

В. Ф. Шумаков, А. И. Малахов,
А. В. Буряк, В. В. Голик, М. П. Анацкий
С. Н. Тимошенко /к. т. н./
П. И. Тищенко /к. т. н./

ПАО «НКМЗ», г. Краматорск, Украина
ДонНТУ, г. Покровск, Украина
ЧП «Фирма РОУД»

Дуговая печь малой вместимости для литейных цехов и региональных микро-заводов

V. F. Shymakov, A. I. Malakhov,
A. V. Byrjak, V. V. Golik, M. P. Anatskiy
S. N. Timoshenko /Cand. Sci. (Tech.)/
P. I. Tischenko /Cand. Sci. (Tech.)/

PJSC «NKMZ», Kramatorsk, Ukraine
DonNTU, Pokrovsk, Ukraine
PE «Company ROUD»

Arc furnace of small capacity for foundries and regional micro-mills

Цель. Разработка энергоэффективных решений современной дуговой сталеплавильной печи (ДСП) малой вместимости.

Методика. Математическое моделирование, численный эксперимент, промышленный эксперимент.

Результаты. На основе инновационных решений разработана и внедрена ДСП вместимостью 15 т, которая может быть использована в качестве плавильного агрегата с интенсивной двухстадийной технологией как на микро-заводе, так и в литейных цехах с классической технологией.

Научная новизна. Установлены рациональные геометрические параметры рабочего пространства печи и системы аспирации пылегазовых выбросов, которые при данном энерготехнологическом режиме 15-т ДСП позволяют минимизировать потери теплоты с водой и с пылегазовой средой.

Практическая значимость. Оптимизация глубины ванны и диаметра распада электродов в сочетании с продувкой сталеплавильной ванны инертным газом, применение модульной системы базовых узлов, энергосберегающих водоохлаждаемых панелей и системы рассредоточенной аспирации обеспечивают универсальность агрегата и позволяют снизить энергопотребление ДСП на 3–5 % и неорганизованные пылегазовые выбросы на 20–50 %. (Ил. 5. Библиогр.: 9 назв.)

Ключевые слова: дуговая печь, энергоэффективность, оптимизация геометрии рабочего пространства, система рассредоточенной аспирации.

Постановка проблемы. В последнее десятилетие наметилась тенденция строительства микро-металлургических заводов, ориентированных на сравнительно небольшие (до 100–200 тыс. т в год) региональные потребности в стали определенных марок и профилей [1]. Компания «Siemens VAI Metals Technologies» (Германия – Австрия) создала серию ДСП «Simetal EAF Micro» вместимостью от 5 до 35 т для литейных цехов и микро-заводов. Фирма «Danieli» (Италия) разработала концепцию малых ДСП «NANO EAF™» вместимостью от 5–8 до 35 т с трансформатором мощностью до 30 МВА. Китайская компания «Wuxi Bolong Mashinery Co., Ltd» предлагает свою серию ДСП малой вместимости от 1,5 до 20 т.

Общими тенденциями технических решений малых ДСП нового поколения являются:

– модульная система базовых узлов печи, что обеспечивает быструю компоновку агрега-

та нужной вместимости и технологической направленности;

– широкое применение водоохлаждаемых элементов корпуса и свода;

– интенсификация процесса выплавки стали путем использования теплоты экзотермических реакций в ванне при ее продувке кислородом с инъекцией в ванну углеродсодержащего порошка и путем принудительного перемешивания продуктами окисления углерода;

– отказ от топливно-кислородных горелок для равномерного нагрева шихты в относительно небольшом объеме рабочего пространства;

– применение вспененного шлака в жидкий период плавки для снижения потерь тепла излучения электрической дуги.

Наиболее распространенной конфигурацией плавильного агрегата является ДСП переменного тока средней вместимостью 15 т, электрической мощностью 10–13 МВт, с внутренним

диаметром корпуса 3,5–3,8 м. В зависимости от технологии: классическая – с получением готовой стали, или интенсивная двухстадийная – применяется как носковый (со шлаком), так и эркерный (без шлака) выпуск стали в ковш.

