

## THERMODYNAMIC MODEL OF ASSOCIATED SOLUTIONS WITH POSITIVE DEVIATIONS FROM THE RAOULT LAW

**Berdnikov V.I.**<sup>1</sup>, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Senior Researcher* (berdnikov-chel@mail.ru)

**Gudim Yu.A.**<sup>2</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director*

<sup>1</sup> LLC Industrial company “Technology of metals” (63, room 486, Kosareva str., Chelyabinsk, 454018, Russia)

<sup>2</sup> South Ural State University (76, Lenina av., Chelyabinsk, 454080, Russia)

**Abstract.** Model of ideal associated solutions is quite acceptable for description of thermodynamic properties of liquid metal binary solutions with positive deviations of thermodynamic activity from the Raoult law. The use of model for prediction of thermodynamic properties of real multicomponent solutions is possible under condition of independent definition of thermodynamic properties of “self-associates”.

**Keywords:** liquid metallic alloys, positive deviations from the Raoult law, ideal associated solutions.

## REFERENCES

1. Prigogine I., Defay R. *Chemical Thermodynamics*. London. 1954. (Russ.ed.: Prigogine I., Defay R. *Khimicheskaya termodinamika*. Novosibirsk: SO Nauka 1966. 512 p.).
2. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. The analysis of thermodynamic properties of molten metal alloys in regular approximation. *Izvestiya VUZov: Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*: 2013, no. 10, pp. 19–23.
3. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A., Karteleva M.I. Application of the model of ideal solutions in systems with positive deviations from Raoult’s law. *Izvestiya VUZov: Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2003, no. 5, pp. 11–17.
4. Terekhov S.V. *Modelirovanie teplovykh i kineticheskikh svoystv real’nykh system* [Modelling of thermal and kinetic properties of real systems]. Donetsk: Izd-vo Veber, Donetskoe otdelenie, 2007. 306 p.
5. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A., Karteleva M.I. The application of the thermodynamic models of regular and ideal solutions. *Izvestiya VUZov: Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*: 2009, no. 8, pp. 3–8.

Received July 7, 2014

УДК 621.747

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНЫХ ШНЕКОВ ДЛЯ ПОДАЧИ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ МНЛЗ

**Еронько С.П.**, *д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Механическое оборудование заводов черной металлургии»* (ersp@meta.ua)

**Ошовская Е.В.**, *к.т.н., доцент кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»*

**Ющенко М.В.**, *аспирант кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»*

**Стародубцев Б.И.**, *инженер*

Донецкий национальный технический университет

(83000, Украина, г. Донецк, ул. Артема, 58)

**Аннотация.** Освещены перспективы применения систем дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок и обоснована необходимость их дальнейшего совершенствования, в частности, за счет использования в них спиральных шнеков. Приведены методика и результаты экспериментальных исследований конструктивных и энергосиловых параметров гибких шнеков с внутренним диаметром 15, 20 и 25 мм, осуществляющих транспортирование мелкозернистых материалов с помощью стальных спиралей с наружным диаметром 11, 16 и 18 мм и шагом витков 5, 10, 15 и 20 мм, вращающихся с частотой 250 – 500 об/мин. Установлено, что зависимость объемной производительности спирального шнека от частоты вращения рабочего органа в исследованных пределах носит линейный характер для опробованных сочетаний геометрических параметров транспортирующего устройства. Заметное влияние на расходные характеристики шнековой системы оказывает соотношение шага витков спирали  $S_b$  и ее наружного диаметра  $d_{\text{сн}}$ . При этом зависимость изменения объемной подачи спирали за один ее оборот от указанного отношения имеет четко выраженный нелинейный вид с максимумом в интервале значений  $S_b/d_{\text{сн}} = 0,9 - 1,1$ , а минимальная удельная энергия спирального шнека фиксировалась для значений  $S_b/d_{\text{сн}} = 0,5 - 0,6$ . Полученные данные использованы при расчете и конструировании линейного ряда систем нового поколения дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок различного поперечного сечения.

**Ключевые слова:** шлакообразующая смесь, кристаллизатор, гибкий шнек, рукав, спираль, виток, шаг навивки, крутящий момент, объемный расход.

