

УДК 669.18

**С. П. Еронько**, д-р техн. наук, проф., **Е. В. Ошовская**, канд. техн. наук, доц.,  
**М. И. Прилуцкий**  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк  
**П. А. Петров** канд. техн. наук, доц., **М. П. Петров**  
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», г. Алчевск  
Тел.: +7 949 4055287; E-mail: [ersp52@mail.ru](mailto:ersp52@mail.ru)

## СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ПОДАЧИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ И ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ

*В статье приведены описание конструкций и результаты лабораторных испытаний системы одновременной комплексной подачи порошкообразных материалов в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок.*

**Ключевые слова:** порошковая проволока, шлакообразующая смесь, кристаллизатор, трайб-аппарат, шнековый дозатор.

**S. P. Eronko, E. V. Oshovskaya, M. I. Prilutskiy, P. A. Petrov, M. P. Petrov**

### SYSTEM FOR COMPLEX FEEDING OF FLUX-CORED WIRE AND SLAG-FORMING MIXTURE INTO THE MOLD CASTER

*The article describes the designs and results of laboratory tests of a system for simultaneous complex feeding of powdered materials into the mold of a continuous casting machine.*

**Keywords:** flux-cored wire, slag-forming mixture, crystallizer, wire machine, screw doser.

#### 1. Введение

В настоящее время в сталеплавильном производстве получили широкое распространение два способа ввода в жидкий металл специальных добавок в порошкообразном состоянии, вдуваемых в струе инертного газа или подаваемых в металлической оболочке в виде начиненной ими проволоки. При этом, как показал опыт внедрения внепечной обработки стали на ряде отечественных металлургических предприятий, легкоокисляющиеся модифицирующие добавки целесообразно подавать в жидкий металл непосредственно перед началом его затвердевания, т.е. в промежуточный ковш [1–7] или кристаллизатор [8] машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Присадка порошкообразных материалов непосредственно в кристаллизатор, в сравнении с другими способами подачи реагентов, обеспечивает повышение в 2 – 2,5 раза их усвоения расплавом, что позволяет сократить во столько же раз потери модификаторов и снизить в 3 – 4 раза расход порошковой проволоки. Вместе с тем, реализация способов микролегирования и модифицирования стали на заключительном этапе ее производства требует учитывать то, что современная практика эксплуатации машин непрерывного литья заготовок в обязательном порядке предполагает также непрерывную подачу на зеркало металла в кристаллизаторе шлакообразующих смесей (ШОС) в порошкообразном или гранулированном виде, высокая эффективность использования которых может быть обеспечена только при их механизированном вводе с помощью специальных устройств [9, 10]. В таком случае требуется разрешение противоречия, обусловленного дефицитом свободного места на рабочей площадке возле промежуточного ковша и сложностью размещения дополнительных устройств для выполнения операций, связанных с транспортированием к кристаллизатору необходимых мелкодисперсных добавок.

Данное обстоятельство является мотивацией начала работ по созданию универсального оборудования, позволяющего уменьшить площадь для своего размещения за счет обеспечения реализации одновременной подачи в кристаллизатор порошковой проволоки и шлакообразующей смеси, что является важной научно-практической задачей.

## 2. Содержание и результаты выполненной работы

Сотрудниками кафедр «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша» ДонНТУ и «Машины металлургического комплекса» ДонГТУ на основании предшествующего опыта [11, 12] разработана система комплексной механизированной подачи порошковой проволоки и шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья сортовых заготовок, позволяющая минимизировать площадь, требуемой для размещения двух ее структурных механизмов в непосредственной близости к промежуточному ковшу [13]. Конструктивная схема предложенной системы показана на рисунке 1. Она включает:

