

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

С. Н. Тимошенко<sup>1</sup>, А. П. Стовпченко<sup>2,3</sup>, Ю. В. Костецкий<sup>2</sup>, М. В. Губинский<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет.

85300, Донецкая область, г. Покровск, пл. Шибанкова, 2. E-mail: mail@donntu.edu.ua

<sup>2</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>3</sup>Инжиниринговая компания «Элмет-Рол».

03150, г. Киев, А. я. 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

<sup>4</sup>Национальная металлургическая академия Украины.

49600, г. Днепр, просп. Гагарина, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Предложен комплекс малозатратных энергоэффективных решений модернизации дуговых сталеплавильных печей: глубокая ванна, водоохлаждаемые панели с пространственной структурой, система рассредоточенной аспирации и предварительный среднетемпературный нагрев скрапа пылегазовой средой с эффективным дожиганием СО. Методами компьютерного моделирования показано, что применение комплекса решений в 120-тонной дуговой сталеплавильной печи позволяет сократить энергопотребление на 56...68 кВт·ч/т. Библиогр. 29, табл. 6, ил. 7.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь; энергоэффективность; глубокая ванна; водоохлаждаемые элементы с объемной структурой; система рассредоточенной аспирации; среднетемпературный предварительный нагрев скрапа

Направления развития металлургического производства на долгосрочную перспективу во многом определяются экологическими требованиями, в частности, ограничением выбросов парниковых газов в атмосферу [1]. В этой связи ожидается увеличение доли производства стали в дуговых печах (ДСП), которые в настоящее время обеспечивают около трети его мирового объема, уступая конвертерному процессу [2]. В странах Европейского союза (ЕС) и США в ответ на глобальные экологические вызовы доля электростали постоянно растет и приближается к 40 и 63 % соответственно.

На этом фоне структура металлургического комплекса Украины, представленная преимущественно крупными вертикально-интегрированными компаниями, в которых сталеплавильное производство базируется на схеме доменная печь–конвертерный процесс, очевидно требует совершенствования в сторону увеличения доли ДСП.

Возможности электропечей относительно широкого выбора исходной шихты (скрап, металлized сырье, чугун) и варьирования окислительного потенциала в процессе плавки позволяют использовать их как в «большой» металлургии в технологических маршрутах производства сортового и листового проката, так и в «малой» для производства литья на машиностроительных заводах.

Для производства стали используют электродуговые печи переменного и постоянного тока.

Печи постоянного тока (ДСПТ) в сравнении с трехфазными ДСП характеризуются более устойчивым горением дуги, что способствует снижению угара железа из-за притока воздуха в рабочее пространство, уровня шума и фликер-эффекта. В «большой» металлургии преимущества ДСПТ нивелируются скоротечностью плавки полупродукта, в «малой», где сохранилась классическая технология, эти преимущества реализуются.

**ДСП как энерготехнологический агрегат и задачи исследований.** Важнейшим направлением совершенствования ДСП с учетом современных глобальных тенденций является повышение энергоэффективности, которое может быть достигнуто путем снижения и утилизации потерь теплоты, а также диверсификацией источников энергии, используемых в технологическом процессе.

Типовой энергетический и материальный балансы плавки одной тонны полупродукта в ДСП при интенсивной технологии [3–5] приведены ниже.

### Энергетический баланс ДСП

Приход	кВт·ч	%
Электроэнергия .....	355	58
Химическая энергия в т. ч.: .....	255	42
теплота экзотермических реакций в т. ч. ....	212	35
окисления углерода .....	122	20
окисления железа .....	78	12
энергия топливно-кислородных горелок .....	43	7
Итого .....	610	100

<b>Расход</b>		
Энтальпия металла .....	382	63
Энтальпия шлака .....	58	9
Потери энергии в т. ч.: .....	170	28
с пылегазовой средой .....	87	14
с водой .....	66	11
прочие (электрические, через футеровку) .....	17	3
Итого .....	610	100

#### Материальный баланс ДСП

<b>Приход</b>	<b>кг</b>
Скрап .....	1105
Шлакообразующие .....	43
Электроды .....	1,2
Огнеупоры .....	6
Природный газ .....	5
Кислород .....	58
Вода для охлаждения (оборотная) .....	3500
Аргон .....	0,02
Воздух (приток в ДСП) .....	140
Углеродсодержащий порошок .....	11
Уголь в завалку .....	10
Итого (без воды) .....	1379
<b>Расход</b>	
Металл (полупродукт) .....	1000
Шлак .....	107
Пылегазовая среда .....	272
Плавильная пыль .....	22
Итого .....	1379

Из этих данных следует, что проблема низкой энергоэффективности ДСП в решающей степени обусловлена потерями теплоты с пылегазовой средой (ПГС) и с охлаждающей водой, а также потерями железа. Потери теплоты составляют в среднем 25 % вводимой энергии или около 90 % от потерь энергии, а потери железа достигают в среднем 10,5 %, из которых 1,5...2,5 % — плавильная пыль в ПГС [3].

Утилизация теплоты, теряемой с водой в традиционных системах охлаждения ДСП, затруднена ввиду относительно невысокой температуры воды на выходе (не выше 50...60 °С), однако работы в этом направлении ведутся на основе использования турбогенератора с органическим циклом Ренкина [6]. Применение системы испарительного охлаждения, работающей под высоким (2 МПа и более) давлением, в традиционных процессах с дискретной загрузкой скрапа не оправдано ввиду

неоднородности теплового режима по ходу плавки, опасности прожога змеевиков паразитной дугой и динамических нагрузок на водоохлаждаемые элементы. В технологических процессах «flat bath» с непрерывным плавлением шихты в сталеплавильной ванне и стабильным тепловым режимом реализация испарительного охлаждения возможна, но сведений о его использовании нет.

Утилизация теплоты ПГС, включая энергию дожига CO [7], возможна по трем направлениям: предварительный нагрев исходной шихты, выработка пара с использованием его для генерации электроэнергии и термохимическая регенерация природного газа в продуктах ПГС.

*Предварительный нагрев исходной шихты.* В современных ДСП применяют конвейерные, шахтные и бадьевые системы предварительного нагрева (ПН) исходной шихты. Наибольшее распространение получила технология «Consteel» компании «Tenova S.p.A.» (Италия) с непрерывной загрузкой фрагментированного скрапа на конвейере в ванну [8]. Нагрев шихты теплотой ПГС со средней температурой в период жидкой ванны 1600 °С осуществляется при фильтрации газового потока через слой скрапа. Увеличение температуры загружаемого в ДСП скрапа на каждые 100 °С позволяет при выплавке стали уменьшить удельный расход электроэнергии на 13...15 кВт·ч/т [3].

Практика эксплуатации систем ПН скрапа выявила проблему эмиссии в атмосферу высокотоксичных диоксинов и фуранов — соединений галогенов с углеводородами (PCDD/F), образующихся при нагреве рядового лома, загрязненного поливинилхлоридными пластмассами, резиной, ГСМ. Поведение PCDD/F в условиях интенсивной технологии выплавки стали в ДСП по данным [9, 10] представлено в табл. 1.