Одной из обязательных технологических операций, выполняемых при непрерывной разливке стали, является ввод гранулированных или порошкообразных

шлакообразующих смесей (ШОС) на зеркало жидкого металла в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с целью стабилизации работы его

механизма качания и улучшения условий формирования корочки отливаемой заготовки [1]. При этом данную операцию в сталеплавильных цехах ряда зарубежных и отечественных металлургических предприятий реализуют с использованием специальных пневматических, пневмомеханических или механических систем, позволяющих в сравнении с ручной подачей ШОС обеспечить требуемую равномерность толщины слоя и постоянство состава образующегося шлакового расплава, что в конечном итоге способствует устранению пиковых нагрузок на привод механизма качания кристаллизатора, снижению удельного расхода дорогостоящих смесей и улучшению качества поверхности производимой заготовки [2]. Поэтому в настоящее время интенсивно ведутся работы, связанные с созданием дозирующих устройств, в наибольшей мере отвечающих перечню предъявляемых к ним требований:

- легкое встраивание в существующие комплексы оборудования эксплуатируемых МНЛЗ;
- выдача с регулируемой интенсивностью из питающего бункера и устойчивая транспортировка к кристаллизатору шлакообразующих смесей как в гранулированном, так и в порошкообразном виде;
- равномерное распределение подаваемой ШОС на свободной поверхности металла в кристаллизаторе с большим поперечным сечением;
- минимизация дополнительных помех при обслуживании разливочных устройств промежуточного ковша и управлении их работой [3].

В этом отношении, по мнению авторов, практический интерес представляют системы, включающие гибкие спиральные шнеки, достаточно эффективно перемещающие мелкозернистые и порошкообразные материалы по сложной траектории в пространстве и нашедшие широкое применение в сельскохозяйственном производстве и химической промышленности для выполнения погрузочно-разгрузочных и транспортных операций.

Создание промышленного образца установки, обеспечивающей подачу ШОС в кристаллизатор из стационарно установленного бункера по гибкому металлорукаву с помощью размещенной в нем по всей длине стальной спирали, вращаемой электромеханическим приводом с заданной частотой, предполагает наличие исходной информации как о параметрах самого процесса транспортирования материала, так и об особенностях работы механической системы, его реализующей.

Приведенные в технической литературе данные о параметрах процесса силового взаимодействия спиральных гибких рабочих органов с транспортируемым материалом и обеспечиваемых ими расходных характеристиках касаются конвейеров с производительностью 500 кг/ч и более при рекомендуемой частоте вращения шнеков диаметром от 25 до 110 мм в пределах 500 – 1500 об/мин [4 – 6]. При подаче ШОС в кристаллизаторы МНЛЗ требуемая производительность дози-

рующей системы не превышает 70 – 80 кг/ч, поэтому полученные ранее эмпирические зависимости, справедливые для спиральных конвейеров, не могут быть использованы при обосновании технических решений, закладываемых в конструкции промышленных образцов систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в условиях непрерывной разливки стали, так как в этом случае требуемые значения геометрических и скоростных параметров спиральных шнеков выходят за нижние пределы ранее рекомендованных диапазонов их варьирования.

В связи с этим целью настоящей работы было изучение характера силового воздействия мелкодисперсного материала в канале гибкого трубопровода, имеющего изогнутый и горизонтальный участки, на вращающуюся стальную спираль и влияние ее угловой скорости и геометрических параметров (диаметр и шаг витков) на равномерность подачи и объемный расход транспортируемой смеси в условиях ее использования в технологии непрерывного литья заготовок.

Как известно, энергия, необходимая для функционирования гибкого шнека, затрачивается на преодоление трения между его спиралью и корпусом, трения о них транспортируемого материала, а также на его частичное перемешивание и относительное перемещение. Поскольку задача по определению общей мощности, требуемой на приведение в действие спирального шнека, и отдельных ее составляющих до сих пор не решена, информацию, необходимую для выполнения проекторочных расчетов, получили опытным путем.

