

УДК 669.18

д.т.н. Еронько С. П., Цыхмистро Е. С.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР),
к.т.н. Петров П. А., Зозуля Ф. С.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ В КРИСТАЛЛИЗАТОР БЛЮМОВОЙ МНЛЗ

Приведены конструктивные особенности, методика расчета энергосиловых параметров и результаты модельных исследований системы механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор блюмовой МНЛЗ. Практическое применение предложенной разработки обеспечит равномерное распределение смеси по свободной поверхности жидкой стали, за счет чего улучшатся условия формирования поверхности отливаемой заготовки и снизится расход подаваемых материалов.

Ключевые слова: непрерывная разливка, кристаллизатор, шлакообразующая смесь, бункер, шнековый дозатор, расход смеси, крутящий момент, мощность привода.

Как известно, в настоящее время доля стали, разливаемой на МНЛЗ, достигла 98 %. При этом технология непрерывного литья заготовок и оборудование для ее реализации постоянно совершенствуются с целью достижения наилучшего соотношения между ценой и качеством получаемой продукции [1]. К одной из мер, позволяющих достичь требуемых показателей качества непрерывно литой заготовки, относят применение шлакообразующих смесей (ШОС), способствующих улучшению условий формирования корочки слитка, стабилизации функционирования механизма качения кристаллизатора и равномерности вытягивания из него слитка [2].

На большинстве металлургических предприятий подачу смесей осуществляют вручную, несмотря на то, что еще в середине 60-х годов минувшего века были получены первые патенты на изобретения, связанные с механизацией этой операции. За отмеченный промежуток времени запатентованы десятки конструкций устройств, предназначенных для этой цели, однако лишь некоторые из них получили промышленное применение, что обусловлено сложностью исполнения предложенных систем и нерациональностью энергосиловых параметров их структурных механизмов.

В связи с этим совершенствование конструкции и обоснование рациональных рабочих параметров систем механизированной подачи ШОС являются важными научно-прикладными задачами, которые имеют особую значимость для условий отливки заготовок крупного и среднего сечений.

Анализ литературных данных показал, что в данной области преобладают изыскания, связанные с разработкой новых систем подачи ШОС в кристаллизаторы слябовых МНЛЗ [3, 4]. Информация о положительном опыте применения подобных систем при отливке блюмовых заготовок практически отсутствует, что является мотивацией для проведения исследований, связанных с разработкой конструкции и обоснованием рациональных параметров работы устройств, позволяющих осуществлять регулируемую подачу с заданной интенсивностью мелкодисперсных материалов в кристаллизаторы блюмовых МНЛЗ. При этом требуются новые технические решения, направленные на обеспечение высокой степени равномерности распределения ШОС на зеркале металла в кристаллизаторе, а также облегчение эксплуатации и обслуживания структурных механизмов, входящих в состав используемой системы.

Целью работы являлось создание установки, имеющей высокие рабочие характеристики и обеспечивающей минимизацию затрат при реализации механизированной подачи шлакообразующих смесей в условиях непрерывного литья блюмовых заготовок.

При выборе конструктивного исполнения установки, разрабатываемой для обслуживания блюмовых МНЛЗ (рис. 1), были учтены достоинства и недостатки известных отечественных и зарубежных аналогов. Благодаря примененной в ней кинематической схеме все ее механизмы, выполняющие операции по обрушению порошкообразного материала в бункере, дозированной подаче смеси в кристаллизатор и ее равномерному распределению по поверхности металла, функционируют от одного электромеханического привода. В аналогичных системах для этих целей используют несколько отдельных механизмов, требующих подвода электроэнергии и сжатого воздуха.

В состав установки входит питающий бункер 5, к нижней части которого примы-

кает горизонтально расположенный шнековый дозатор 4, установленный на раме 1 и приводимый в действие через зубчатую передачу 11 червячным мотором-редуктором 8 с регулируемой частотой вращения выходного вала.

Для равномерного распределения смеси по всему поперечному сечению кристаллизатора во время работы дозирующей системы подающий носок 2 совершает качание относительно вертикальной оси погружного стакана 3. Такое движение носка обеспечивают кривошипно-шатунный механизм 9 и коленчатый вал 10.

Внутри бункера 5 в подшипниковых опорах размещен ворошитель 6, поворачиваемый кривошипно-рычажным механизмом 7 и устраняющий зависание мелкодисперсных материалов в бункере [5].