Для 15–20-т ДСП фирмы «Danieli» при работе на скрапе характерны следующие показатели: продолжительность выплавки полупродукта – 50–55 мин при удельных расходах электроэнергии, электродов, углерода (в завалку и инъекцией в ванну) и кислорода 500 кВт·ч/т, 3,2 кг/т, 15–16 кг/т и 17–18 м³/т соответственно. Анализ приведенных в рекламных материалах данных показывает, что указанный расход электроэнергии, по-видимому, занижен, и с учетом альтернативной энергии ее фактический расход при ожидаемом тепловом КПД печи должен быть не менее 550–580 кВт·ч/т.

Энергоэффективность ДСП определяется основными статьями потерь теплоты: с охлаждающей водой в водоохлаждаемых панелях и с отходящими из печи запыленными газами, которые составляют более 90 % всех потерь энергии в печи [2]. Это более характерно для ДСП малой вместимости, в которых удельные потери энергии с водой выше, чем в крупных печах, а эффективность традиционных средств газоудаления (портальная камера) весьма низкая. Применение систем охлаждения и аспирации, типичных для крупных высокопроизводительных ДСП, приводит к росту потерь энергии и расходного коэффициента шихтовых материалов.

В Украине за последние 15 лет построено четыре мини-завода, оборудованных импортными ДСП. Появился и первый отечественный прототип современной ДСП вместимостью 50 т, созданный на ПАО «НКМЗ», г. Краматорск. Хотя доля электростали в нашей стране не превышает 5 % с возможным ростом до 10–15 %, перспективными представляются энергоэффективные и экологичные микро-заводы на основе ДСП. В качестве шихты для них может быть использован не только скрап, но и металлургические материалы, в том числе полученные из накопленных и воспроизводимых техногенных отходов металлургического производства.

Цель. Работа направлена на создание отечественной ДСП малой вместимости с применением инновационных решений, обеспечивающих конкурентоспособность по показателям энергоэффективности и экологической безопасности. Задача решается путем комплексного анализа процессов тепло- и массообмена, гидродинамики и газодинамики в рабочем пространстве ДСП и поиска решений, направленных на снижение потерь энергии с водой и пылегазовой средой,

включая неорганизованные выбросы и приток воздуха в печь.

Основной материал. На ПАО «НКМЗ» разработана и внедрена в условиях собственного производства ДСП номинальной вместимостью 15 т. Печь является универсальным электросталеплавильным агрегатом, предназначенным для использования как в литейном производстве с выплавкой стали по классической технологии, так и на перспективных микро-заводах с применением интенсивной технологии. Общий вид печи приведен на рис. 1.

Основные концептуальные решения, реализованные в новой ДСП, заключаются в следующем:

- использован выкатной корпус с электромеханическим приводом, позволяющий снизить металлоемкость агрегата за счет исключения гидравлического механизма поворота свода и электрододержателей с электродами и, соответственно, цену агрегата;

- предусмотрена возможность трансформации носкового варианта выпуска стали в ковш в сифонный (и в перспективе эркерный) при использовании печи для работы по интенсивной технологии;

- предусмотрена возможность быстрой замены свода, который в зависимости от технологии выплавки стали может быть водоохлаждаемым или комбинированным;

- предусмотрена возможность регулировки диаметра распада электродов в зависимости от режима работы печи: с продолжительным (клас-

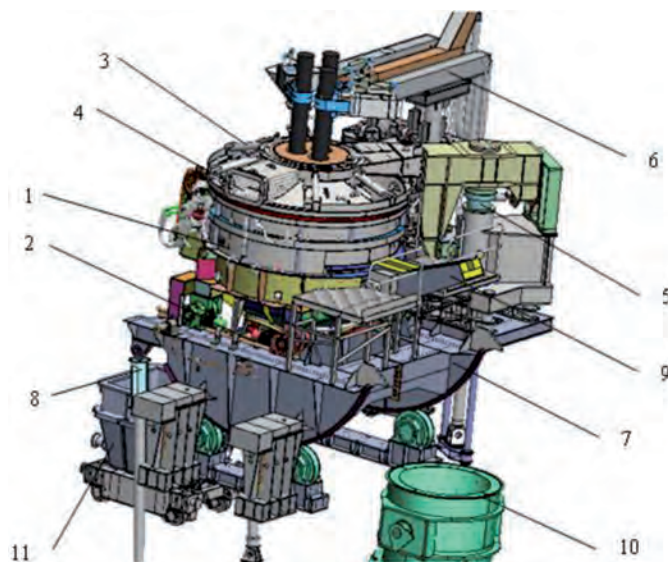


Рис. 1. Общий вид печи:

- 1 – корпус, 2 – привод корпуса, 3 – свод,
- 4 – газоотводящий патрубок, 5 – гидроцилиндр подъема свода, 6 – электрододержатели,
- 7 – наклоняющаяся платформа, 8 – гидроцилиндр наклона печи, 9 – сливной носок, 10 – сталь-ковш,
- 11 – шлаковая чаша

сическая технология) или коротким (интенсивная технология) жидким периодом плавки;

- применены средства интенсификации плавки: оконный манипулятор для продувки кислородом расплава под уровень через расходную трубку, пневмокамерный насос для инъекции углеродсодержащего порошка в ванну, система донной продувки расплава аргоном через пористую пробку;

- предусмотрена возможность подачи вспомогательных материалов (шлакообразующие, ферросплавы) в рабочее пространство печи через отверстие в своде в соответствии с технологическим процессом в программируемом режиме.

Дуговая печь ПАО «НКМЗ» обеспечивает ряд преимуществ перед зарубежными аналогами по энергоэффективности и экологической безопасности, которые достигаются реализацией следующих инновационных решений.

1. Углубленная ванна. Рациональные геометрические параметры ванны определяли на основе минимизации потерь теплоты излучением от ванны к панелям свода и стен. Оценка потерь энергии с водой для 15-т ДСП в зависимости от отношения диаметра к глубине ванны (D_B/H_B) приведена на рис. 2. Экстремум полученной зависимости объясняется тем, что с уменьшением диаметра ванны растет относительная доля излучения поверхности электродов.

Для печей переменного тока с загрузкой шихты бадьями возможности уменьшения D_B/H_B существенно ограничены конструктивными и технологическими соображениями. Тем не менее при уменьшении D_B/H_B с традиционной величины 4,5–5,0 [4] до реализованного значения 3,6 достигается снижение потерь энергии с охлаждающей водой на 18–24 %.

2. Оптимизация диаметра распада электродов. Данный параметр характеризует равномерность тепловыделения в зонах горения электрических дуг. Стадии процесса плавления шихты в ДСП представлены на рис. 3. На первом этапе электроды проплавляют в шихте колодцы при минимальных потерях энергии, вводимой в печь. Диаметр колодца $D_{кол}$, по различным оценкам, составляет от 1,3 до 2 диаметров электрода $d_{эд}$ [2; 5], а продолжительность данного этапа не превышает 1,5–2,5 мин. На втором этапе колодцы расширяются до слияния в один общий колодец (при малом диаметре распада) или до достижения стеновых панелей (при большом диаметре распада). Предполагают [5], что в печах высокой мощности теплота дугового разряда в колодцах не успевает отводиться от шихты теплопроводностью, что приводит к испарению и повышенному угару железа. Второй этап плавления, охватывающий основную массу шихты (50–70 %), менее энергоэффективный, чем первый, ввиду потерь теплоты излучением с поверхности формирующейся жидкой ванны и

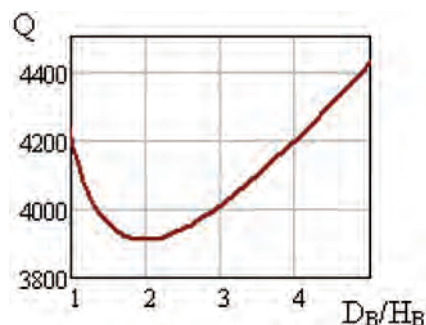


Рис. 2. Зависимость потерь теплоты с водой Q , кВт для 15-т ДСП в жидкий период плавки, выполненная по методике [3]

