

<sup>1,\*</sup>Еронец С. П., <sup>1</sup>Ошовская Е. В., <sup>2</sup>Петров П. А., <sup>2</sup>Зозуля Ф. С., <sup>1</sup>Прилуцкий М. И.

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

<sup>2</sup>Донбасский государственный технический университет

\*E-mail: ersp52@mail.ru

## СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДОЗАТОРОВ СИСТЕМ ПОДАЧИ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ МНЛЗ

*Отображены конструктивные особенности систем механизированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок крупного прямоугольного сечения. С использованием натурных моделей выполнен сравнительный анализ параметров работы структурных механизмов данных систем, обеспечивающих перемещение бункеров с шнековыми дозаторами вдоль широких стенок кристаллизаторов во время подачи в них мелкодисперсных материалов с целью улучшения условий формирования поверхности отливаемой заготовки. Полученная информация будет полезна при разработке модернизированных образцов оборудования данного класса.*

**Ключевые слова:** шлакообразующая смесь, бункер, шнековый дозатор, механизмы перемещения, рабочие параметры передач.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Современная технология непрерывной разливки стали предполагает в обязательном порядке использование сыпучей шлакообразующей смеси (ШОС), подаваемой на зеркало металла в кристаллизатор с целью улучшения условий силового взаимодействия с его рабочими стенками формирующейся твердой корки отливаемой заготовки [1, 2]. При этом высокая эффективность использования указанных смесей может быть обеспечена лишь в случае их механизированной подачи с помощью специальных систем, в состав которых входит механизм, обеспечивающий возвратно-поступательное передвижение дозирующего устройства вдоль широкой стенки кристаллизатора. Для этой цели практическое применение получили механизмы на основе винтовых, речных и цепных передач [3, 4].

Выбор типа механической передачи в составе привода является одной из важных инженерных задач, решаемых при разработке перспективных образцов технологического оборудования на основе технико-экономического сопоставления их досто-

инств и недостатков. Варианты использования передач сравнивают с учетом их массы, габаритов, обеспечиваемого коэффициента полезного действия, а также стоимости проектирования, изготовления и эксплуатации. На принятие окончательной версии конструктивного исполнения создаваемого устройства существенно влияет предшествующий опыт, накопленный специалистами в ходе проводившихся ранее изысканий в данной области науки и техники [5].

**Целью работы** является получение экспериментальным путем достоверной информации об энергосиловых параметрах трех механизмов, предназначенных для реализации равномерной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок прямоугольного поперечного сечения.

**Изложение материала и результатов исследования.** Экспериментальные исследования проводились в соответствии с действующим соглашением о научно-техническом сотрудничестве между кафедрами «Механическое оборудование заводов черной металлургии имени В. Я. Седуша»

Донецкого национального технического университета и «Машины металлургического комплекса» Донбасского государственного технического университета.

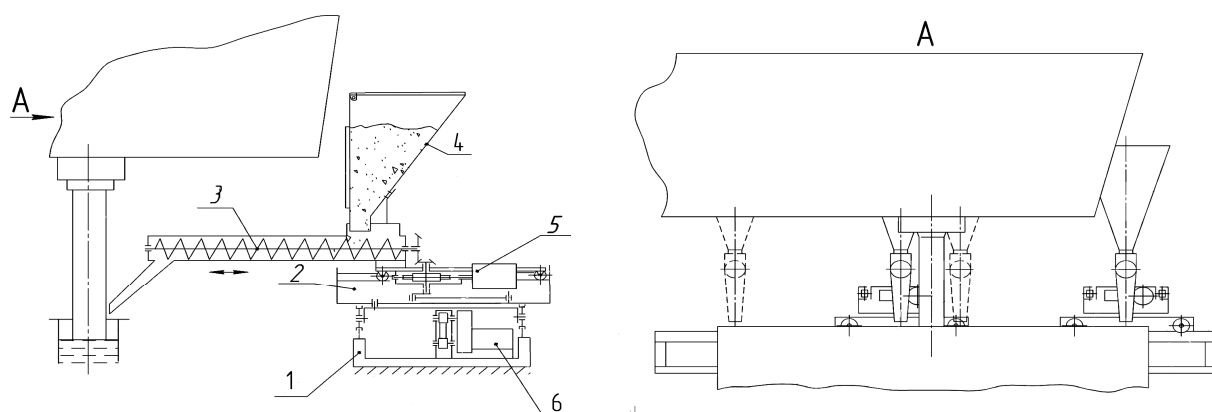
Обеспечения идентичных условий функционирования трех сопоставляемых механических передач при минимальных затратах можно достичь методом натурного (физического) моделирования [6]. В связи с этим спроектировали действующую модель системы механизированной подачи ШОС в кристаллизатор при отливке заготовок особо крупного прямоугольного сечения [7], схема которой показана на рисунке 1. Она включает два бункера с сыпучей смесью, снабженные шнековыми дозаторами, каждый из которых размещен на тележке с возможностью относительно возвратно-поступательного передвижения между широкими стенками кристаллизатора от привода вращения шнека, а синхронное возвратно-поступательное передвижение обеих тележек вдоль его широких стенок осуществляется с помощью специального механизма, установленного в нижней части системы и при необходимости легко сменяемого другим аналогом.