Проектированию опытного образца предложенной системы подачи ШОС предшествовало получение теоретических зависимостей, позволяющих оценить значения технологических нагрузок, действующих на приводы ее структурных механизмов.

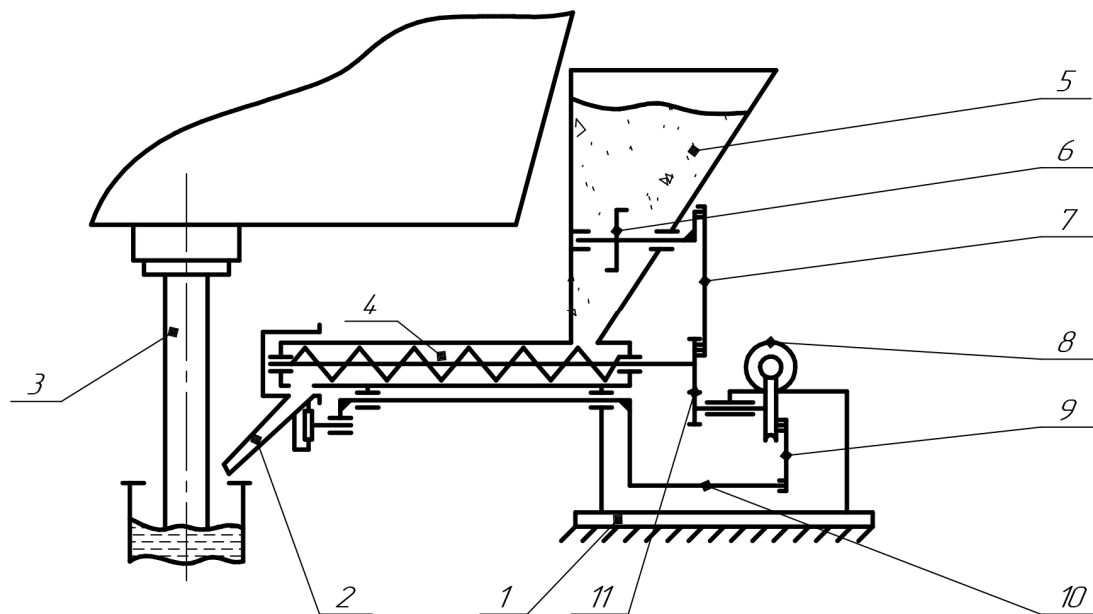


Рисунок 1 Конструктивная схема предлагаемой установки механизированной подачи ШОС в кристаллизатор блюмовой МНЛЗ

В соответствии с конструктивной схемой установки, общая мощность ее комбинированного привода N_o складывается из трех составляющих:

$$N_c = N_1 + N_2 + N_3,$$

где N_1 — мощность, требуемая для приведения во вращение горизонтально расположенного шнека, обеспечивающего подачу ШОС с заданным расходом из бункера в кристаллизатор; N_2 — мощность, необходимая для поворота лопастей ворошителя в толще мелкодисперсного материала в нижней части бункера; N_3 — мощность, достаточная для реализации качания носка с целью равномерного распределения смеси по поверхности жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ.

Исходными данными при расчете рабочих характеристик шнекового питателя являются удельный расход шлакообразующей смеси q и производительность P ручья блюмовой МНЛЗ, определяемая по формуле

$$P = S_6 \cdot v_3 \cdot \rho_c,$$

где S_6 — площадь поперечного сечения отливаемого блюма, м^2 ; v_3 — скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин ; ρ_c — плотность жидкой стали, кг/м^3 .

Тогда массовый расход ШОС, подаваемой в кристаллизатор, составит

$$Q = Pq = S_6 \cdot v_3 \cdot \rho_c \cdot q.$$

В соответствии с требованиями действующих технологических инструкций, можно принять: $S_6 = 0,16 \text{ м}^2$; $v_3 = 3 \div 5 \text{ м/мин}$; $\rho_c = 7000 \text{ кг/м}^3$; $q = 0,2 \div 0,3 \text{ кг/т}$.

С учетом указанных значений используемых величин, массовый расход шлакообразующей смеси, который должен обеспечивать шнековый питатель, находится в пределах $1,0 \div 1,7 \text{ кг/мин}$.