Экспериментальные исследования проводили в два этапа. По плану первого из них с помощью специально изготовленного устройства определяли значения момента сопротивления вращению отдельных фрагментов спирали в толще шлакообразующей смеси с насыпной плотностью 900 кг/м<sup>3</sup> при полностью заполненном канале горизонтального трубопровода. Для испытаний предварительно подготовили шесть комплектов фрагментов спиралей с разными диаметром и шагом. Каждый из комплектов включал четыре образца, имевших прямой стержень и, соответственно, 1/4, 1/2, 3/4 части и полный виток спирали. В соответствии со схемой, представленной на рис. 1, а, в гильзе 5, закрепленной на стойке 2, установленной на основании 1, размещали сменные трубки 6 требуемого диаметра. Внутри этих трубок засыпали шлакообразующую смесь 8 и поочередно размещали фрагменты спиралей 7, после чего на их стержневую часть с помощью винта 10 жестко закрепляли коромысло 4, одно плечо которого было связано с подвеской 3, а другое снабжено противовесом 9, навинченным на резьбовой хвостовик. Благодаря возможности плавного изменения длины плеча  $l_1$ , конструкция позволяла уравновесить коромысло и фиксировать его в горизонтальном положении. Затем на подвеску устанавливали грузы известной массы до момента начала поворота коромысла. Суммарная сила тя-

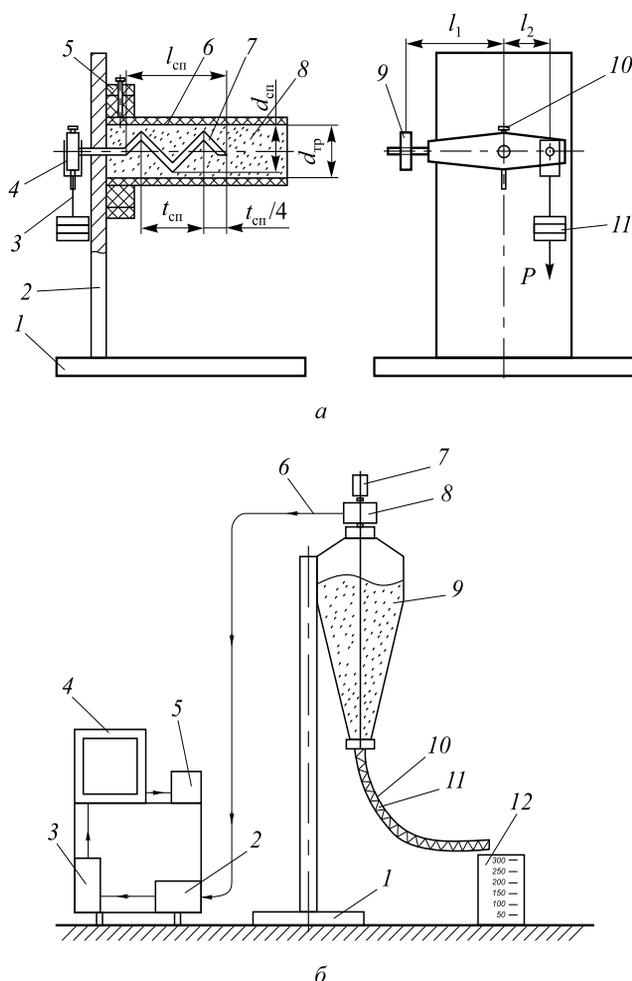


Рис. 1. Схемы лабораторных устройств для контроля момента сопротивления вращению витка спирали (а) и рабочих параметров спирального шнека (б)

жести  $P$  комплекта установленных грузов, при которой коромысло вместе с фрагментом витка спирали начало поворачиваться, развивала крутящий момент  $Pl_2$ , соответствовавший моменту сопротивления вращению  $M_c$  размещенного фрагмента. Для исключения грубых погрешностей каждое измерение повторяли трижды и по полученным результатам находили усредненное значение (табл. 1).

Следует отметить, что при строгом учете момент сопротивления вращению фрагмента спирали включает две составляющие  $M_c = M_{TM} + M_{TP}$ .

Здесь  $M_{TM}$  – искомый момент сопротивления повороту фрагмента спирали, вызванный трением между его поверхностью и материалом;  $M_{TP}$  – момент силы трения в опорном подшипниковом узле, определяемый по формуле

$$M_{TP} = \mu Pd_n / 2,$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения в опоре;  $d_n$  – диаметр проволоки, из которой изготовлены фрагменты спирали.