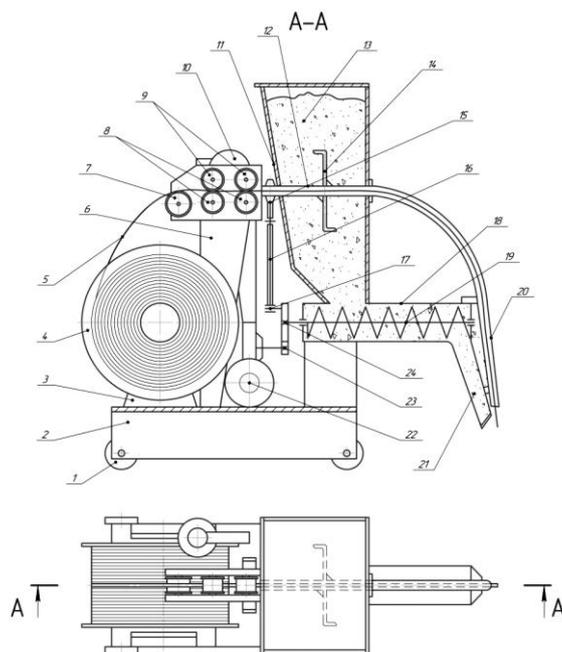


Рисунок 1. Конструктивная схема разработанной системы комплексной механизированной подачи сыпучих материалов в кристаллизатор МНЛЗ

установленную на колесах 1 передвижную платформу 2, несущую питающий бункер 11, к нижней части которого примыкает горизонтально расположенный шнековый дозатор 19, приводимый в действие через зубчатую передачу 23, 24 червячным мотором-редуктором 22 с регулируемой частотой вращения выходного вала. Внутри бункера 11 в подшипниковых опорах размещен пустотельный вал 12 ворошителя 14, поворачиваемого на угол  $90^\circ$  кривошипно-рычажным механизмом 15–17 и устраняющего зависание мелкодисперсной шлакообразующей смеси 13, поступающей к подающему носку 21 шнекового дозатора 19. За бункером на опоре 3 с возможностью вращения установлена катушка 4 с порошковой проволокой 5, подаваемой с помощью трайб-аппарата через полость вала 12 и изогнутую направляющую 20, жестко

связанную с корпусом 18 и подающим носком 21 шнекового дозатора. Трайб-аппарат, корпус которого закреплен на стойке 6, содержит пару ведущих роликов 9, синхронно вращаемых с регулируемой скоростью червячным мотор-редуктором 10. Порошковая проволока 5, сматываемая с катушки 4, направляющим роликом 7 задается в зазор между парой ведущих 9 и парой прижимных роликов 8. Такое конструктивное исполнение предлагаемой системы позволяет осуществлять одновременную регулируемую подачу в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок двух видов дисперсных материалов, выполняющих разные технологические функции. Порошок, которым начинена проволока, после расплавления вступает в реакцию с разливаемой сталью в верхнем ее слое, равномерно покрытом шлакообразующей смесью, устраняющей его прямой контакт с воздушной атмосферой, благодаря чему предотвращается угар легкоокисляющихся реагентов, вводимых в жидкий металл для улучшения его служебных свойств.

Рабочие параметры структурных механизмов предложенной системы комплексной механизированной подачи мелкодисперсных материалов в кристаллизаторы машин непрерывного литья сортовых заготовок определили по ранее разработанной методике, подробно изложенной в работе [14]. В соответствии с нею, исходными данными при расчете рабочих характеристик шнекового питателя являются удельный расход шлакообразующей смеси  $q$  и производительность  $P$  рудья МНЛЗ, определяемая по формуле:

$$P = Sv_3\rho_c, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения отливаемой сортовой заготовки, м<sup>2</sup>;

$v_3$  – скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин;

$\rho_c$  – плотность жидкой стали, кг/м<sup>3</sup>.

Тогда массовый расход ШОС, подаваемой в кристаллизатор, составляет:

$$Q = Pq = Sv_3\rho_cq. \quad (2)$$

Для сортовых квадратных заготовок сечением 100 x 100 мм и 180 x 180 мм, имеющим  $S = 0,01\text{ м}^2$  и  $S = 0,033\text{ м}^2$ , в соответствии с требованиями действующих технологических инструкций, можно принять:  $v_3 = 8\text{ м/мин}$  и  $v_3 = 6\text{ м/мин}$ ;  $q = 0,4 - 0,5\text{ кг/т}$ .