Требуемая максимальная частота вращения горизонтального шнека $n_{ш}$ при конструктивно принятых его геометрических параметрах (наружном диаметре витков $D_{ш} = 60 \text{ мм}$; диаметре вала $d_в = 20 \text{ мм}$; шаге витков $l_в = 40 \text{ мм}$), а также насыпной плотно-

сти шлакообразующей смеси $\gamma_c = 1000 \text{ кг/м}^3$ и коэффициенте заполнения ею межвиткового пространства шнека $\varphi = 0,5$ составит

$$\begin{aligned} n_{ш} &= Q / [0,785 (D_{ш}^2 - d_в^2) l_в \gamma_c \varphi] = \\ &= 1,7 / [0,785 (0,06^2 - 0,02^2) 0,04 \cdot 1000 \cdot 0,5] = \\ &= 40 \text{ об/мин}. \end{aligned}$$

Мощность, необходимая для вращения горизонтального шнека:

$$N_1 = (M_1 \cdot \omega_{ш}) / \eta_1,$$

где M_1 — момент сопротивления вращению шнека; $\omega_{ш}$ — угловая скорость вращения шнека; η_1 — КПД механизма вращения шнека.

В соответствии с расчетной схемой, приведенной на рисунке 2, при вращении шнека его витки своей наружной кромкой сдвигают слой мелкодисперсного материала вдоль внутренней поверхности трубы, в результате чего на кромку действует сила $F_{сд}$, значение которой пропорционально площади сдвигаемого слоя $S_{сд}$ и напряжению сдвига транспортируемой смеси $\tau_{сд}$:

$$F_{сд} = S_{сд} \cdot \tau_{сд}.$$

Площадь поверхности сдвигаемого слоя при коэффициенте заполнения сыпучим материалом межвиткового пространства шнека $\varphi = 0,5$ определяем по формуле

$$S_{сд} = 0,5\pi \cdot D_{ш} (l_в - \delta) (z - 1),$$

где δ — толщина витка шнека; z — количество витков шнека.

Сила $F_{сд}$ вызывает силу трения $F_{тр1}$, момент которой M_1 препятствует вращению шнека:

$$M_1 = 0,5 F_{тр1} \cdot D_{ш} = 0,5 F_{сд} \cdot D_{ш} \cdot \mu,$$

где μ — коэффициент трения поверхности витка шнека о шлакообразующую смесь.

Мощность, требуемая для поворота лопастей ворошителя смеси:

$$N_2 = (M_2 \cdot \omega_л) / \eta_2,$$

где M_2 — момент сопротивления повороту лопастей в толще сыпучего материала; $\omega_л$ — угловая скорость поворота лопастей; η_2 — КПД механизма поворота лопастей.

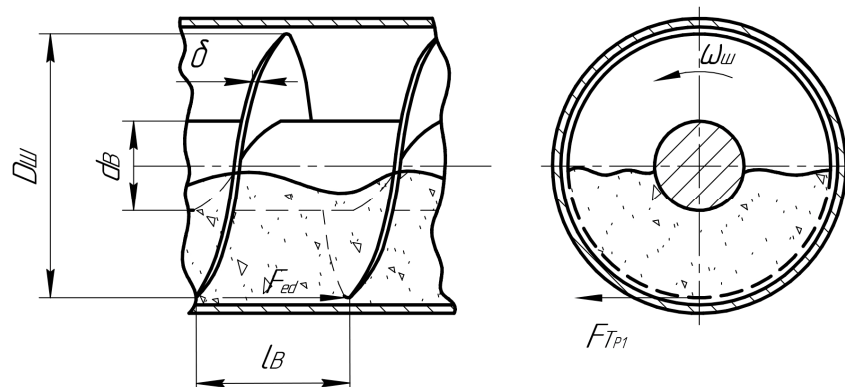


Рисунок 2 Расчетная схема для определения момента сопротивления вращению шнека при транспортировании шлакообразующей смеси

В соответствии с расчетной схемой (рис. 3), момент M_2 обусловлен действием на поверхность лопастей ворошителя силы трения F_{mp2} , вызываемой боковым давлением столба сыпучего материала:

$$F_{mp2} = \gamma_c \cdot g \cdot h_c \cdot abk \cdot \mu,$$

где h_c — высота столба смеси над лопастями ворошителя; a и b — размеры лопасти; k — коэффициент бокового давления.

Тогда $M_2 = 4F_{mp2} \cdot 0,5b$.

Мощность для приведения в действие механизма качания подающего носка в соответствии с расчетной схемой, показанной на рисунке 4:

$$N_3 = (M_3 \cdot \omega_6) / \eta_3,$$

где M_3 — крутящий момент, обеспечиваемый поворотным рычагом O_2C_2 ; ω_p — угловая скорость поворота рычага O_2C_2 ; η_3 — КПД механизма качания подающего носка.