Благодаря тому, что система снабжена двумя дозаторами, подающими смесь раздельно на зеркало металла в кристаллизаторе в зоны, разграниченные погружным

стаканом, а каждый из дозаторов при этом совершает движение одновременно в продольном и поперечном направлениях, удастся повысить степень равномерности распределения шлакообразующей смеси по всей свободной поверхности жидкой стали.

На основании расчетных данных изготовили в масштабе 1:2 лабораторный образец разработанной системы подачи ШОС (фото на рис. 2), на котором предполагалось провести сопоставительные испытания трех механизмов передвижения тележек. Для этого в соответствующем масштабе выполнили также три варианта привода механизма передвижения тележек соответственно с винтовой, цепной и реечной передачами, конструктивные схемы и натурное исполнение которых показаны на рисунках 3–5.

Механизм с винтовой передачей (рис. 3) включает несущую пустотелую балку 4 прямоугольного сечения и установленный на ней в подшипниковых опорах 5 и 9 ходовой винт 3, снабженный гайкой 2 с закрепленным на ней вертикальным стержнем 7, к резьбовому хвостовику которого с помощью нажимной гайки 8 прикреплена тяга 6 с выполненными на концах отверстиями для подсоединения к ней тележек. Вращение ходового винта обеспечивает электродвигатель постоянного тока 11 через зубчатую передачу 10 и муфту 1.



1 — рама; 2 — тележка; 3 — шнековый питатель; 4 — бункер; 5 — привод перемещения питателя;  
6 — общий привод механизма передвижения тележек

Рисунок 1 — Конструктивная схема системы механизированной подачи ШОС при отливке слябов особо крупного прямоугольного сечения

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

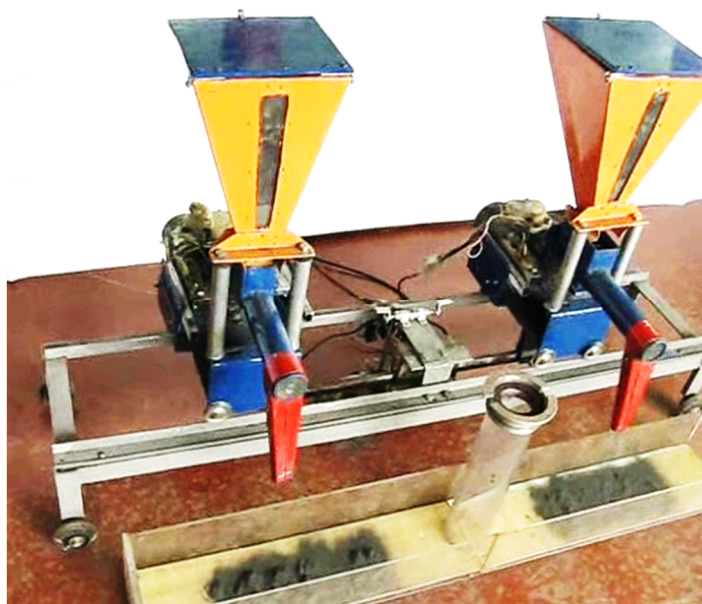
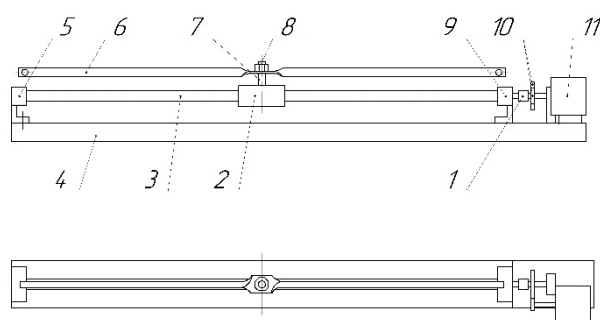