Меры по минимизации PCDD/F, в частности установка дополнительных топливно-кислородных горелок (ТКГ) и камеры термической закалки ПГС, могут в ряде случаев свести на нет экономический эффект ПН скрапа, учитывая образование CO<sub>2</sub> при работе ТКГ, что неприемлемо в условиях ограничений на эмиссию парниковых газов [1].

Т а б л и ц а 1. Эволюция PCDD/F в условиях электросталеплавильного производства

Стадия	Сущность процесса	Температурный интервал, °С	Действие по минимизации PCDD/F	Временной интервал (параметры) действия
1	Образование PCDD/F	500...850	Локализация	Постоянно
2	Разложение PCDD/F на исходные химические реагенты	1000...1200	Выдержка	Не менее 2 с
3	Вторичный синтез PCDD/F	800...250	Быстрое охлаждение	Не менее 300 °С в секунду
4	Удаление остаточных PCDD/F	<200	Ввод сорбентов	Перед блоком рукавных тканевых фильтров

В новых разработках систем ПН скрапа большое внимание уделяют экологической безопасности. Для обеспечения ПДК PCDD/F и CO предусмотрены камеры дожигания и спрейерного охлаждения (закалки) ПГС с окончательной дезактивацией токсинов сорбентами на основе мелкодисперсного углерода [9, 10].

Развитие сталеплавильных технологий в соответствии с программой «EU Low-carbon Roadmap» по снижению выбросов CO<sub>2</sub> на 34...40 % до 2030 г. связано с пересмотром технологических маршрутов в пользу мало- и безуглеродных технологий.

В шахтных ДСП нового поколения «EcoArc» компании «JP Steel Plantech» (Япония) [10], «COSS» фирмы «Fuchs Technology» (Германия) [11], «EPC» компании «CVS» (Турция) совместно с «KR Tec. GmbH» (Германия) [12] и «Quantum» фирмы «Primetals Technologies» (Великобритания) [13], как и в технологии «Consteel» реализуется процесс «flat bath». Эффективность нагрева слоя скрапа ПГС в шахте существенно выше, чем на конвейере, а двухкамерная конструкция шахты повышает экологическую безопасность ДСП в т. ч. по PCDD/F с учетом последующей дезактивации токсинов путем термической закалки (табл. 1). Компания «Primetals Technologies» осуществила пуск первой ДСП «Quantum» на заводе «Talleres y Aceros S.A.» (Мексика) и ведет строительство этих печей на заводах компаний «Acciaieria Arvedi» (Италия), «Henan Yaxin Steel Group Ltd» (КНР), ввод в эксплуатацию которых намечен на 2019 г.

Среднетемпературный ПН (до 300...450 °C) скрапа является менее энергоэффективным, чем высокотемпературный, однако позволяет избежать дополнительных расходов на нейтрализацию PCDD/F. Технология впервые была реализована на 175-тонной ДСП завода «Icdas Celik» (Турция) компанией «SMS Concast AG» (Швейцария) [14]. Но определенные недостатки, в частности нагрев шихты в загрузочной бадье, не позволили достичь по ходу плавки заданной температуры скрапа (300 °C) из-за повышенного термического сопротивления корпуса бадьи.

*Выработка энергетического пара.* Система «iRecovery» компании «Tenova RE Energy GmbH» (Германия) обеспечивает утилизацию 40...70 % теплоты ПГС на выработку электроэнергии с помощью пара высокого давления (до 3,5 МПа). Она установлена на заводах ЕС «Georgsmarienhutte GmbH» (140-тонная ДСППТ) и «Feralpi Riesa» (130-тонная ДСП), а также в Корею на «Hyundai Steel» (90-тонная ДСП) и обеспечивает выработку в среднем 80 кВт·ч/т стали [15].

*Термохимическая регенерация (ТХР) природного газа.* ТХР заключается в получении смеси CO и H<sub>2</sub>, обладающей большей теплотворностью, чем

CH<sub>4</sub>, за счет физической теплоты и химической энергии CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, содержащихся в ПГС. Применительно к ДСП ТХР может быть реализована только в процессах с непрерывной загрузкой шихты в ванну, отличающихся относительным постоянством состава и температуры ПГС по ходу плавки, и использована для ПН скрапа на конвейере с помощью ТКГ. Согласно расчетам [16], ТХР повышает тепловой к. п. д. печи на 5...6 % при снижении расхода природного газа на 21 % и эмиссии CO<sub>2</sub> на 9 % в сравнении с прямым сжиганием природного газа в ТКГ.

*Диверсификация энергообеспечения.* Представляет интерес использование первичных источников энергии наряду с электроэнергией в ДСП, учитывая опыт 1980–1990-х гг. [3] и снижение мировых цен на природный газ. Компанией «SMS Siemag» (Германия) разработана концепция процесса производства стали с непрерывной загрузкой шихты и периодическим выпуском [17]. Скрап в реакторе нагревают и расплавляют с помощью первичных источников энергии, вводя около 70 % необходимой энергии. Затем углеродистый полупродукт перетекает в ванну ДСП с относительно маломощной электроустановкой, где его доводят до заданной марки стали. Себестоимость стали снижается на 7,5 евро/т (в условиях ЕС), а эмиссия CO<sub>2</sub> уменьшается на 30 % в сравнении с лучшими показателями эксплуатации ДСП. В процессе «EcoArc» при нагреве скрапа автивно используют энергию окисления углерода, поступающего из шихты и инжектируемого в ванну. По опыту работы шести агрегатов в странах Азии, доля электроэнергии в приходной части энергетического баланса не превышает 40 %.

Разработки российских специалистов [18] направлены на преобразование ДСП в топливно-дуговую печь FAF (fuel arc furnace), в энергобалансе которой уменьшена доля электроэнергии и увеличена, соответственно, доля топливной составляющей. Принцип FAF может быть реализован в ДСП с дискретным и с непрерывным процессом. Ожидается, что производительность и энергоэффективность FAF будет выше, чем современных ДСП серии «Ultimate» компании «Siemens-VAI» (Германия), а общая эмиссия CO<sub>2</sub> в атмосферу ниже, чем ДСП с учетом вклада питающей печь ТЭС.

Таким образом, ряд концептуальных и технологических решений ДСП, разработанных в свете современных энергоэкологических тенденций, находится в стадии промышленного опробования и выхода на мировой рынок. Однако ожидаемая цена их будет высокой. Поэтому с учетом экономической ситуации применение новых решений

в отечественном электросталеплавильном производстве, которое, безусловно, нуждается в эффективной модернизации, проблематично.

**Энергоэффективные решения при модернизации ДСП.** Для снижения и утилизации потерь энергии с ПГС, охлаждающей водой и плавильной пылью, предлагается комплекс относительно малозатратных решений для новых и модернизируемых ДСП, используемых как в «большой», так и «малой» металлургии, приведенный на рис. 1.

Они включают: совершенствование геометрии ванны, энергосберегающие водоохлаждаемые панели с пространственной структурой, системы рассредоточенной аспирации и среднетемпературного предварительного нагрева скрапа.