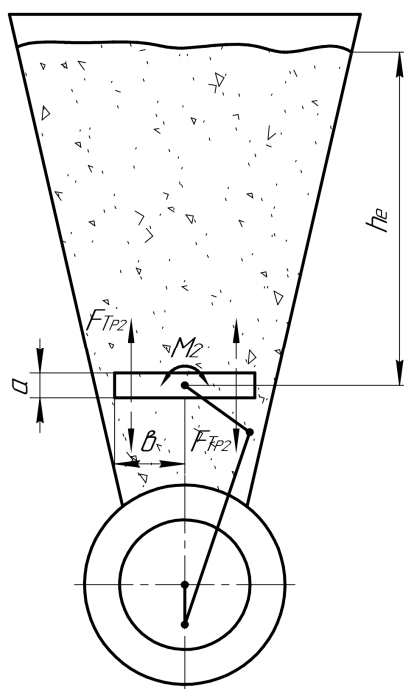


Рисунок 3 Расчетная схема механизма ворошителя шлакообразующей смеси в нижней части бункера

Момент M_3 , требуемый для поворота подающего носка при его силе тяжести G_{nn} на угол α_1 относительно вертикальной оси, определяется по формуле

$$M_3 = (F_p / \cos \alpha_3) O_2 C_2.$$

В этой формуле F_p — сила в точке контакта ролика с направляющей подающего носка, вызываемая при его повороте на угол α_1 рычагом $O_2 C_2$. Для ее определения составим уравнение моментов сил относительно центра O_1 :

$$\Sigma M_{O_1} = 0; \quad G_{nn} \cdot O_1 C_1 \cdot \sin \alpha_1 - F_p \cdot O_1 C_2 = 0.$$

Откуда

$$F_p = (G_{nn} \cdot O_1 C_1 \cdot \sin \alpha_1) / O_1 C_2.$$

Тогда

$$M_3 = (G_{nn} \cdot O_1 C_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot O_2 C_2) / (O_1 C_2 \cdot \cos \alpha_3).$$

При этом, в соответствии с рисунком 4, $\alpha_3 = \alpha_2 - \alpha_1$.

С целью проверки правильности технических решений, принятых при конструировании предложенной системы механизированной подачи ШОС, и корректности полученных расчетных зависимостей с их использованием рассчитали конструктивные и энергосиловые параметры, с учетом которых в масштабе 1:2 изготовили действующую натурную модель установ-

ки (рис. 5) для проведения экспериментальных исследований.

В ходе проведения лабораторных экспериментов во время функционирования установки благодаря прозрачности корпуса ее бункера, выполненного из органического стекла, осуществляли визуальное наблюдение за процессами взаимодействия с мелкодисперсным материалом лопастей ворошителя, а также витков шнека в его заборной части.

При этом в режиме реального времени по методике, подробно описанной в работе [6], фиксировали значения крутящего момента, одновременно передаваемого шнеку, лопастям ворошителя и подающему носку. Поставленную задачу решали с использованием контрольно-измерительного комплекса, включавшего тензорезисторный преобразователь, усилитель переменного тока, АЦП и ЭВМ. Тензорезисторный преобразователь был выполнен с применением фольговых датчиков сопротивления 200 Ом, соединенных по мостовой схеме и закрепленных с помощью специального клея на гильзе, помещенной в корпус с прозрачной передней крышкой (рис. 6, а). Сама гильза выполняла функцию муфты, связывающей валы приводного электродвигателя и червячного редуктора (рис. 6, б).

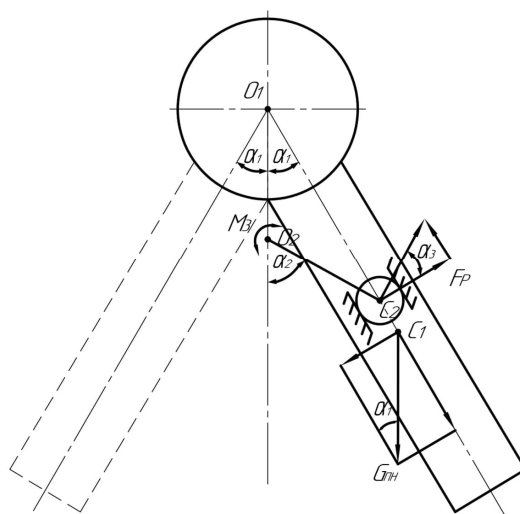


Рисунок 4 Расчетная схема механизма качения подающего носка



Рисунок 5 Действующая натурная модель предложенной системы механизированной подачи ШОС в кристаллизатор блюмовой МНЛЗ