С учетом указанных значений используемых величин, массовый расход шлакообразующей смеси, которые должны обеспечивать шнековые питатели, составляют соответственно 0,22 кг/мин и 0,68 кг/мин.

Требуемая максимальная частота вращения горизонтального шнека определяется по формуле:

$$n_{\text{вш}} = Q / [0,785(D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{в}}^2)l_{\text{в}}\gamma_c\varphi], \quad (3)$$

где  $D_{\text{ш}}$  – наружный диаметр витков шнека;

$d_{\text{в}}$  – диаметре вала шнека;

$l_{\text{в}}$  – шаг витков шнека;

$\gamma_c$  – насыпная плотность шлакообразующей смеси;

$\varphi$  – коэффициент заполнения смесью межвиткового пространства шнека.

При определении частоты вращения шнека конструктивно задаются его размерами, а также значениями  $\gamma_c = 900 \text{ кг/м}^3$  и  $\varphi = 0,5$ . Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные значения рабочих параметров механизма подачи шлакообразующей смеси

Сечение отливаемой заготовки, мм	Скорость вытягивания заготовки, м/мин	Расход стали, т/мин	Расход шлакообразующей смеси, кг/мин	Размеры шнека, мм			Частота вращения шнека, об/мин
				Наружный диаметр витка	Диаметр вала	Шаг витков	
100 x 100	8	0,56	0,22	40	10	30	15
180 x 180	6	1,36	0,68	50	15	40	20

Рабочие параметры механизма подачи порошковой проволоки назначали в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [7, 8]. В соответствии с ними, для сортовых МНЛЗ удельный расход порошковой проволоки при микролегировании или модифицировании должен составлять 0,3 – 0,4 кг на тонну разливаемой стали, а скорость ее подачи в пределах 0,05 – 0,15 м/с, что отражают данные таблице 2.

Таблица 2. Расчетные значения рабочих параметров механизма подачи порошковой проволоки

Сечение отливаемой заготовки, мм	Скорость вытягивания заготовки, м/мин	Расход стали, т/мин	Расход порошковой проволоки, кг/мин	Скорость подачи проволоки, м/с	Угловая скорость вращения подающего ролика, $\text{с}^{-1}$	Частота вращения подающего ролика, об/мин
100 x 100	8	0,56	0,18	0,05	1	10
180 x 180	6	1,36	0,55	0,15	3	30

С целью проверки правильности принятых технических решений и оценки корректности полученных расчетных зависимостей для обоснования конструктивных и энергосиловых параметров предложенной системы комплексной механизированной подачи сыпучих материалов в кристаллизатор МНЛЗ, перед началом проектирования ее промышленного образца, изготовили его лабораторный вариант (фото на рисунке 2), который по масштабу соответствовал условиям отливки сортовой заготовки с поперечным сечением 100 x 100 мм. Экспериментальные исследования проводились с учетом рекомендаций работы [15] по выбору измерительной аппаратуры, позволяющей в режиме реального времени контролировать основные параметры работы изучаемой механической системы, к которым прежде всего относятся технологические нагрузки, преодолеваемые приводами ее структурных механизмов.

В соответствии с планом эксперимента, прежде всего, предполагалось получить информацию о технологических нагрузках, действующих на приводы структурных механизмов разработанной системы комплексной подачи порошкообразных материалов в кристаллизатор МНЛЗ.

Для контроля моментов сопротивления, преодолеваемых приводами механизмов подачи шлакообразующей смеси и порошковой проволоки использовали

тензорезисторный преобразователь, работающий в комплексе с усилителем и 12-разрядным многоканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) L-CARD, плата которого установлена на шине ISA IBM-совместимой ПЭВМ.

Структурная схема измерительного комплекса приведена на рисунке 3.