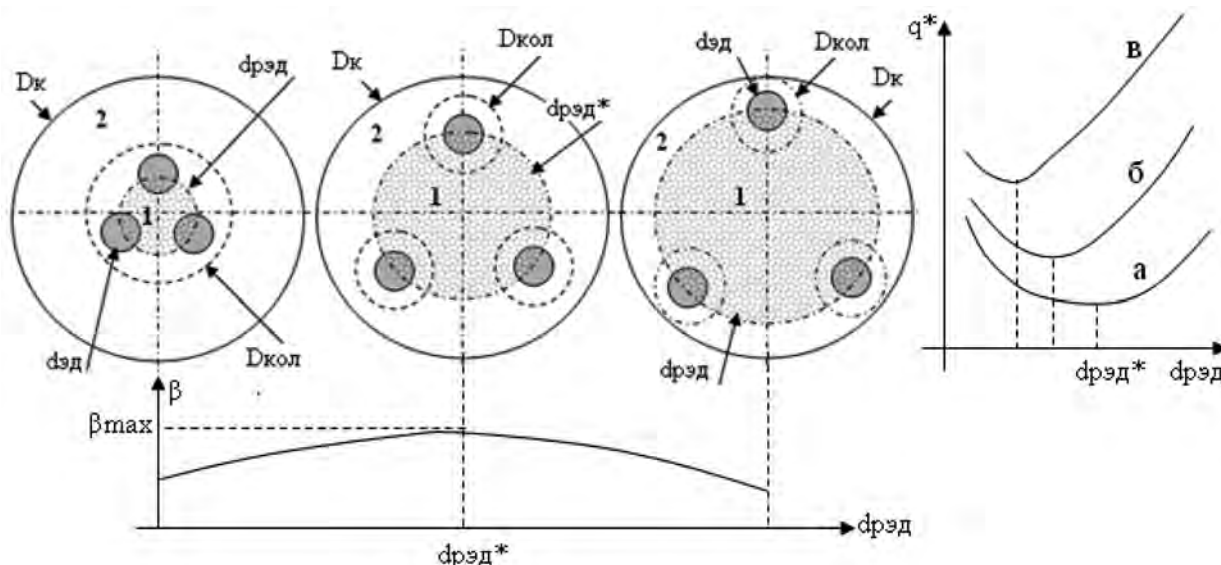


Рис. 3. Схема плавления шихты и оценка влияния диаметра распада электродов на энергоэффективность ДСП (обозначения - в тексте)

поглощаемого в панелях свода. На третьем этапе происходит обвал нерасплавленной шихты в жидкий расплав и ее плавление при конвективном нагреве в ванне, в том числе путем диффузионного растворения, в условиях открыто излучающей ванны. Этот этап характеризуется наибольшими потерями теплоты.

При выборе диаметра распада электродов ДСП продолжает доминировать направление его минимизации [4], что связано с желанием к снижению облученности футеровки стен печи. Это положение сформировано в период использования печей без водоохлаждаемых панелей. В настоящее время, когда конструкция печи включает широкое использование водоохлаждаемых панелей, подход к выбору диаметра распада электродов нуждается в корректировке, как с точки зрения тепловой работы печи, так и ее электрических характеристик. При определенном диаметре распада электродов $d_{ред}^*$ (рис. 3) шихта равномерно нагревается и плавится как на периферии 2, так и центре 1 рабочего пространства, при этом относительная продолжительность β энергоэффективных этапов плавления максимальная. Оптимальное решение по $d_{ред}$ должно учитывать удельные энергозатраты q^* на плавку, а не только за период плавления (кривая а), и оно будет различным для интенсивной (кривая б) и классической (кривая в) технологий, отличающихся относительной длительностью жидкого периода плавки. При необходимости обеспечения обоих технологических режимов требуется определенный компромисс относительно $d_{ред}$.

3. Энергосберегающие водоохлаждаемые панели. Позволяют эффективно использовать теплоизолирующие и теплоаккумулирующие свойства гарнисажа для снижения потерь теплоты с водой. В отличие от традиционной конструкции с плотной укладкой труб (рис. 4а), энергосберегающие панели (рис. 4б) форми-