Электрический сигнал, снимающийся с выхода моста сопротивлений, после усиления и преобразования в цифровой код поступал в системный блок ЭВМ для об-

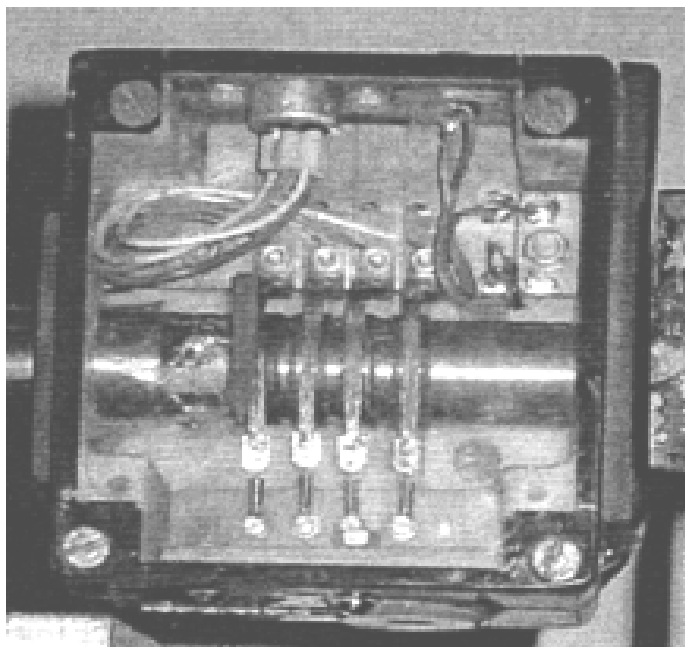
работки с помощью прикладной программы и последующей распечатки.

Характерный вид фиксируемого сигнала показан на рисунке 7.

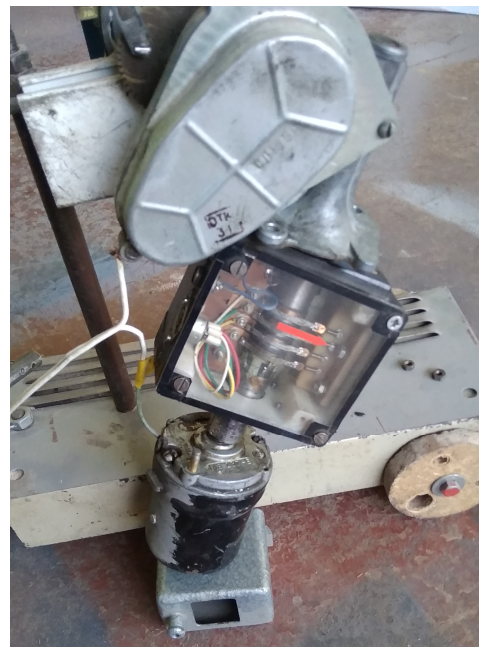
С учетом измеренного среднего значения крутящего момента, развиваемого двигателем и составившего $0,15 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а также скорости вращения его вала 75 рад/с мощность комбинированного привода натурной модели в процессе ее функционирования равнялась 11 Вт .

Сопоставление этого значения с расчетным значением суммарной мощности привода (данные таблицы 1) показало, что расхождение между ними не превышает 15% , т. е. предложенная методика пригодна для инженерных расчетов.

Полученные теоретические зависимости были использованы при расчете и конструировании опытно-промышленного образца предложенной системы механизированной подачи шлакообразующих смесей в условиях непрерывного литья блюмовой заготовки.