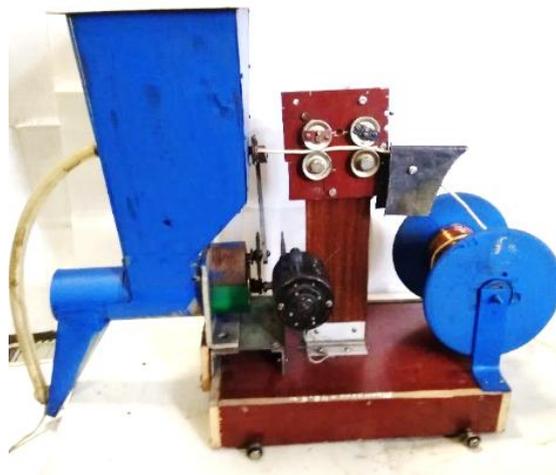


Рисунок 2. Лабораторный образец предложенной системы комплексной механизированной подачи сыпучих материалов в кристаллизатор МНЛЗ

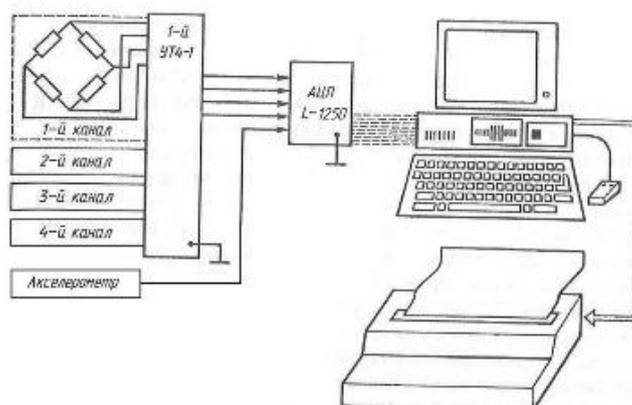
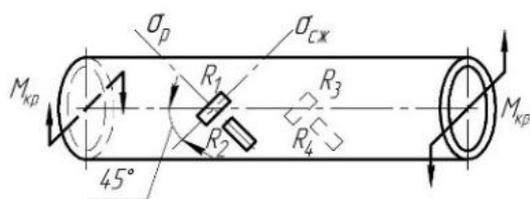


Рисунок 3. Структурная схема применявшегося контрольно-измерительного комплекса

Тензорезисторный преобразователь для контроля крутящего момента выполнен в виде металлической гильзы (рисунок 4 а), на поверхность которой под углом 45° к ее продольной оси наклеены фольговые тензодатчики сопротивлением 200 Ом, включенные в мостовую схему. При этом соблюдалось условие:

$$R_1 \cdot R_2 = R_3 \cdot R_4. \quad (4)$$

Сама гильза установлена в подшипниках скольжения и помещена в металлическую коробку с прозрачной передней стенкой (фото на рисунке 4 б). Для съема электрического сигнала с измерительной диагонали моста сопротивлений и подключения к нему источника питания на гильзе установлены изолированные от ее корпуса медные кольца, контактирующие своей наружной поверхностью с токопроводящими шинами, концы которых соединены с разъемом, вмонтированным в стенку коробки.



а

б

Рисунок 4. Схема размещения тензодатчиков на поверхности гильзы преобразователя (а) и его конструктивное исполнение (б)

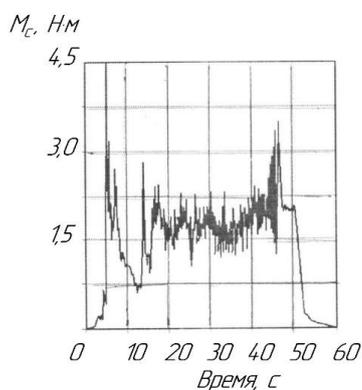
С помощью указанного измерительного комплекса, последовательно используя преобразователь в качестве муфты, передающей крутящий момент от выходного вала мотор-редуктора к рабочему органу (фото на рисунке 5), получили данные о значениях нагрузки, действующей на приводы обоих механизмов. На рисунке 6 показаны виды регистрировавшихся сигналов.