*Совершенствование геометрии ванны.* Применение в «большой» металлургии интенсивной двухстадийной технологии электроплавки приблизило происходящие в ванне процессы к условиям конвертерного процесса, однако отношение диаметра к глубине ванны  $D_B/H_B$  (см. рис. 1) в ДСП по-прежнему составляет в среднем 5,0...5,5 [19], тогда как в конвертере оно близко к 1. Снижение в современных ДСП критичности величины удель-

ной поверхности контакта шлак–металл (есть внепечная обработка) и стойкости футеровки стен (используются водоохлаждаемые панели) позволяет скорректировать геометрию ванны, увеличив ее глубину при данном объеме, с целью снижения потерь энергии излучающей поверхностью расплава и интенсификации процессов тепло- и массообмена. При этом принимается во внимание ряд конструктивно-технологических ограничений, связанных с диаметром распада электродов  $D_p$  и энерготехнологическим режимом ДСП (ток переменный или постоянный, процесс дискретный или непрерывный).

На основе математической модели излучения в рабочем пространстве ДСП, адаптированной для исследования влияния геометрии ванны [20], выполнен анализ относительных потерь энергии с водой от  $D_B/H_B$  для 120-тонной высокопроизводительной дуговой печи с различными энерготехнологическими режимами (рис. 2).

Минимум потерь теплоты на расчетных кривых связан с усилением влияния поверхности электродов в общей мощности излучения при уменьшении  $D_B/H_B$ . Согласно данным рис. 2 в рассмотренных вариантах энерготехнологических режимов

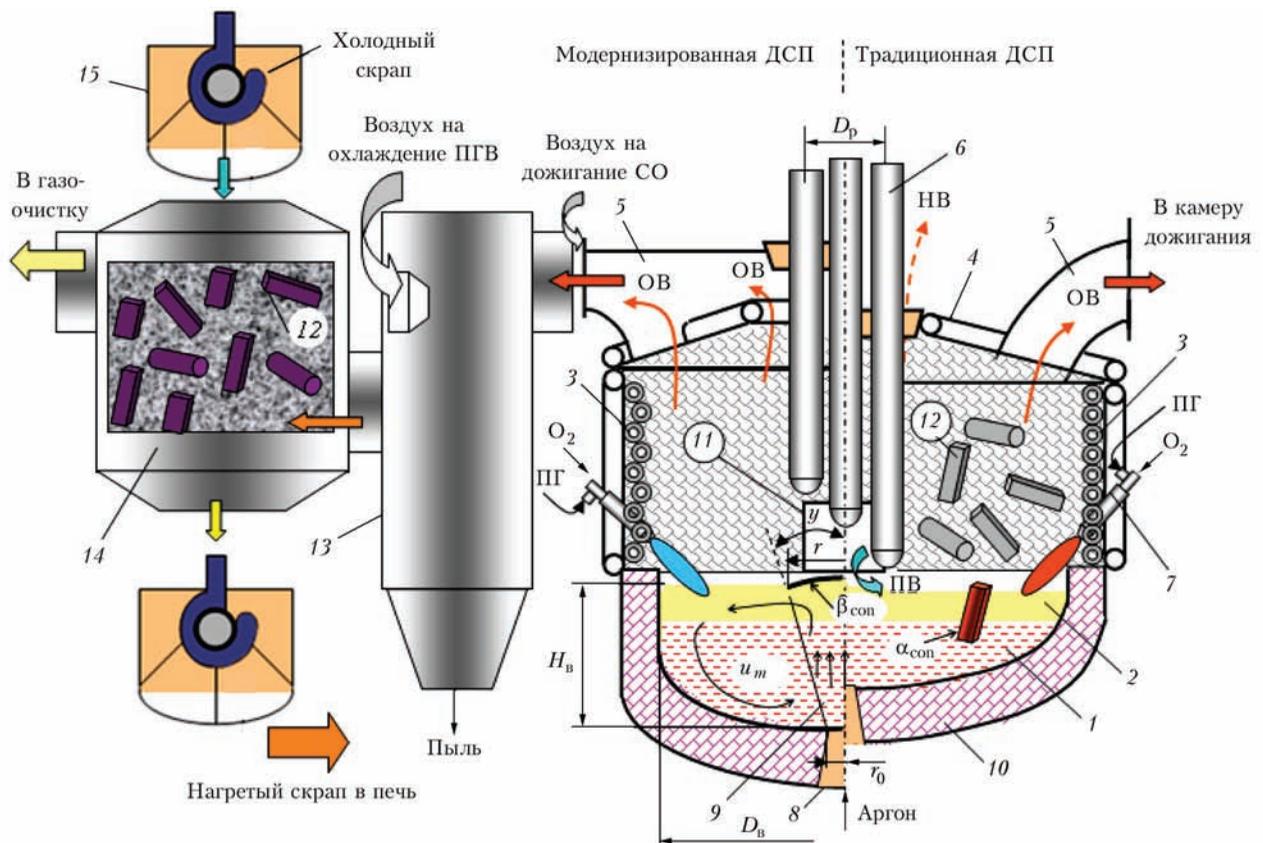


Рис. 1. Комплекс энергоэффективных решений для ДСП: 1 — ванна металла; 2 — ванна шлака; 3 — стеновые панели; 4 — свод; 5 — газоотводящий патрубок; 6 — электроды; 7 — комбинированная фурма-горелка; 8 — пористая пробка; 9 — двухфазная газометаллическая область; 10 — подина; 11 — рабочее окно; 12 — скрап; 13 — камера дожигания и пылесажения; 14 — камера нагрева скрапа; 15 — загрузочная бадья; ОВ, НВ — организованные и неорганизованные пылегазовые выбросы; ПВ — приток воздуха; ПГ — природный газ. Другие обозначения — см. в тексте

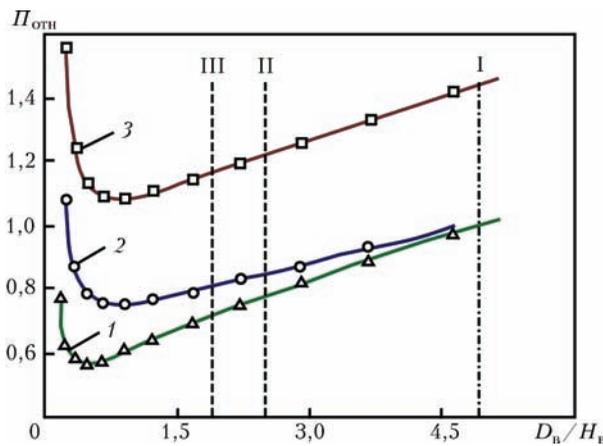


Рис. 2. Относительные потери теплоты излучением в 120-тонной ДСП ( $P_{отн}$ ) в зависимости от  $D_b/H_b$ : 1 — ДСППТ, дискретный процесс; 2 — ДСП, периодический процесс; 3 — ДСП, непрерывный процесс; 1 —  $D_b/H_b$  для стандартной ванны; ограничение  $D_b/H_b$  для 1, 2 (II) и 3 (III) соответственно

1, 2, 3 достигается сокращение потерь теплоты с водой относительно стандартной ванны с  $D_b/H_b = 5$  на 21, 26 и 27 % соответственно.

В современных ДСП уменьшение поверхности металл–шлак компенсируется увеличением скорости циркуляции в ванне за счет гидродинамического воздействия кислородных фурм и продувки инертным газом через пористые пробки в подине.