а



б

Рисунок 6 Конструктивное исполнение муфты (а), снабженной тензорезисторным преобразователем, и место ее размещения на комбинированном приводе модели (б)

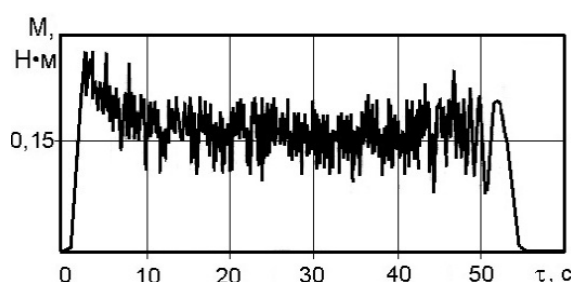


Рисунок 7 Характерный вид регистрировавшегося сигнала при контроле крутящего момента, одновременно передаваемого шнеку, лопастям ворошителя и подающему носку

Таблица 1

Значения энергосиловых параметров механизмов
натурной модели системы механизированной подачи ШОС

Механизмы установки	Расчетные значения параметров механизмов модели					Измеренные значения параметров привода модели		
	M_i , Н·м	ω_i , рад/с	η	N_i , Вт	N_c , Вт	$M_{дв}$, Н·м	$\omega_{дв}$, рад/с	$N_{дв}$, Вт
Вращения шнека	1,83	4	0,6	12,2	13	0,15	75	11
Поворота лопастей ворошителя	0,04	2	0,6	0,11				
Качания подающего носка	0,14	3	0,6	0,7				

Техническая характеристика разработанной системы для обслуживания блочной МНЛЗ

Максимальные размеры поперечного сечения полости кристаллизатора обслуживаемой МНЛЗ, м.....	0,4×0,4
Объем питающего бункера, м ³	0,1
Диаметр шнека, мм.....	60
Длина шнека, мм.....	900
Обеспечиваемый расход смеси, кг/мин	1,0÷1,7
Угол качания подающего носка, град.	±30
Допускаемый максимальный размер частиц подаваемой смеси, мм	3
Мощность привода, кВт	0,15
Полная масса установки, кг.....	65

Исходя из имеющегося опыта разработки и промышленного внедрения систем механизированной подачи ШОС в условиях 3-х слябовых МНЛЗ двух металлургических комбинатов Донецкого региона [7], можно говорить о том, что использование предложенной установки при непрерывной разливке стали на блоковых машинах позволит улучшить качество поверхности отливаемых заготовок и снизить на 15÷20 % расход дорогостоящих шлакообразующих смесей, а затраты, связанные с

освоением инновационного оборудования, окупятся в течение одного года.

Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований будут способствовать решению задач импортозамещения в области разработки вспомогательного технологического оборудования, входящего в состав машин непрерывного литья заготовок, эксплуатируемых в сталеплавильных цехах отечественных металлургических предприятий.

Библиографический список

1. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет [Текст] / Л. В. Буланов [и др.]. — Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2002. — 320 с.
2. Куклев, А. В. Практика непрерывного литья заготовок [Текст] / А. В. Куклев, А. В. Лейтес. — М. : Металлургиздат, 2011. — 432 с.
3. Опробование автоматизированной подачи порошковых ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ [Текст] / В. В. Соколов [и др.] // Сталь. — 2004. — № 5. — С. 37–38.
4. Горосткин, С. В. Внедрение системы автоматизированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок [Текст] / С. В. Горосткин, В. Гартен // Новые огнеупоры. — 2013. — № 4. — С. 39–42.
5. Еронько, С. П. Опыт конструирования систем дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок [Текст] // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». — 2011. — № 11. — С. 35–40.
6. Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства [Текст] : учебное пособие / С. П. Еронько [и др.]. — Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 324 с.
7. Опыт разработки и внедрения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». — 2020. — Т. 76. — № 11. — С. 994–1003.

© Еронько С. П.© Цыхмистро Е. С.© Петров П. А.© Зозуля Ф. С.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГЭМиО ДонГТИ Корнеевым С. В.,
д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ им. проф. Седуша В. Я. ДонНТУ Сидоровым В. А.*

Статья поступила в редакцию 04.10.2021.

Doctor of Technical Sciences Eronko S. P., Tsykhmistro E. S. (DonNTU, Donetsk, DPR),

PhD in Engineering Petrov P. A., Zozulya F. S. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

**CALCULATION AND DESIGN THE SYSTEM OF MECHANIZED SUPPLY
OF SLAG-FORMING MIXTURES TO THE BLOOM CASTER MOLD**

There have been given the design features, design procedure of energy-power parameters and the results of model studying the system of mechanized supply of slag-forming mixtures to the bloom caster mold. The practical application of the proposed development will ensure uniform distribution of the mixture over the free surface of liquid steel, thereby improving the conditions for forming the surface of the cast blank and reducing the consumption of feed materials.

Key words: continuous casting, mold, slag-forming mixture, hopper, auger meter, mixture flow rate, torque, drive power.