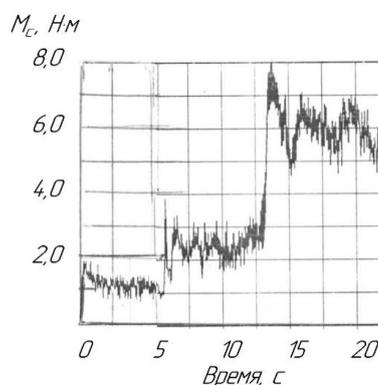
а

б

Рисунок 5. Место установки тензорезисторного преобразователя при контроле крутящих моментов, развиваемых приводами шнекового дозатора (а) и трайб-аппарата (б)



а



б

Рисунок 6. Сигналы, зарегистрированные при контроле крутящих моментов, требуемых для работы шнекового дозатора (а) и трайб-аппарата (б)

Результаты выполненных измерений свидетельствуют о том, что момент сопротивления, действующий на привод механизма подачи проволоки в кристаллизатор МНЛЗ, включает три составляющие, которые вызваны:

- сопротивлением вращению катушки с проволокой (15 %);
- сопротивлением в трайб-аппарате (20 %);
- сопротивлением движению проволоки в направляющей изогнутой трубе (65 %).

В ходе лабораторного эксперимента была подтверждена правильность технических решений, заложенных в конструкцию разработанной системы механизированной подачи порошкообразных материалов. Ее структурные механизмы функционировали в устойчивом режиме обеспечивая регулируемый ввод порошковой проволоки и мелкодисперсной шлакообразующей смеси. Благодаря исключению подвисания сыпучего материала в полости бункера над заборным отверстием шнекового дозатора за счет наличия ворошителя, поворотные лопасти которого не допускают образования свода в слое порошкообразной смеси, ее расход в задаваемых пределах легко регулируется изменением частоты вращения шнека. Контроль массового расхода шлакообразующей смеси, выполнявшийся с использованием высокоточных электронных весов, подтвердил высокую равномерность ее подачи. В качестве примера на рисунке 7 показана зависимость изменения во времени интенсивности подачи шлакообразующей смеси, зафиксированная при частоте вращения шнека 30 об/мин с наружным диаметром 50 мм.

Размещение на одной подвижной платформе двух механизмов, обеспечивающих одновременное выполнение операций, связанных с регулируемой подачей порошкообразных материалов в жидкую сталь по ходу ее непрерывной разливки, позволяет решить поставленную технологическую задачу в условиях дефицита свободного места на рабочей площадке промежуточного ковша МНЛЗ.

Информация, полученная в ходе лабораторных экспериментов, использована при расчете и конструировании опытно-промышленного образца системы комплексной механизированной подачи в кристаллизатор МНЛЗ двух видов порошкообразных материалов, предназначенной для реализации эффективных технологий модифицирования и микролегирования стали с использованием инновационного отечественного оборудования [16]. Подготовленная техническая документация,

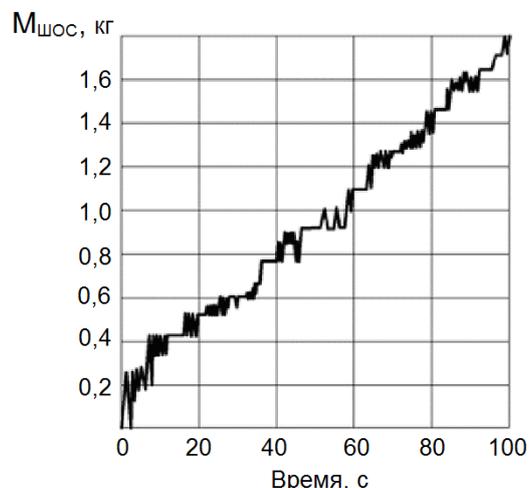


Рисунок 7. Зафиксированная расходная характеристика шнека диаметром 50 мм при частоте его вращения 30 об/мин

в соответствии с действующим соглашением о научно-техническом сотрудничестве между кафедрой МОЗЧМ ДонНТУ и ГУ ПКТИ (г. Донецк), нашла применение в качестве базовой тематики заданий при прохождении преддипломной практики в проектно-конструкторском отделе данного государственного учреждения студентами по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» магистерской программы «Инжиниринг и технический менеджмент металлургического оборудования».

