF, energy efficiency, water-cooled elements with volume structure, “deep” bath, dispersed aspiration system.

Поступила 02.04.18