Применительно к продувке жидкой стали инертным газом движущей силой циркуляции является разность плотностей окружающего металла и двухфазной газометаллической области, образующейся с углом раскрытия  $\gamma$  в ванне над пористой пробкой (см. рис. 1). Тепло- и массообмен в перемешиваемой сталеплавильной ванне, согласно исследованиям [21], описывается следующими критериальными уравнениями:

$$Nu = 0,017Re^{0,8}Pr^{0,33}, \tag{1}$$

$$Sh = 0,079Re^{0,7}Sc^{0,356}, \tag{2}$$

где  $Nu = \alpha_{con} H_b / \lambda$  — число Нуссельта;  $\alpha_{con}$  — коэффициент теплопереноса в жидкой ванне к фрагменту скрапа;  $\lambda$  — коэффициент теплопрово-

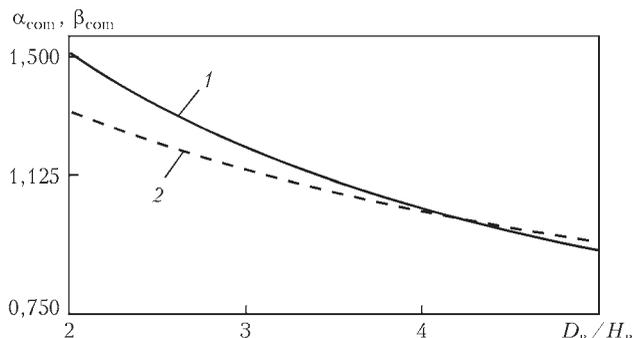


Рис. 3. Зависимость относительных коэффициентов теплопереноса  $\alpha_{con}$  (1) и массопереноса  $\beta_{con}$  (2) от  $D_b/H_b$

дности жидкой стали;  $Re = u_m H_b / \nu$  — число Рейнольдса;  $u_m$  — средняя скорость циркуляции в ванне;  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкой стали;  $Pr = \rho C v / \lambda$  — число Прандтля;  $C$  — теплоемкость жидкой стали;  $Sh = \beta_{con} H_b / D$  — число Шервуда;  $\beta_{con}$ ,  $D$  — коэффициенты массопереноса и диффузии реагента в ванне соответственно;  $Sc = \nu / D$  — число Шмидта.

Средняя скорость циркуляции в ванне при пневматическом перемешивании  $u_m$  является, согласно данным работы [22], функцией геометрии ванны ( $D_b/H_b$ ) и расхода газа  $Q$  через донную пористую пробку:

$$u_m = 0,79Q^{0,33}H_b^{0,25} / (0,5D_b)^{0,67}. \tag{3}$$

Кинетика плавления фрагментов скрапа в перемешиваемой ванне определяется теплофизическими характеристиками, удельной поверхностью и коэффициентом конвективной теплоотдачи в ванне  $\alpha_{con}$  [23]. Кинетика рафинирования стали от вредных примесей (серы, фосфора) характеризуется коэффициентом конвективного массопереноса  $\beta_{con}$  и величиной активной межфазной поверхности барботажного «пятна» радиусом  $r$  (см. рис. 1). Результаты оценки  $\alpha_{con}$  и  $\beta_{con}$  относительно их значений для базовой ванны при изменении  $D_b/H_b$ , выполненные на основе зависимостей (1–3), приведены на рис. 3. Согласно расчетам снижение  $D_b/H_b$  с 5 до 2,5 ведет к росту  $\alpha_{con}$  на 16 и  $\beta_{con}$  на 11 %.

По экспериментальным данным [23], существует пропорциональная зависимость между  $\alpha_{con}$  и скоростью плавления скрапа в жидкой ванне. Увеличение  $\beta_{con}$  и активной реакционной поверхности в глубокой ванне способствует интенсификации массообмена и рафинирования на границе раздела металл–шлак. Увеличение глубины ванны согласно эмпирической зависимости влияния мощности пневматического перемешивания на продолжительность усреднения сталеплавильной ванны [24] способствует сокращению времени гомогенизации жидкого расплава на 8...10 %.

Согласно оценкам [25] в условиях ДСППТ при перемешивании расплава электровихревыми течениями влияние глубины ванны на процессы тепло- и массообмена более существенно, чем в ДСП с пневматическим перемешиванием ванны. Снижение  $D_b/H_b$  с 5,0 до 2,5 ведет к росту  $\alpha_{con}$  не менее чем вдвое.

Расчетные показатели энергоэффективности, достигаемые за счет совершенствования геометрии ванны, для 120-тонной высокопроизводительной дуговой печи при реализации различных энерготехнологических режимов приведены в табл. 2.

Энергосберегающие водоохлаждаемые панели с пространственной структурой. Традиционные панели ДСП выполнены с плотной структурой труб (рис. 4, а), которая не обеспечивает эффективного роста толщины шлакового гарнисажа.

Для энергосберегающих панелей (рис. 4, б–г) характерна пространственная структура, способствующая накоплению возобновляемого равновесного слоя гарнисажа, который воспринимает лучистый тепловой поток и выполняет теплоизоляционную и теплоаккумулирующую функции [26].

Задача стационарного теплообмена в системе источники излучения–трубчатая панель с водяным охлаждением, покрытой слоем гарнисажа описывается уравнением:

$$q - (1 - \epsilon)\sigma T_1^4 - \frac{(T_1 - T_2)}{(h_1/\lambda_1 + h_2/\lambda_2 + 1/\alpha)} = 0, \quad (4)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана;  $q$  — падающий тепловой поток;  $\epsilon$  — степень черноты панели;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к воде;  $h_1, \lambda_1, h_2, \lambda_2$  — толщины и теплопроводности гарнисажа и трубы соответственно;  $T_1, T_2$  — температура поверхности излучения и воды соответственно.

Результаты численного решения уравнения (4) в двумерной постановке в пакете ELCUT 6,2 для панелей, выполненных по вариантам на рис. 4, а, б, приведены на рис. 5, а, б в виде температурного поля (стрелки указывают распределение теплового потока). Интегральная характеристика относительных потерь теплоты с водой показана на рис. 5, в. Согласно проведенным данным оптимальное значение межтрубного расстояния  $f$ , при котором потери минимальны, составляет 1,8...1,9 диаметра трубы  $d$ .

Таблица 2. Расчетные параметры энергоэффективности 120-тонной дуговой печи с глубокой ванной относительно базового варианта

Параметры	Базовый вариант ванны ДСП	Значения параметров		
		ДСП, периодический процесс	ДСПТ, дискретный процесс	ДСП, непрерывный процесс
$D_v/H_v$	5,0	2,75	2,75	1,90
Потери теплоты с водой	1,0	0,79	0,74	0,73
Продолжительность усреднения ванны	1,0	0,94	0,92	0,90
Скорость плавления скрапа в ванне	1,0	1,19	1,7...2,0	1,25

Рабочие характеристики водоохлаждаемых панелей ДСП традиционных и энергосберегающих с объемной структурой приведены в табл. 3.