Расчеты показали, что для условий проводившегося эксперимента доля  $M_{TP}$  в суммарном моменте сопротивления вращению фрагмента спирали  $M_c$  составляла не более 0,5 %, поэтому можно принять  $M_c = M_{TM}$ .

В соответствии с полученными данными измерений, сопротивление вращению спирали, вызываемое трением о нее сыпучего материала, напрямую зависит от шага ее витка и площади контактной поверхности, определяемой его диаметром и диаметром проволоки, из которой он изготовлен. При этом для исследовавшихся диапазонов изменений геометрических параметров спирали значение указанной составляющей момента сопротивления, действующего на отдельно взятый ее виток, находится в пределах  $(0,9 - 1,4) \cdot 10^{-3}$  Н·м. Данные показатели могут быть использованы в качестве оценочных для предварительного расчета энергосиловых параметров гибких спиральных шнеков с условным проходом рукава до 25 мм, поскольку позволяют приблизительно определить минимальное значение крутящего момента, требуемого для вращения рабочего органа с известным или задаваемым числом его витков при транспортировке мелкозернистой шлакообразующей смеси с насыпной плотностью 800 – 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Второй этап исследований был связан с определением расходных характеристик спирального шнека и силовых параметров его привода. Эксперименты проводили на установке, схема которой приведена на рис. 1, б. В ее состав входил бункер 9 с прозрачной передней стенкой, закрепленный на металлоконструкции 1 и включающий установленный в подшипниковых опорах вертикальный вал, нижний хвостовик которого жестко связан со стальной спиралью 11, размещенной в прозрачном гибком трубопроводе 10, прикрепленном своей входной частью к гильзе, примыкающей к выходному отверстию бункера. Вращение спирали в гибком трубопроводе осуществлялось мотор-редуктором 7, закрепленным на верхней части бункера и посредством специальной муфты 8 связанным с верхним хвостовиком вертикального вала. Мотор-редуктор имел возможность изменения частоты вращения в заданных пределах 250 – 500 об/мин, которую контролировали с помощью электронного тахометра. Фиксацию в режиме реального времени значений крутящего момента, сообщаемого приводом вертикальному валу, обеспечивали посредством контрольно-измерительного комплекса, включавшего совмещенный с муфтой 8 тензорезисторный преобразователь, имеющий электрическую связь посредством экранированного кабеля 6 с усилителем переменного тока 2, а также аналого-цифровой преобразователь 3 и ЭВМ 4 с печатающим устройством 5. Гильза в нижней части бункера, благодаря комплексу сменных втулок, обеспечивала возможность поочередного крепления в ней трубопроводов с различным проходным сечением (внутренним диаметром  $D_p$ , равным 15, 20 и 25 мм) и размещенными в них по всей длине

Таблица 1

**Результаты контроля момента сопротивления повороту витка спирали в слое шлакообразующей смеси**

Диаметр витка спирали, мм	Шаг витка спирали, мм	Дробная часть витка спирали	Площадь поверхности контакта витка с материалом, мм <sup>2</sup>	Значение момента сопротивления повороту фрагмента витка спирали, мН·м			
				$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_c$
11	5	1/4	168	0,50	0,48	0,48	0,49
		1/2	242	0,61	0,60	0,59	0,60
		3/4	316	0,82	0,80	0,81	0,81
		1	390	0,91	0,98	0,95	0,95
	10	1/4	168	0,50	0,50	0,50	0,50
		1/2	242	0,68	0,70	0,69	0,69
		3/4	316	0,90	0,88	0,90	0,89
		1	390	1,0	1,1	1,0	1,03
16	10	1/4	190	0,52	0,53	0,53	0,53
		1/2	286	0,78	0,80	0,79	0,79
		3/4	382	0,90	0,89	0,88	0,89
		1	478	1,05	1,10	1,09	1,08
	15	1/4	190	0,59	0,60	0,59	0,59
		1/2	286	0,70	0,68	0,70	0,69
		3/4	382	0,92	0,89	0,93	0,91
		1	478	1,20	1,19	1,18	1,19
18	15	1/4	227	0,71	0,71	0,69	0,70
		1/2	360	0,80	0,81	0,82	0,81
		3/4	493	0,98	1,02	1,03	1,01
		1	626	1,41	1,39	1,39	1,39
	20	1/4	227	0,81	0,79	0,79	0,80
		1/2	360	0,91	0,89	0,90	0,90
		3/4	493	1,08	1,10	1,05	1,07
		1	626	1,42	1,40	1,42	1,41