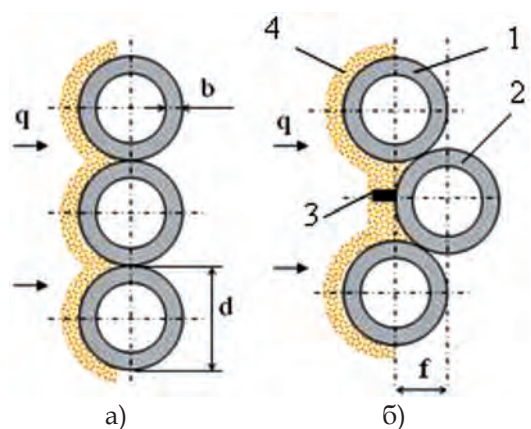
руют пространственную структуру с внутренним 1 и внешним 2 (относительно рабочего пространства печи) рядами труб, оси которых смещены на расчетную величину f . В ней с использованием прикрепленных к трубам ребер 3 формируются ячейки для накопления и поддержания гарнисажа 4 в течение длительного срока эксплуатации панелей. Характеристиками энергоэффективности представленных панелей, в сравнении с традиционными, служат рост накопленной массы гарнисажа на единицу поверхности корпуса печи и снижение теплового потока к воде (рис. 4).

Применение энергосберегающих панелей более эффективно при классической технологии с относительно продолжительным жидким периодом плавки и позволяет уменьшить энергозатраты на 3–5 кВтч/т.

Применение труб меньшего диаметра $d = 60$ мм (рис. 4) с толщиной стенки $b = 6–8$ мм взамен традиционно используемых $d = 73$ и 76 мм, $b = 10–12$ мм позволяет снизить металлоемкость панелей и расход воды на единицу поверхности корпуса печи на 22–25 % и 8–10 % соответственно.

4. Интенсификация процессов тепло- и массообмена в ванне. Обеспечивается продувкой жидкой ванны газами и позволяет решить несколько важных энерготехнологических задач:

- использование альтернативной энергии экзотермических реакций в расплаве в энергобалансе печи, что достигается продувкой ванны кислородом с помощью рассмотренного выше оборудования печи;
- получение в печи вспененного шлака с целью экранирования излучения дуг и повышения энергоэффективности в жидкий период плавки. Данная функция особенно актуальна для варианта интенсивной технологии;
- ускорение процесса плавления фрагментов шихты в жидкой ванне (стадия 3 процесса



Параметр, единица измерения	Вариант панели	
	А	Б
Масса гарнисажа на 1м ² поверхности корпуса печи, отн. единиц	1	1,22
Тепловой поток к воде, на 1м ² поверхности корпуса печи, отн. единиц	1	0,84

Рис. 4. Панели традиционная (а) и энергосберегающая (б) (обозначения – в тексте)

Стрелками показано направление падающего теплового потока q .

плавления) конвективными потоками, возникающими при пневматическом перемешивании расплава;

- экстракционное рафинирование металла от серы, фосфора, неметаллических включений на поверхности шлак-металл и усреднение химического состава и температуры ванны за счет возникающей при пневматическом перемешивании циркуляции. Данная функция наиболее актуальна для варианта классической технологии с получением готовой стали в печи.

Продолжительность усреднения ванны жидкой стали τ_{mix} определяется удельной мощностью перемешивания - работой изотермического расширения газа, совершаемой в единицу времени на тонну стали, и может быть оценена на основании следующей эмпирической зависимости [6].

$$\tau_{mix} = k \cdot [Q_0 \cdot \rho_g \cdot R \cdot T_M \cdot \ln(1 + H_B / 1,48) / (\mu \cdot M)]^{-0,4}, \quad (1)$$

где R - универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль К); ρ_g - плотность газа, кг/м³; μ - молекулярная масса газа, кг/кмоль; M - масса плавки, т; T_M - температура металла, К; Q_0 - интенсивность продувки, м³/с (при н. у.); H_B - глубина ванны, м; 1,48 - гидростатическая высота столба жидкой стали, м, k - эмпирический коэффициент.

Оценка τ_{mix} из (1) показывает, что при уменьшении D_B/H_B с традиционной величины 5,0 до принятой в новой печи 3,6 (с учетом геометрических соотношений для цилиндро-сферического тела) продолжительность усреднения металла уменьшается на 8 % при прочих равных условиях за счет увеличения глубины ванны. Данный фактор, с учетом доли жидкого периода в цикле плавки, позволяет рассчитывать на уменьшение длительности плавки и, соответственно, энергопотребления печи на 2-2,5 % при интенсивной и на 4-5 % при классической технологии.