Следует отметить, что двухрядные панели (рис. 4, в) [26], несмотря на повышенную металлоемкость, обеспечивают помимо энергосбережения высокую надежность, ремонтпригодность и повышенный срок службы внешнего ряда. При выходе из строя внутреннего разреженного ряда из-за прожога дугой печь может работать до ближайшего капремонта на внешнем ряде панели.

Для ДСП литейного класса вместимостью 3...15 т разработано и внедрено инновационное решение комбинированного свода, сочетающее водоохлаждаемые элементы и огнеупорную футеровку (рис. 6). Комбинированный свод позволяет при минимальных потерях теплоты с водой сократить и удельный расход огнеупоров за счет замены их водоохлаждаемыми элементами в центральной части, обычно лимитирующей стойкость свода в целом.

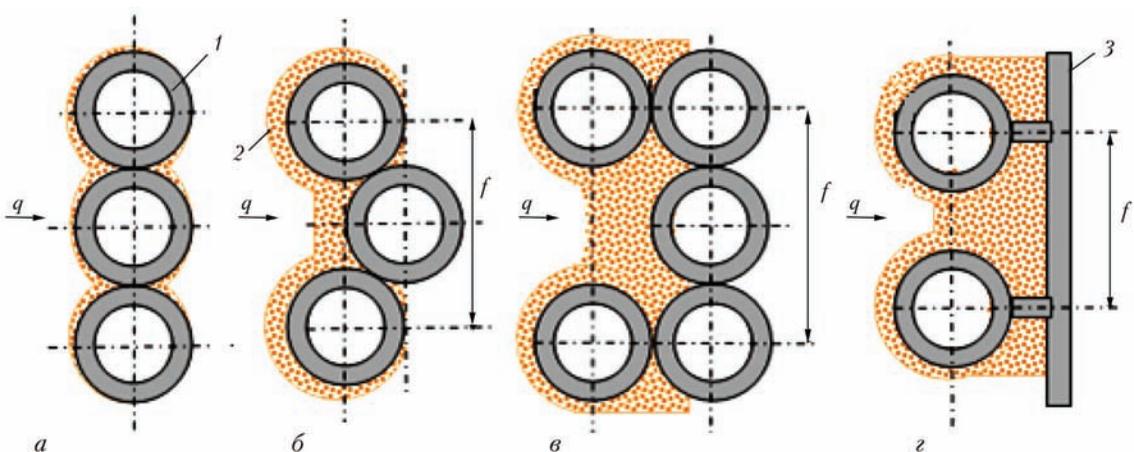


Рис. 4. Водоохлаждаемые панели ДСП: 1 — труба; 2 — гарнисаж; 3 — кожух печи;  $q$  — направление падающего теплового потока (обозн. см. в тексте)

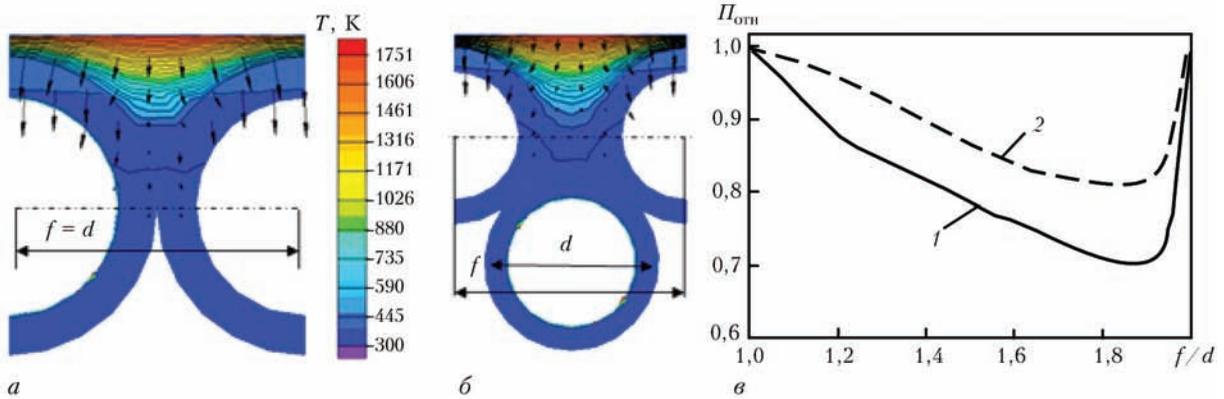


Рис. 5. Температурное поле в панели традиционной (а), с пространственной структурой (б) и относительные потери теплоты на 1 м<sup>2</sup> панели ( $\Pi_{\text{отн}}$ ) в зависимости от параметра  $f/d$ : 1, 2 — теплопроводность гарнисажа 2 и 8 Вт/(м·К) соответственно (обозн. см. в тексте)

**Т а б л и ц а 3. Рабочие характеристики водоохлаждаемых панелей**

Параметр	Значения параметров относительно варианта (а) для панелей по вариантам (б–г) (см. рис. 4)			
	а	б	в	г
Масса гарнисажа на 1 м <sup>2</sup>	1,0	1,22	2,33	2,20
Тепловой поток к воде на 1 м <sup>2</sup>	1,0	0,84	0,80	0,77
Масса панели на 1 м <sup>2</sup>	1,0	1,08	1,52	0,73
Область применения	Традиционное решение для ДСП	ДСП средней мощности (до 0,7 МВА/т) и вместимости (до 50 т)	Крупные ДСП высокой мощности (> 0,7 МВА/т)	ДСП малой вместимости и мощности (до 0,5 МВА/т)

При этом повышается стойкость периферийной части, что существенно улучшает технико-экономические показатели комбинированного свода [27].

*Система рассредоточенной аспирации.* В данном решении реализованы принципы рассредоточения всасывающей поверхности и приближения ее к электродным зазорам с целью снижения неорганизованных выбросов ПГС и уменьшения притока воздуха [28]. Конструктивно система выполнена в виде сводовой камеры с горизонтальным газоотводящим патрубком, соединенным дополнительным каналом с периферией подсводового пространства (см. рис. 1).

Предварительный анализ показал, что течение среды в исследуемом объекте является турбулентным ( $Re = 10^5$ ). Численное моделирование выполняли на основе уравнений Навье–Стокса (5) и неразрывности (6) с использованием  $k-\epsilon$  модели турбулентности в пакете прикладных программ CosmosFloWorks:

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial \tau} + (\nabla \vec{w}) \vec{w} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \eta \nabla^2 \vec{w} + F, \quad (5)$$

$$\text{div} \vec{w} = 0, \quad (6)$$

где  $\rho$  — плотность;  $w$  — скорость;  $p$  — давление;  $\tau$  — время;  $F$  — объемная плотность сил;  $\eta$  — динамическая вязкость среды.