спиралями с соответствующим диаметром и шагом витков. Для экспериментальных исследований были изготовлены 12 типоразмеров спиралей, отличающихся наружным диаметром  $d_{\text{сп}}$  (11, 16 и 18 мм) и шагом витков  $S_b$  (5, 10, 15 и 20 мм). Число витков у всех спиралей было одинаковым и равнялось 100.

В ходе второй серии проводившихся экспериментов исследовали расходные характеристики гибких шнеков, выполнявших транспортировочную функцию при различных комбинациях их геометрических параметров и частотах вращения. Одновременно с контрольными замерами объема порошкообразной шлакообразующей смеси, транспортируемой в единицу времени по гибкому трубопроводу в мерную емкость, осуществляли запись сигнала, отображавшего значения крутящего момента, передаваемого муфтой от привода к спирали во время ее вращения. Характерный вид регистрировавшихся сигналов показан на рис. 2.

Объемную подачу за один оборот спирали определяли по формуле

$$Q_0 = 60 \frac{V}{nt},$$

где  $V$  – объем смеси, поданной спиральным шнеком в мерную емкость, см<sup>3</sup>;  $n$  – частота вращения спирали, об/мин;  $t$  – длительность работы спирального шнека, с.

Зависимость объемной производительности спирального шнека от частоты вращения рабочего органа в пределах 250 – 500 об/мин носит линейный характер для опробованных сочетаний геометрических параметров транспортирующего устройства (рис. 3). Заметное влияние на расходные характеристики шнековой системы оказывает соотношение шага витков спирали  $S_b$  и ее наружного диаметра  $d_{\text{сп}}$ . При этом зависимость изменения объемной подачи спирали за один ее оборот от отношения  $S_b/d_{\text{сп}}$  имеет четко выраженный нелинейный вид (рис. 4) с максимумом в интервале значений  $S_b/d_{\text{сп}} = 0,9 - 1,1$ .

Эффективность функционирования спирального шнека оценивали по значению его коэффициента производительности  $\kappa_{\text{п}}$  и удельным энергетическим затра-

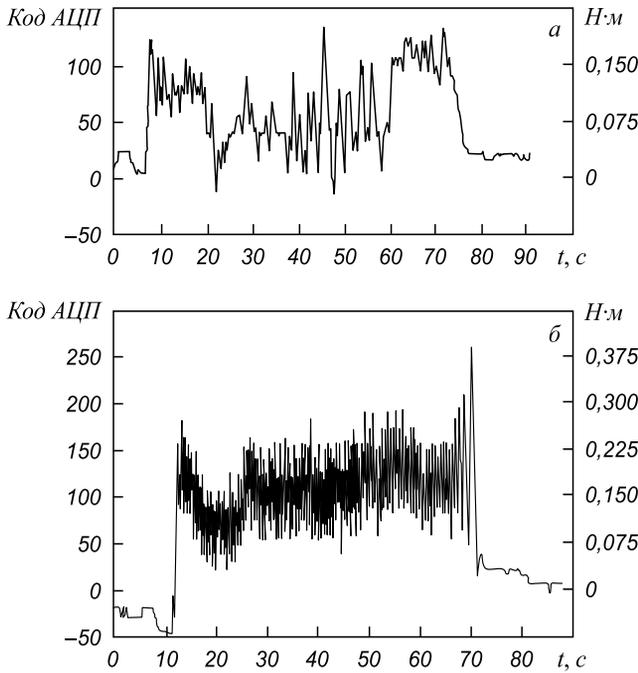


Рис. 2. Характерный вид сигналов при контроле крутящего момента, действующего на спираль:  
а – шнек порожний; б – во время транспортирования смеси

там, требующимся для транспортирования фиксированного объема или соответствующей массы сыпучего материала. При этом коэффициент  $\kappa_n$  определяли как отношение объема материала, выдаваемого за один оборот спирали, к объему материала, ограниченному стенками гибкого рукава на участке, длина которого равнялась шагу витка спирали. Значения коэффициента  $\kappa_n$ , полученные для трех типов гибких шнеков с разным шагом витков спирали при ее фиксированной частоте вращения, приведены в табл. 2. Следует отметить, что максимальная производительность гибкого спирального шнека обеспечивается в том случае, когда значение отношения  $S_B/d_{cn}$  не выходит за пределы 0,8 – 1,0.