Рисунок 2 — Действующая натурная модель системы механизированной подачи ШОС в кристаллизаторы при литье заготовок особо крупного прямоугольного сечения

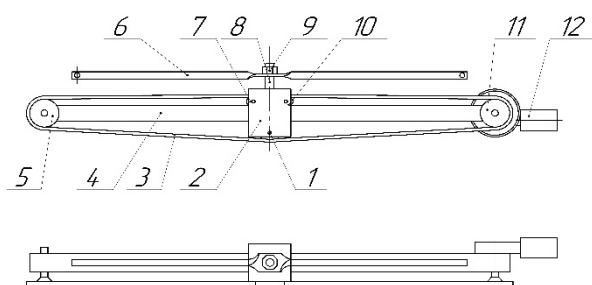


*a*



*б*

Рисунок 3 — Конструктивная схема (*a*) и натурное исполнение (*б*) винтового механизма передвижения тележек



*a*



*б*

Рисунок 4 — Конструктивная схема (*a*) и натурное исполнение (*б*) цепного механизма передвижения тележек



Рисунок 5 — Конструктивная схема (а) и натурное исполнение (б) реечного механизма передвижения тележек

Механизм с цепной передачей (рис. 4) состоит из несущей пустотелой балки 4 квадратного сечения с закрепленными на концах с возможностью относительного вращения ведущей 11 и ведомой 5 звездочками, которые охватывает пластинчатая цепь 3, связанная своими концами посредством пальцев с корпусом каретки 2. Данная каретка имеет возможность передвижения вдоль несущей консоли благодаря наличию двух верхних 7, 10 и одного нижнего 1 роликов. На каретке жестко закреплен вертикальный стержень 8, удерживающий своим верхним резьбовым хвостовиком горизонтально расположенную тягу 6, зафиксированную гайкой 9 и имеющую на концах отверстия для соединения с тележками. Вращение ведущей звездочки осуществляет червячный мотор-редуктор постоянного тока 12.

В состав реечного механизма передвижения тележек (рис. 5) входит вертикальная клеть 5, внутри которой размещена зубчатая рейка 4, находящаяся в зацеплении с шестерней, которая закреплена на одном валу с коническим зубчатым колесом 3, сцепляемым с конической шестерней 2, жестко закрепленной на хвостовике выходного вала червячного мотор-редуктора 1 постоянного тока. Поступательное движение зубчатой рейки, имеющей на концах отверстия для соединения с тележками, обеспечивается с помощью роликов 7 и 8, установленных между ней и несущей пластиной 6.

Использование в приводах механизмов электродвигателей постоянного тока позволяло сравнительно просто осуществлять регулирование скорости и изменение направления передвижения тележек относительно модели кристаллизатора, а наличие в блоке питания вольтметра и амперметра — контролировать напряжение и силу тока в электрической сети привода во время работы каждого механизма.

Из трех представленных вариантов механических передач предполагалось выбрать один, являющийся оптимальным, т. е. обладающим возможно большими достоинствами (высокая надежность, малая масса, требуемая точность позиционирования) при минимальных недостатках (низкий КПД, значительные габариты, сложность и высокая стоимость изготовления).

В качестве критерия, позволяющего сопоставить энергосиловые параметры сравниваемых механизмов, приняли мощность, развиваемую их приводами при одновременном передвижении обеих тележек вдоль широких стенок модели кристаллизатора с учетом энергетических потерь, обусловленных силовым взаимодействием элементов системы.

Теоретическое значение мощности, которое должен развить привод для преодоления технологической нагрузки, действующей на механизм при одновременном передвижении двух тележек, определяли по известной формуле

$$N = 2(W \cdot v) / \eta_0,$$

где  $W$  — суммарное сопротивление передвижению одной тележки;

$v$  — линейная скорость движения тележки;

$\eta_0$  — общий КПД механизма.