Расчет поля скоростей, давлений и температур газового потока в модели 120-тонной ДСП выполняли при следующих допущениях и граничных условиях, принятых в модели [28]: рассматривали период плавления; в качестве рабочего газа принят воздух; теплообмен газа с элементами рабочего пространства отсутствовал; в выходном сечении газоотводящего патрубка разрежение составляло 15 Па, средняя температура отходящих газов равнялась 1000 К; в сечении рабочего окна нормальные условия (атмосферное давление и температура

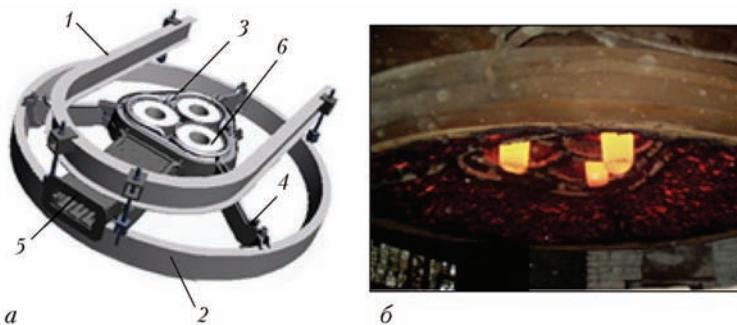


Рис. 6. Комбинированный свод ДСП: концептуальное решение (а) и реализация (б); 1 — портал печи; 2 — опорное кольцо свода; 3 — центральная водоохлаждаемая часть; 4 — опорные спицы; 5 — газоотводящий патрубок; 6 — огнеупорная вставка

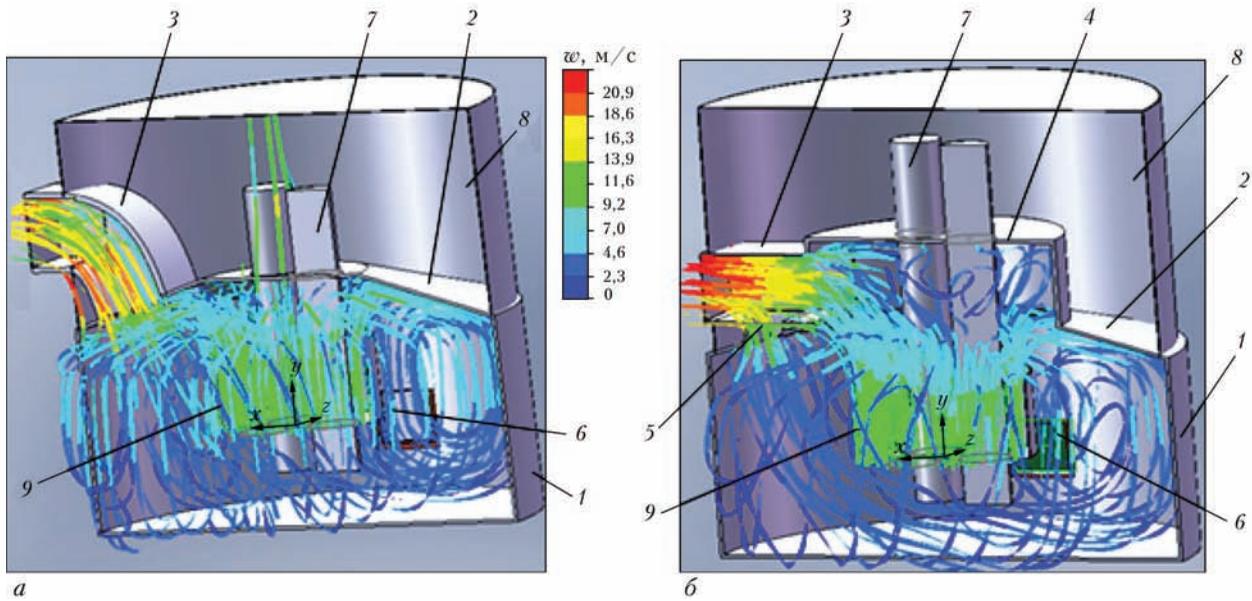


Рис. 7. Результаты расчета поля скоростей пылегазовой среды и треков частиц пыли для традиционной системы аспирации (а) и системы рассредоточенной аспирации (б) в период плавления: 1 — корпус печи; 2 — свод; 3 — газоотводящий патрубок; 4 — сводовая камера; 5 — периферийный канал; 6 — рабочее окно; 7 — электрод; 8 — условная камера; 9 — колодец, образованный дугами в шихте при плавлении

газа 293 К); на поверхности условной камеры над печью атмосферное давление и температура газа 293 К; на дне проплавляемого дугами в шихте колодца интенсивность газообразования 4,5 кг/с при температуре газа 1850 К и атмосферном давлении; ширина электродных зазоров 30 мм; на других поверхностях — реальная стенка.

На полученные результаты расчета поля скоростей накладывали поток частиц плавильной пыли, генерируемый условным источником ПГС на дне колодца. Принятые в численной модели параметры пылевыведения следующие: интенсивность 0,2 кг/с, средний размер частиц 100 мкм, плотность 3 г/см<sup>3</sup> и соответствуют данным работы [29]. Число условных частиц пыли в зоне образования принято равным 100. Скорость и температура частиц пыли в численной модели привязаны к расчетным параметрам газового потока.

Результаты расчетов в виде поля скоростей с наложенными на него треками частиц плавильной пыли приведены на рис. 7. Общая картина газодинамики в рабочем пространстве печи свидетельствует о более эффективной локализации неорганизованных выбросов при использовании рассредоточенной системы газоудаления, что видно по числу треков частиц пыли, проходящих через электродные зазоры в пространство условной камеры над сводом.

Интегральные характеристики систем аспирации, полученные в результате численного моделирования, сопоставлены в табл. 4.

Результаты расчетов показывают, что система рассредоточенной аспирации в исследуемом диапазоне изменения режимных и геометрических параметров ДСП обеспечивает преимущества над традиционной системой газоудаления по энергоэффективности и экологической безопасности. Относительные величины притока холодного воздуха в печь через рабочее окно и неорганизованных выбросов через электродные зазоры снижаются в среднем на 22 и 35 % соответственно и практически подавляется вынос плавильной пыли в электродные зазоры.

*Система среднетемпературного предварительного нагрева скрапа.* С учетом отмеченных ранее недостатков конструктивного решения [14], в предлагаемой для мини-заводов системе предварительный нагрев скрапа производится в специальной камере, установленной в тракте газоудаления с последующей перегрузкой в бадью для завалки в печь.

**Таблица 4. Сравнительная характеристика систем аспирации ДСП**

Система аспирации	Параметры, отн. ед.			
	Приток воздуха в рабочее окно	Неорганизованные выбросы		Общий расход газа из печи
		газа	пыли	
Традиционная	1	1	1	1
Рассредоточенная	0,78	0,65	Не наблюдали	0,86

Таблица 5. Сопоставительная характеристика основных вариантов ПН скрапа

ПН скрапа	Высокотемпературный		Среднетемпературный в камере
	в шахте	на конвейере	
Температура нагрева, °С	850...950	600...700	300
Расчетная экономия энергии в ДСП, кВтч/т	100...120	70...105	22...25
Проблема выделения PCDD/F	Существует		Нет
Энергозатраты на нейтрализацию PCDD/F	Не менее 10...15 кВтч/т [8]		Нет
Изменение инфраструктуры цеха	Существенное		Незначительное
Дополнительные требования к подготовке скрапа	Требуется фрагментирование		Нет
Влияние ПН скрапа на дожигание СО	Негативное из-за снижения температуры газа в слое холодного скрапа		Дожигание СО проводят до ПН скрапа

Предварительные расчеты [28], выполненные на основе численного решения задачи Шумана, показывают возможность нагрева 50 % общей массы скрапа стандартной насыпной плотностью 0,9 т/м<sup>3</sup> до 400 °С за 22...25 мин при обработке потоком ПГС подвалки 50-тонной ДСП в специальной камере. Согласно расчетам это позволяет без существенной реконструкции производства снизить энергозатраты при выплавке полупродукта на 22...25 кВтч/т и вписаться в существующий энерготехнологический режим печи.