Для расчета количества энергии, затраченной на перемещение в единицу времени зафиксированного объема шлакообразующей смеси  $Q$  ( $см^3/с$ ) при функционировании гибкого шнека, использовали результаты контроля крутящего момента, передаваемого спирали электромеханическим приводом, а также частоты ее вращения. Значение составляющей крутящего момента, соответствующей работе, выполняемой механизмом при транспортировке смеси  $M_p$ , получали вычитанием значения момента холостого хода  $M_{xx}$  из значения общего момента  $M_o$ , которые были зарегистрированы с помощью тензорезисторного преобразователя в ходе проводившихся измерений. Тогда мощность, развиваемая приводом спирального шнека во время его функционирования с частотой вращения  $n$  (об/мин), составляла  $N = M_p \pi n / 30$  (Вт), а удельные энергетические затраты  $N/Q$  (Дж/см<sup>3</sup>).

На основании расчетных данных построили графики зависимостей удельной энергии спиральных шне-

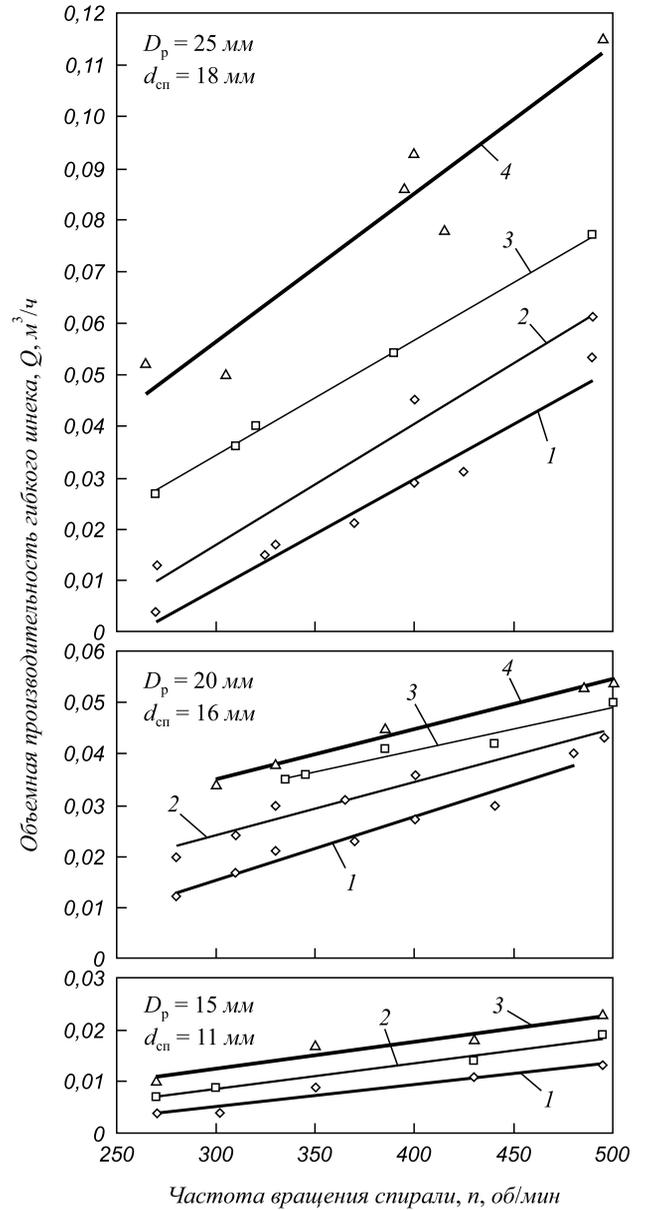


Рис. 3. Зависимость объемной производительности шнека от частоты вращения и конструктивных параметров спирали при  $S_B$ , мм:  
1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20