Суммарное сопротивление передвижению тележки

$$W = f(G_T + G_6 + G_d) b,$$

где  $f$  — приведенный коэффициент сопротивления передвижению тележки;

$G_T$  — сила тяжести тележки;

$G_6$  — сила тяжести бункера с заполненной смесью;

$G_d$  — сила тяжести шнекового дозатора.

Приведенный коэффициент сопротивления передвижению тележки

$$f = (\mu d + 2k) / D,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения в подшипниковой опоре ходового колеса тележки;

$d$  — диаметр цапфы;

$k$  — коэффициент трения качения между ходовым колесом тележки и направляющей;

$D$  — наружный диаметр ходового колеса тележки;

$b$  — коэффициент, учитывающий дополнительное сопротивление, вызванное трением реборд колес о направляющие.

Перед началом эксперимента предварительно с помощью измерительного инструмента и электронного динамометра зафиксировали значения геометрических и силовых параметров, входящих в приведенные зависимости, и с их использованием получили расчетное значение силы сопротивления передвижению тележки, которое сопоставили с измеренным. Расхождение между ними не превысило 10 %.

В ходе проведенных лабораторных исследований оценили энергетические потери, обусловленные характером силового взаимодействия структурных элементов изучаемой системы. С этой целью по определенному суммарному значению си-

лы сопротивления передвижению двух тележек рассчитали крутящие моменты, требуемые для вращения у соответствующих механизмов ходового винта, звездочки и шестерни, обеспечивающих реализацию указанного поступательного движения обеих тележек. Затем с помощью динамометра и рычага, поочередно жестко прикрепляемого к задним хвостовикам валов приводных электродвигателей, измерили моменты, необходимые для их поворота у каждого из трех механизмов. После этого с учетом известных передаточных чисел механизмов и предварительно рассчитанных крутящих моментов для их приводных структурных элементов определяли значения моментов, которые необходимы для приведения в действие системы без учета имеющихся энергетических потерь. Сопоставив расчетные и экспериментально полученные значения моментов, действующие на валах двигателей, получили данные о реальных коэффициентах полезного действия у каждого из механизмов. Для удобства сопоставления и анализа полученной информации она сведена в таблицу 1.

Наименьший КПД, равный 0,68, обеспечивался при работе винтовой передачи. У двух других значение данного показателя были близкими и составляли 0,90–0,93. При этом потребляемая приводом электрическая мощность в значительной мере зависит от скорости передвижения тележек, о чем свидетельствуют данные, приведенные в таблице 2.

Для нормального функционирования сравнивавшихся механизмов передвижения тележек во время работы системы механизированной подачи ШОС необходимо соблюдать несколько общих и особых требований.

Поскольку все рассматриваемые механические передачи являются открытыми, то при их эксплуатации важно обеспечить соответствующие условия смазывания контактных поверхностей деталей, образующих рабочую пару.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

Таблица 1

Зафиксированные параметры функционирования механических передач в составе системы подачи шлакообразующей смеси

Тип механизма передвижения тележек	Масса, кг	Сила сопротивления передвижению тележки, Н		Требуемый крутящий момент для вращения рабочего элемента, Н·м	Передачное число зубчатых передач	Крутящий момент на валу двигателя, Н·м		КПД механизма, %
		Расчетное значение	Измеренное значение			Расчетное значение*	Измеренное значение	
Винтовой	3,1	12,1	12	0,01	2,5	0,025	0,036	68
Цепной	2,8			0,18	60	0,003	0,0033	90
Реечный	2,3			0,18	60	0,003	0,0032	93

\*Расчетное значение представлено с учетом передаточного числа

Таблица 2

Потребляемая приводом механизма передвижения тележек электрическая мощность при задаваемой скорости их перемещения

Тип механизма	Скорость передвижения тележек, м/с	Напряжение в электрической цепи привода механизма $U$ , В	Сила тока $I$ , А	Потребляемая приводом электрическая мощность $P$ , Вт, (В·А)
Винтовой	0,02	12	3	36
	0,03	13	3,5	39,5
	0,04	15	4	60
	0,05	17	4,5	76,5
Цепной	0,02	12	1	12
	0,03	15	1,1	16,5
	0,04	17	1,3	22,1
	0,05	20	1,4	28
Реечный	0,02	12	1	12
	0,03	16	1,2	19,2
	0,04	19	1,4	26,6
	0,05	22	1,5	33,0

У механизма с цепной передачей очень важно добиться нахождения обеих звездочек строго в одной вертикальной плоскости, а также поддержания требуемого натяжения пластинчатой цепи. При невыполнении указанных условий возможно заедание передачи или соскок самой цепи.