Схема организации предварительного нагрева скрапа в существующей инфраструктуре комплекса ДСП приведена на рис. 1. Камера нагрева скрапа устанавливается в тракте газоудаления после камеры дожигания и пылесосаждения. Загрузка в камеру и последующая выгрузка нагретого скрапа производится посредством используемых в цехе загрузочных бадей, мостовых кранов и передаточных тележек. Для обеспечения максимальной степени дожигания СО в предложенной технологической схеме охлаждение газовой смеси принято двухстадийным. На первой стадии приток воздуха в зазор камеры дожигания и газоотводящего патрубка печи близок к стехиометрическому, что обеспечивает высокую температуру при дожигании. На второй стадии осуществляют основную часть притока воздуха, обеспечивая температуру газовой смеси не выше 450 °С по условиям среднетемпературного нагрева скрапа.

Сопоставительная характеристика вариантов ПН скрапа приведена в табл. 5.

Анализ данных показывает, что среднетемпературный ПН скрапа, учитывая проблему PCDD/F и весьма затратные методы ее решения, представляется рациональным решением при модернизации действующих мини-заводов Украины, в которых установлены ДСП с бадьевой загрузкой скрапа.

В данной работе предложены решения модернизации ДСП на основе изменения геометрии ван-

ны в сторону увеличения ее глубины, энергосберегающих водоохлаждаемых элементов, системы рассредоточенной аспирации и среднетемпературного предварительного нагрева скрапа. Оценка экономии электроэнергии для комплекса решений применительно к 12-тонной ДСП составляет 56...68 кВтч/т, срок окупаемости 0,5...1,3 года. Кроме энергосбережения предложенные решения снижают неорганизованные пылегазовые выбросы на 35 %, повышают эффективность дожигания СО и не вызывают эмиссии токсичных PCDD/F.

Список литературы/References

- Morfeldt, J., Nijs, W., Silveira, S. (2015) The impact of climate targets on future steel production — an analysis based on global energy system model. *J. of Cleaner Production*, **103**, 469–482.
- (2016) *Global steel report*. US Department of Commerce. International Trade Administration. July 2016. <http://trade.gov/steel/pdfs/07192016global-monitor-report.pdf>
- Toulouevski, Yu., Zinurov, I. (2010) *Innovation in electric arc furnaces. Scientific basis for selection*. Berlin, Germany, Springer-Verlag.
- Stovpchenko, G., Projdak, Yu., Kamkina, L. et al. (2008) Low carbon steel manufacture in EAF steelmaking shop. *Archives of Metallurgy and Materials*, **53**(2).
- Kuhn, R. (2005) Continuous off-gas measurement and energy balance in electric arc steelmaking. *ISIJ Int.*, **25**(11), 1587–1596.
- Zuccato *Energia Company Presentation*. <http://www.zuccatoenergia.it/index.php/en> (assessed 11.04.18).
- Grant, M. (2000) Principles and strategy of EAF post-combustion. In: *Proc. of 58-th Electric Furnace Conf.* (Orlando, USA, November 12–15th).
- Toulouevski, Yu., Zinurov, I. (2015) *Electric arc furnace with flat bath. Achievements and prospects*. Springer, Heidelberg–New York–Dordrecht–London.
- Lehner, J., Friedacher, A., Gould, L., Fingerhut, W. (2004) Low-cost solutions for the removal of dioxin from EAF off-gas. *La Metallurgia Italiana*, **4**, 67–70.
- Nagai, T., Sato, Y., Kato, H. et al. (2015) The most advanced power saving technology in EAF. *Introduction to EcoArc*. <https://steelplantech.com/wp-content/uploads/2015/07/The-most-advanced-power-saving-technology-in-EAF-Introduction-to-ECOARC.pdf>
- Eco — friendly and efficient: COSS furnace — continuously optimized shaft system*. <http://www.fuchs-technology.net/en/fulfillment/furnace-systems/coss-furnace.html> (assessed 30.09.2017).

12. Rummler, K., Tunaboylu, A., Ertas, D. (2001) Scrap preheating and continuous charging system for EAF meltshop. *MPT Int.*, **5**, 32–36.
13. Abel, M., Hein, M., Huber, H.-J. (2015) EAF quantum. The future approach to efficient scrap melting. *Steelworld*, June, 91–94. <http://steelworld.com/newsletter/2015/June15/Technology0615-2.pdf>
14. Gottardi, R., Miani, S., Partyka, A., Engin, B. (2008) UH-CP-Elektrolichtbogenofen erreicht Produktionsrate von 320 t-h. *Stahl und Eisen*, **128(8)**, 19–24 (in German).
15. Dorndorf, M., Liese, M., Granderath, R., Schrade, C. (2016) High efficient energy recovery solutions for melt shops. *La Metallurgia Italiana*, **9**, 24–31.
16. Gubynsky, M.V., Tymoshenko, S.M., Shrajber, O.A., Antonets, I.V. (2017) Increase in energy efficiency of electric steelmaking processes by conversion of natural gas with arc furnace waste gases. *Problemy Naukovoї Energetyky: Transact.*, **48(1)**, 60–66 [in Ukrainian].
17. Falkenreck, U., Weisedel, W. (2007) New scrap-based steelmaking process predominantly using primary energy. *MPT Int.*, **3**, 52–55.
18. Tuluevsky, Yu.N., Zinurov, I.Yu., Shver, V.G. (2011) New possibilities of Consteel furnaces. *Elektrometallurgiya*, **6**, 22–27 [in Russian].
19. Egorov, A.V. (1990) Calculation of power and parameters of electric furnaces of ferrous metallurgy. In: *Manual for higher education institutions*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
20. Timoshenko, S. N. (2016) Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace. *Sistemye Tekhnologii*, **3**, 33–39 [in Russian].
21. Kawakami, M., Takatani, R., Brabie, L. (1999) Heat and mass transfer analysis of scrap melting in steel bath. *Tetsu to Hagane*, **85(9)**, 658–665.
22. Mazumdar, D., Guthrie, R. (1995) The physical and mathematical modeling of gas stirred ladle systems. *ISIJ Int.*, **35(1)**, 1–20.
23. Li, J., Provatas, N. (2008) Kinetics of scrap melting in liquid steel: Multipiece scrap melting. *Metallurg. and Mater. Transact.*, **39B(4)**, 268–279.
24. Nakanishi, K., Fujii, T., Szekely, J. (1975) Possible relationship between energy dissipation and agitation in steel processing operations. *Ironmaking & Steelmaking*, **3**, 193–194.
25. Timoshenko, S.N., Gubinsky, M.V. (2016) Increase in energy efficiency of steelmaking process with continuous melting of charge in liquid bath. *Tekhnichna Teplofizyka ta Promyslova Teploenergetyka*, **8**, 174–183 [in Russian].
26. Timoshenko, S. N. (2017) Analysis of energy efficient solutions of a small capacity electric arc furnace and their synthesis in a new generation 15-ton unit. *Suchasni Problemy Metallurgii*, **20**, 78–87 [in Ukrainian].
27. Doroshenko, A.V., Dyadkov, B.P., Timoshenko, S.N., Tishchenko, P.I. (2017) Combined water-cooled electric furnace roof of small capacity. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **5**, 91–95 [in Russian].
28. Timoshenko, N.S., Semko, A.N., Timoshenko, S.N. (2013) Modeling of energy-saving solutions for outgassing from arc steelmaking furnace. *Naukovi Prasi DNTU. Seriya Metallurgiya*, 84–95 [in Russian].
29. Guézennec, A.G., Huber, J.C., Patisson, F.R. et al. (2004) Dust formation by bubble-burst phenomenon at the surface of a liquid steel bath. *ISIJ Int.*, **44(8)**, 1328–1333.

### ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

С. М. Тимошенко<sup>1</sup>, Г. П. Стівченко<sup>2,3</sup>, Ю. В. Костецький<sup>2</sup>, М. В. Губинський<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Донецький національний технічний університет.

85300, Донецька область, м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2. E-mail: mail@donntu.edu.ua

<sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>3</sup>Інжинірингова компанія «Елмет-Рол».

03150, м. Київ, А.с. 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

<sup>4</sup>Національна металургійна академія України.

49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Запропоновано комплекс маловитратних енергоефективних рішень щодо модернізації дугових сталеплавильних печей: глибока ванна, водоохолоджувані панелі з просторовою структурою, система розосередженої аспірації і попередній середньотемпературний нагрів скрапу пілогозовим середовищем з ефективним допалюванням СО. Методами комп'ютерного моделювання показано, що застосування комплексу запропонованих рішень у 120-тонній дуговій сталеплавильній печі дозволяє скоротити енергоспоживання на 56...68 кВт·г/т. Бібліогр. 29, табл. 6, іл. 7.

**Ключові слова:** дугова сталеплавильна піч; енергоефективність; глибока ванна; водоохолоджувані елементи з об'ємною структурою; система розосередженої аспірації; середньотемпературний попередній нагрів скрапу

### WAYS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC ARC FURNACES

S.N. Timoshenko<sup>1</sup>, A.P. Stovchenko<sup>2,3</sup>, Yu.V. Kostetsky<sup>2</sup>, M.V. Gubinsky<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University.

2 Shybankova Sq., 85300, Pokrovsk, Donetsk region, Ukraine. E-mail: mail@donntu.edu.ua

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>3</sup>Engineering company «Elmet-Roll».

P.B. 259, 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

<sup>4</sup>National Metallurgical Academy of Ukraine.

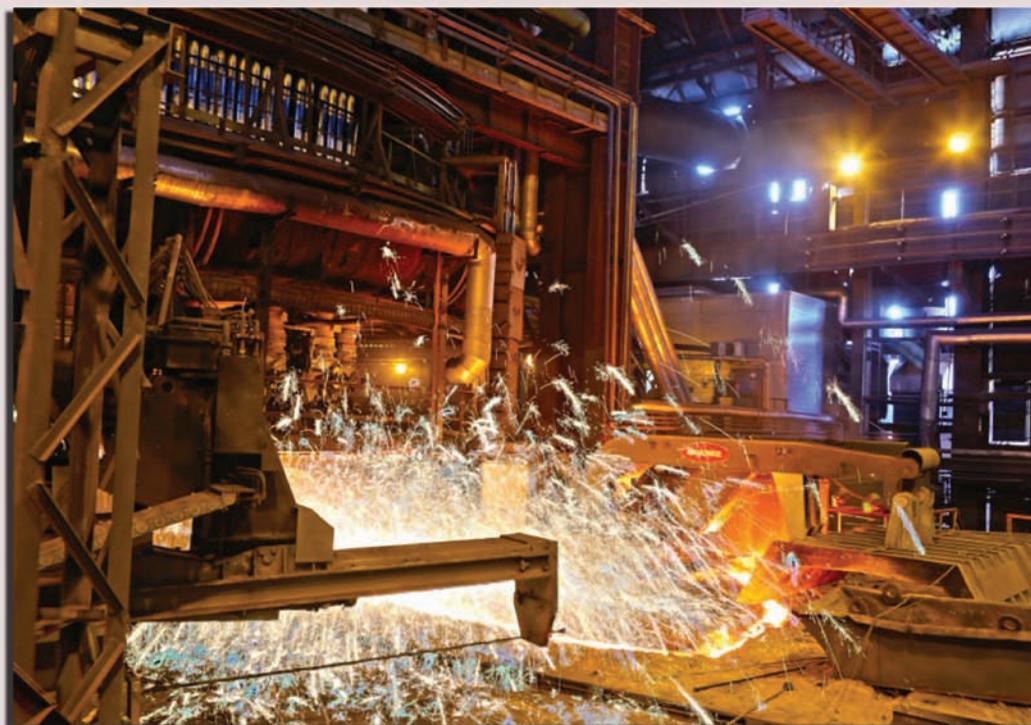
4 Gagarina Ave., 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

A complex of low-cost energy-efficient solutions for the modernization of electric arc furnaces was proposed: a deep pool, water-cooled panels with a spatial structure, a system of distributed aspiration and preliminary medium-temperature heating of a scrap by a powder-gas environment with an efficient extra burning of CO. Applying the methods of computer simulation, it was shown that using a complex of solutions in a 120-ton electric arc furnace can reduce energy consumption by 56...68 kW·h/t. Ref. 29, Tabl. 6, Fig. 7.

**Key words:** electric arc furnace; energy efficiency; deep pool; water-cooled elements with volumetric structure; distributed aspiration system; medium temperature preheating of scrap

Поступила 16.04.2018

### МОДЕРНИЗАЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ НА «АЗОВСТАЛЬ»



Металлургический комбинат «Азовсталь» Группы Метинвест инвестирует почти полмиллиарда гривен в модернизацию систем экологической защиты и охлаждения доменной печи №4. Предприятие поэтапно переходит на замкнутый цикл водоснабжения доменного производства.

В 2014–2016 гг. доменная печь №4 прошла реконструкцию. Были построены двухуровневые крытые литейные дворы с современной системой отвода и утилизации дымовых газов. «Азовсталь» продолжает модернизацию печи для повышения ее экологичности и энергоэффективности.

В ходе капитального ремонта будет заменена футеровка (термостойкая оболочка) печи, построена новая система охлаждения и комплекс химической очистки воды. Замена чугунных элементов термозащиты (холодильных плит) на медные и новая испарительная система охлаждения позволит перейти на оборотное водоснабжение. Таким образом, предприятие полностью откажется от использования морской воды для охлаждения печи.

Ремонт позволит сделать печь еще безопаснее для экологии. Для улучшения герметичности и предотвращения неорганизованных выбросов пыли заменят газоуплотнительный клапан загрузочного устройства. Будет выполнена ревизия системы аспирации подбункерного помещения, очистка газоходов и установка новых циклонов (<https://www.azovpromstal.com>).