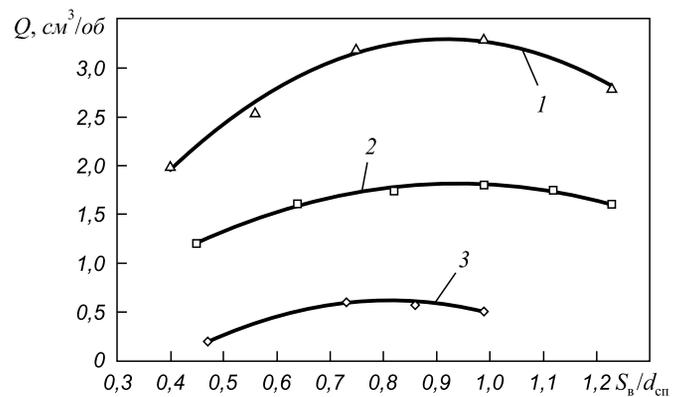


Рис. 4. Зависимость объемной подачи шнека за один оборот спирали от конструктивных параметров транспортирующего устройства при  $D_p/d_{cn}$ :  
1 – 25/18; 2 – 20/16; 3 – 15/11

**Значения коэффициента производительности гибких шнеков при различных соотношениях их геометрических параметров**

$S_b$ , мм	Частота вращения спирали, об/мин	$\kappa_n$		
		$D_p/d_{cn} = 15/11$	$D_p/d_{cn} = 20/16$	$D_p/d_{cn} = 25/18$
5	250	0,28	0,53	0,41
	300	0,28	0,56	0,43
	350	0,30	0,57	0,45
	400	0,32	0,58	0,46
	450	0,33	0,60	0,49
	500	0,35	0,61	0,52
10	250	0,26	0,54	0,48
	300	0,28	0,55	0,50
	350	0,33	0,56	0,51
	400	0,33	0,56	0,53
	450	0,34	0,58	0,55
	500	0,34	0,59	0,56
15	250	0,22	0,48	0,50
	300	0,23	0,49	0,51
	350	0,25	0,51	0,52
	400	0,26	0,52	0,56
	450	0,28	0,54	0,58
	500	0,29	0,55	0,63
20	250	–	0,42	0,49
	300	–	0,43	0,51
	350	–	0,44	0,54
	400	–	0,46	0,57
	450	–	0,47	0,58
	500	–	0,48	0,60

ков от отношения  $S_b/d_{cn}$ , приведенные на рис. 5, из которых видно, что минимальные значения  $N/Q$  фиксировались для отношения  $S_b/d_{cn} = 0,5 - 0,6$ , а общие пределы изменений  $N/Q$  составили  $0,12 - 0,35$  Дж/см<sup>3</sup> или, в пересчете при насыпной плотности ШОС  $1$  т/м<sup>3</sup>,  $0,03 - 0,1$  кВт·ч/т. В связи с этим выбор геометрических параметров гибких спиральных шнеков, применяемых в системах механизированной подачи шлакообразующих смесей в условиях непрерывной разливки стали, должен делаться с обеспечением требуемой производительности шнекового устройства и минимально возможных энергетических затрат на его функционирование с учетом размеров поперечного сечения и скорости вытягивания заготовки. В табл. 3 приведены рекомендуемые конструктивные размеры гибких спиральных шнеков для обслуживания МНЛЗ различных типов.

Результаты экспериментальных исследований параметров работы спиральных шнеков прослужили основой при расчете и конструировании линейного ряда систем нового поколения дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок различного поперечного сечения [7].