Теплообмен в системе «жидкая сталеплавильная ванна - фрагменты скрапа» описывается следующим критериальным уравнением [7].

$$Nu = 0,017 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}, \quad (2)$$

где $Nu = \alpha_{кон} \cdot L / \lambda$ - число Нуссельта; $\alpha_{кон}$ - коэффициент теплоотдачи от жидкой ванны к фрагменту скрапа; L - характерный размер ванны, в данном случае глубина ($L=H_B$); λ - коэффициент теплопроводности жидкой стали; $Re = u \cdot L / \nu$ - число Рейнольдса; u - характерная скорость конвективных потоков в жидкой ванне; ν - коэффициент кинематической вязкости жидкой стали; $Pr = \rho \cdot C \cdot \nu / \lambda$ - число Прандтля; ρ - плотность жидкой стали; C - теплоемкость жидкой стали.

В качестве характерной скорости u , определяющей интенсивность конвективного теплообмена «ванна - фрагменты скрапа», принята средняя скорость движения металла в двухфазной газо-металлической зоне, которая формируется над пористой пробкой в виде расширяющейся кверху конической области. Данный параметр определяют из эмпирического соотношения [6].

$$u = 4,5 \cdot Q^{0,33} \cdot H_B^{0,25} / (0,5D_B)^{0,33}. \quad (3)$$

Результаты расчета коэффициента конвективной теплоотдачи в жидкой ванне в зависимости от расхода газа и геометрических параметров ванны D_B/H_B , выполненного по зависимости (2) с учетом (3), приведены на рис. 5.

Согласно приведенным данным, при характерной для 15-т ДСП интенсивности продувки инертным газом 5-10 м³/ч, применение углубленной ванны позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи в 1,4-1,5 раза в сравнении с традиционной ванной за счет более интенсивной циркуляции.

В соответствии с экспериментальными данными [8], продолжительность плавления фрагментов скрапа в жидкой ванне обратно пропорциональна коэффициенту конвективной теплоотдачи. Поэтому углубление ванны ДСП позволяет ускорить процесс плавления скрапа и, соответственно, сократить продолжительность плавки и энергопотребление печи.

Анализ процессов массообмена в системе металл-шлак показывает, что при увеличении глубины ванны снижение площади ее поверхности компенсируется увеличением интенсивности циркуляции расплава и площади барботажного «пятна» - активной поверхности двухфазной области на поверхности контакта металл-шлак.

Таким образом, применение продувки жидкой ванны ДСП аргоном через пористую пробку в днище, в сочетании с углубленной ванной,

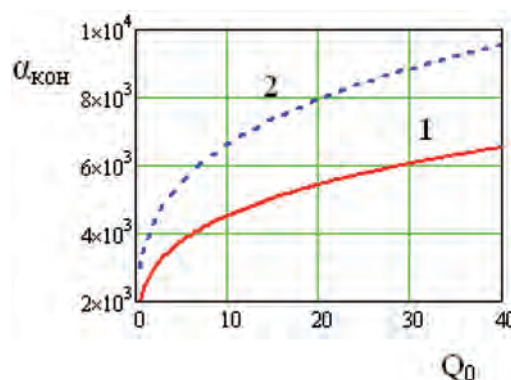


Рис. 5. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи $\alpha_{кон}$, Вт/(м² К) от расхода газа Q_0 , м³/час (при н. у.). 1 - традиционная ванна $D_B/H_B = 5,0$; 2 - углубленная ванна $D_B/H_B = 3,6$

позволяет рассчитывать на существенное повышение энергоэффективности агрегата.

5. Система рассредоточенной аспирации. Заключается в отборе эвакуируемого пылегазового потока как с периферии, так и из центра (область электродных зазоров) подсводового пространства, с помощью горизонтально расположенного газоотводящего патрубка (рис. 1). Это позволяет, не прибегая к повышению разрежения в печи, локализовать в рабочем пространстве пылегазовую среду и снизить неорганизованные выбросы через электродные зазоры на 20–50 %, а также уменьшить приток холодного воздуха в рабочее окно [9]. Таким образом, принятая система аспирации, помимо очевидной экологической составляющей, способствуют повышению энергоэффективности электросталеплавильного агрегата.