У механизма с винтовой передачей при задаваемых скоростях передвижения тележек ходовой винт должен вращаться с частотой 600 об/мин и более, поэтому при его изготовлении необходимо обеспечить

минимально возможное радиальное биение относительно продольной оси, чтобы уменьшить поперечный изгиб под действием центробежных сил и снизить сопротивление вращению относительно гайки, вызывающее перегрузку привода, о чем свидетельствует кратное увеличение тока в электрической цепи в сравнении с цепным и реечным механизмами.

Таким образом, по комплексу показателей эффективности функционирования в составе системы подачи шлакообразующей

смеси в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок наибольшую перспективу имеет механизм с цепной передачей, что получило практическое подтверждение в ходе промышленного применения такого типа оборудования в конвертерных цехах двух металлургических комбинатов, спроектированного сотрудниками кафедры МОЗЧМ ДонНТУ и составившего достойную конкуренцию зарубежным аналогам [8]. Данное обстоятельство имеет важное значение в деле успешного решения задач программы импортозамещения, принятой в Российской Федерации.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Полученные результаты экспериментальных исследований с использованием действующих натуральных мо-

делей позволили установить особенности работы изучаемого механизма передвижения тележек системы подачи ШОС в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок крупного прямоугольного сечения и выдать практические рекомендации по выбору рациональных конструктивных схем при проектировании оборудования, предназначенного для обслуживания современных МНЛЗ. Исследования, связанные с созданием передовых образцов устройств механизированной подачи ШОС, следует продолжить в направлении их подключения к системе автоматизированного управления работой комплекса оборудования, обеспечивающего скоростную непрерывную разливку стали.

#### Список источников

1. *Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов [и др.]. Донецк : ДонНТУ. 2002. 536 с.*
2. *Куклев А. В., Лейтес А. В. Практика непрерывной разливки стали. М. : Металлургия, 2011. 432 с.*
3. *Ганин Д. Р., Лицин К. В., Шевченко Е. А. Обзор и анализ устройств для подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2018. № 1. С. 58–64.*
4. *Повышение технико-экономической эффективности использования шлакообразующих смесей при их механизированной подаче в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Научно-технические технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2024. Вып. 78. С. 51–59.*
5. *Опыт разработки и внедрения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2020. Т. 76. № 10. С. 994–1003.*
6. *Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства : учебное пособие / С. П. Еронько [и др.]. Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 324 с.*
7. *Еронько С. П., Ющенко М. В., Шлемко С. В. Расчет и конструирование системы дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ при производстве слэбов сверхкрупного сечения // Металлургические процессы и оборудование. 2011. № 1. С. 10–17.*
8. *Повышение технико-экономической эффективности использования шлакообразующих смесей при их механизированной подаче в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Научно-технические технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2024. Вып. 4 (78). С. 51–59. EDN HWCOKS*

© Еронько С. П., Ошовская Е. В., Прилуцкий М. И.  
 © Петров П. А., Зозуля Ф. С.

*Рекомендована к печати к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонНТУ Зинченко А. М.,  
 д.т.н., проф., зав. каф. ОПМ ДонНТУ Нечепаевым В. Г.*

Статья поступила в редакцию 03.10.2024.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Ерньоко Сергей Петрович**, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. механического оборудования заводов черной металлургии им. В. Я. Седуша  
Донецкий национальный технический университет,  
г. Донецк, Россия,  
e-mail: ersp52@mail.ru

**Ошовская Елена Владимировна**, канд. техн. наук, доцент каф. механического оборудования заводов черной металлургии им. В. Я. Седуша  
Донецкий национальный технический университет,  
г. Донецк, Россия

**Петров Павел Александрович**, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса  
Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Россия

**Зозуля Федор Сергеевич**, аспирант каф. машин металлургического комплекса  
Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Россия

**Прилуцкий Максим Игоревич**, аспирант каф. механического оборудования заводов черной металлургии им. В. Я. Седуша  
Донецкий национальный технический университет,  
г. Донецк, Россия