### 3. Заключение

Предлагаемая система механизированной подачи реагентов позволит сократить интервал времени между вводом модификатора или лигатуры в расплав и началом его затвердевания, приблизить продолжительность этого интервала к длительности образования максимального числа активных центров кристаллизации и тем самым повысить эффективность процессов модифицирования и микролегирования стали благодаря повышению усвоения расплавом вводимых реагентов, а также снижению расхода порошковой проволоки. Выполненная разработка будет способствовать решению задач, намеченных принятой в стране программой импортозамещения, поскольку дает возможность заместить в сталеплавильных цехах металлургических предприятий отечественными аналогами зарубежное технологическое оборудование, поставки которого запрещены санкциями, принятыми европейскими странами.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Обработка стали порошковой силикокальциевой лентой в промежуточном ковше МНЛЗ / О. В. Носоченко [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. – 1985. – № 8. – С. 54.
2. Бабанин, А. Я. Обработка стали порошковой проволокой с силикокальцием в промежуточном ковше / А. Я. Бабанин, Л. С. Лепихов, О. В. Носоченок // Сталь. – 1998. – № 1. – С. 21 - 22.
3. Внепечная обработка металла порошковой проволокой с различными составами наполнителей / А. Ф. Каблуковский [и др.] // Труды шестого конгресса сталеплавильщиков, г. Череповец 17 – 19 октября 2000г.- С. 364 – 369.
4. Отработка технологии доводки металла порошковой проволокой / А. Ф. Сарычев [и др.] // Труды седьмого конгресса сталеплавильщиков, г. Магнитогорск 15 – 17 октября 2002 г.- С. 411 – 412.
5. Освоение технологии внепечной обработки различных групп марок стали боросодержащей порошковой проволокой на РУП «БМЗ» / Д. А. Дюдкин [и др.] // Труды восьмого конгресса сталеплавильщиков, г. Нижний Тагил 18 – 22 октября 2004 г.- С. 354 – 356.
6. Голубцов, В. А. Сравнение способов модифицирования стали в ходе внепечной обработки / В. А. Голубцов, А. А. Воронин, В. Е. Рощин // Труды восьмого конгресса сталеплавильщиков, г. Нижний Тагил, 18 – 22 октября 2004 г.- С. 411 – 418.
7. Модифицирование металла нанопорошковыми инокуляторами на сортовой МНЛЗ для повышения качества проката // Е. В. Протопопов [и др.] // Известия вузов: Черная металлургия, 2013.- № 6.- С. 33 – 35.
8. Протасов, А. В. Технологические комплексы для обработки расплавленных металлов инъекционной проволокой / А. В. Протасов, Б. А. Сивак, В. И. Золотухин. – Старый Оскол: ТНТ, 2020.- 376 с.

9. Дидович, С. В. Эффективность использования современной системы подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ / С. В. Дидович, А. М. Столяров, Д. В. Юрченко // Наука и производство Урала. – 2015. – № 11. – С. 61 – 65.

10. Ганин, Д. Р. Механизация подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор МНЛЗ-2 АО «Уральская сталь» / Д. Р. Ганин, А. В. Нефедов, М. И. Мурзин // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2017. – № 1. – С. 34 – 41.

11. Опыт проектирования и промышленного применения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы слябовых МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Металлург.- 2020.- № 3.- С. 51 - 57.

12. Опыт разработки и внедрения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». - 2020.- Том 76. № 10.- С. 994 – 1003.

13. Разработка и модельные испытания системы комплексной подачи порошковой проволоки и шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Машиноведение: сб. материалов науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов г. Донецк 24 – 25 июня 2024 г.- Донецк: ДонНТУ, 2024.- С. 19 – 25.

14. Расчет и конструирование системы механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор блюмовой МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Сборник научных трудов ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ».- 2021.- № 24 (67).- С. 91 – 98.

15. Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства: учебное пособие / С. П. Еронько [и др.]. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021.- 324 с.

16. Инновационное металлургическое оборудование. Сталеплавильное производство: учебное пособие / С. П. Еронько [и др.]. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023.- 276 с.

Поступила в редколлегию 14.05.2025 г.