Выводы. Результатом работы стало создание современной конкурентоспособной отечественной ДСП малой вместимости. 15-т печь, благодаря модульной системе базовых узлов, обеспечивающих компоновку агрегата в соответствии с выбранной технологией в литейных цехах машиностроительных заводов или в качестве плавильного агрегата современного микро-завода. Техничко-экономические показатели печи во многом зависят от конкретных условий эксплуатации, основные из которых – вид технологии и насыпная плотность шихты. Реализация перечисленных выше инновационных решений наряду с установкой настраиваемых параметров ДСП под конкретную технологию обеспечивает снижение энергопотребления не менее чем на 3–5 % и неорганизованных выбросов пылегазовой среды на 20–50 % в сравнении с аналогами.

Библиографический список / References

1. Cabai G., Cabai F. Micro mills for niche locations and niche applications/ Available at: http://millennium-steel.com/wp-content/uploads/2014/05/pp71-75_ms14.pdf (accessed 21 February 2017).
2. Toulouevski Yu. N., Zinurov I. Y. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. – Berlin: Springer, 2010, 258 p.
3. Timoshenko S. N. Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace // System technologies. – Dnepropetrovsk, 2016. – No. 3 (104). – P. 33–39.
4. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электропечей черной металлургии / А. В. Егоров. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
- Егоров А. В. (1990) *Raschet moshchnosti i parametrov elektropetchey chernoy metallurgii* [Calculation of power and parameters of electric furnaces of steel industry]. Moscow, Metallurgija, 280 p. (In Russian).

5. Stankevich Yu. A., Timoshpol'skii V. I., Pavlyukevich N. V. et al. Mathematical modeling of the heating and melting of the metal charge in an electric arc furnace // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Vol. 82, no. 2, pp. 221–235.

6. Ghosh A. Secondary Steelmaking. Principles and Applications / Boca Raton – London – New York – Washington, D.C.: CRC Press, 2000. – 344 p.

7. Kawakami M., Takatani R. Heat and Mass Transfer Analysis of Scrap Melting in Steel Bath // Tetsu to Hagane. – 1999. – Vol. 85, no. 9, pp. 658–665.

8. Li J., Provatas N. Kinetics of Scrap Melting in Liquid Steel: Multipiece Scrap Melting // Metallurgical and Material Transactions. – 2008. – Vol. 39B, no. 4. – P. 268–279.

9. Тимошенко С. Н. Моделирование системы аспирации электродуговой печи с целью повышения энергоэффективности и экологической безопасности / С. Н. Тимошенко, П. И. Тищенко, Н. С. Тимошенко, А. Н. Семко // Экология и промышленность. – Харьков: «УкрНТЦ «Энергосталь», 2013. – № 2 (35). – С. 66–69.

Timoshenko S. N. (2013). *Modelirovaniye sistemy aspiratsii elektrodugovoy pechi s tsel'yu povysheniya energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti* [Simulation of the electric arc furnace system aspiration to improve the energy efficiency and environmental safety]. Kharkiv, UkrNTC “Energestal”, no. 2 (35), pp. 66–69.

Purpose. The development of energy-efficient solutions of the new generation electric arc furnace (EAF) of small capacity.

Methodology. Mathematical modeling, numerical simulation, industrial experiment.

Findings. On the basis of innovative solutions developed and implemented the EAF capacity of 15 tons, which can operate both with intensive technology as a smelting unit at a micro-mill and on classic technology in foundries.

Originality. The rational geometric parameters of the furnace workspace and the off-gas aspiration system were found. For a given energy technological mode of 15-ton EAF it promote to minimize the energy loss with cooling water and dust-gas medium.

Practical value. Optimization of the bath depth and electrodes pitch diameter combined with blowing the steel bath with inert gas, the use of a modular system of base units, energy-saving water-cooled panels and dispersed aspiration system provide universality of the EAF, reduction of power consumption by 3–5 % and fugitive emissions by 20–50 %.

Key words: arc furnace, energy efficiency, optimization of the geometry of the workspace, dispersed aspiration system.

Рекомендована к публикации
д. т. н. М. В. Губинским
Поступила 02.03.2017