**\*Yeronko S. P., Oshovskaya E. V.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, \*e-mail: ersp52@mail.ru), **Petrov P. A., Zozulya F. S.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia), **Prilutskiy M. I.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia)

**COMPARATIVE ANALYSIS OF MOTION MECHANISMS OF THE AUGERS SLAG-FORMING MIXTURES FEEDING SYSTEMS INTO CCM CRYSTALLIZERS**

*Design features of systems for mechanized feeding of slag-forming mixture into crystallizers of continuous casting machines for large rectangular billets are presented. With the use of full-scale models, a comparative analysis of parameters of the structural mechanisms of these systems, providing the motion of bunkers with dosing augers along the wide walls of crystallizers during the feeding of finely dispersed materials to improve the conditions of surface formation of the molded billet is carried out. The information obtained will be useful in the development of modernized models of this class of equipment.*

**Key words:** mould powder, bunker, dosing auger, movement mechanism, gear performance parameters.

**References**

1. Smirnov A. N. [et al.] Continuous casting processes [Processy nepreryvnoj razlivki]. Donetsk : DonNTU, 2002. 536 p. (rus)
2. Kuklev A. V., Lejtes A. V. Practice of continuous steel casting [Praktika nepreryvnoj razlivki stali]. M. : Metallurgizdat, 2011. 432 p. (rus)
3. Ganin D. R., Licin K. V., Shevchenko E. A. Review and analysis of devices for feeding slag-forming mixtures into crystallizers of continuous casting machines [Obzor i analiz ustrojstv dlya podachi shlakoobrazuyushchih smesej v kristallizatory mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok]. Ferrous Metallurgy. Bulletin of the Institute "Chermetinformaciya". 2018. No. 1. Pp. 58–64. (rus)
4. Yeronko S. P. [et al.] Increase of technical and economic efficiency of slag-forming mixtures use at their mechanized feeding into CCM crystallizers [Povyshenie tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya shlakoobrazuyushchih smesej pri ih mekhanizirovannoj podache v kristallizatory



MNLZ]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2024. Iss.78. Pp. 51–59. (rus)

5. Yeronko S. P. [et al.] Experience in development and implementation of systems for mechanized supply of slag-forming mixtures to CCM crystallizers [Opyt razrabotki i vnedreniya sistem mekhanizirovannoy podachi shlakoobrazuyushchih smesey v kristallizatory MNLZ]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of the Institute “Chermetinformaciya”*. 2020. Vol. 76. No. 10. Pp. 994–1003. (rus)

6. Yeronko S. P. [et al.] Physical modeling of technical systems of steelmaking production: textbook [Fizicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem staleplavil'nogo proizvodstva: uchebnoe posobie]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2021. 324 p. (rus)

7. Yeronko S. P., Yushchenko M. V., Shlemko S. V. Calculation and design the system of metered feeding of slag-forming mixture into the CCM crystallizer during the production of slabs of extra-large cross-sections [Raschet i konstruirovaniye sistemy dozirovannoy podachi shlakoobrazuyushchej smesi v kristallizator MNLZ pri proizvodstve slyabov sverhkrupnogo secheniya]. *Metallurgical processes and equipment*. 2011. No. 1. Pp. 10–17. (rus)

8. Yeronko S. P. [et al.] Increasing the technical and economic efficiency of mould powders for their mechanized feeding into CCM crystallizers [Povysheniye tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya shlakoobrazuyushchih smesey pri ih mekhanizirovannoy podache v kristallizatory MNLZ]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2024. Iss. 4 (78). Pp. 5–59. (rus)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Yeronko Sergey Petrovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after prof. Sedush V. Ya.  
Donetsk National Technical University,  
Donetsk, Russia,  
e-mail: ersp52@mail.ru

**Oshovskaya Elena Vladimirovna**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after prof. Sedush V. Ya.  
Donetsk National Technical University,  
Donetsk, Russia

**Petrov Pavel Aleksandrovich**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Russia

**Zozulya Fyodor Sergeievich**, Postgraduate of the Department of Metallurgical Complex Machines  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Russia

**Prilutskiy Maxim Igorevich**, Postgraduate of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after prof. Sedush V. Ya.  
Donetsk National Technical University,  
Donetsk, Russia