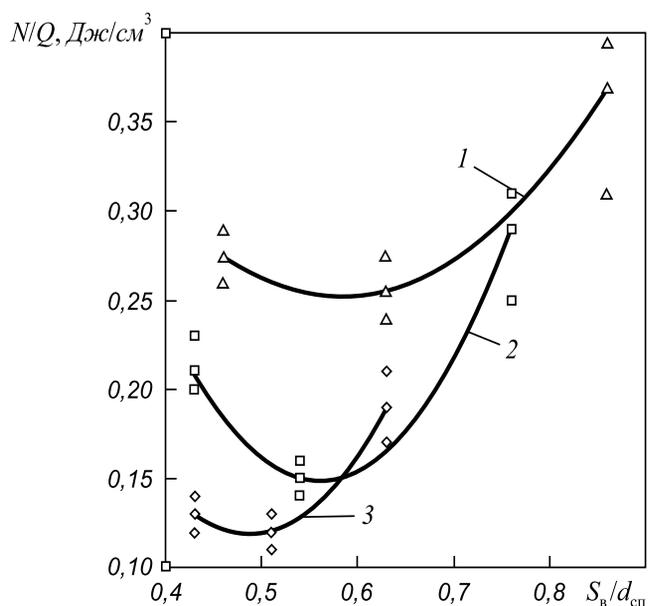


Рис. 5. Характер изменения удельной энергоёмкости спирального шнека при различных вариациях его конструктивных параметров при  $D_p/d_{cn}$ : 1 – 15/11; 2 – 20/16; 3 – 25/18

**Рекомендуемые варианты применения гибких спиральных шнеков в системах подачи ШОС при непрерывной разливке стали**

Тип МНЛЗ	Размер поперечного сечения отливаемой заготовки, мм	Скорость вытягивания заготовки, м/мин	Требуемый расход смеси		Характеристики рекомендуемого спирального шнека				
			удельный, кг/т стали	общий, кг/ч	диаметр рукава, мм	диаметр спирали, мм	шаг витка, мм	частота вращения, об/мин	производительность, кг/ч
Сортовая	от 100×100 до 150×150	4,0 – 6,0	0,35 – 0,4	8 – 12	15	11	10	300 – 400	8 – 14
Блюмовая	от 300×300 до 400×400	1,0 – 2,5	0,3 – 0,4	38 – 45	20	16	15		40 – 55
Слябовая	от 150×1000 до 300×2100	0,6 – 1,1	0,4 – 0,5	60 – 80	25	18	20		65 – 100

**Выводы.** Гибкие спиральные шнеки при правильно выбранных геометрических и скоростных параметрах могут эффективно использоваться в системах механизированного ввода шлакообразующих смесей в кристаллизаторы всех типов машин непрерывного литья заготовок. Их применение позволит снизить материалоемкость механизмов, входящих в состав этих систем и обеспечивающих транспортирование ШОС в порошкообразном или гранулированном виде. Благодаря им также значительно упрощается встраивание самих систем в существующие комплексы технологического оборудования эксплуатируемых и проектируемых МНЛЗ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куклев А.В., Лейтес А.В. Практика непрерывной разливки стали. – М.: Металлургиздат, 2011. – 432 с.
2. Горосткин С. В., Гартен В. Внедрение системы автоматической подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины не-

прерывного литья заготовок. // Новые огнеупоры. 2013. № 4. С. 39 – 42.

3. Еронько С.П. Опыт конструирования системы дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2011. № 11. С. 35 – 40.
4. Спирально-винтовые транспортеры (гибкие шнеки) и смесители. / Сб. статей под общ. ред. П.А. Преображенского, А.А. Труфанова – Казань: КХТУ, 1970. – 176 с.
5. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры. – М.: Машностроение, 1972. – 184 с.
6. Геррман Х. Шнековые машины в технологии. – Л.: Химия, 1975. – 228 с.
7. Еронько С.П., Ющенко М.В., Мечик С.В. Системы нового поколения дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизаторы МНЛЗ. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 3. С. 87 – 92.

© 2014 г. Еронько С.П., Ошовская Е.В.,  
Ющенко М.В., Стародубцев Б.И.  
Поступила 31 июля 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. No. 9. Vol. 57, pp. 33–40

### EXPERIMENTAL RESEARCHES OF WORKING PARAMETERS OF SPIRAL SCREWS FOR DISPENSING OF SLAGGING MIXTURES IN MOLDS OF CONTINUOUS CASTING MACHINES

**Eron'ko S.P.,** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Mechanical equipment of ferrous metallurgy plants" (ersp@meta.ua)

**Oshovskaya E.V.,** Cand. Eng., assist. Professor of the Chair "Mechanical equipment of ferrous metallurgy plants"

**Yushchenko M.V.,** Postgraduate of the Chair "Mechanical equipment of ferrous metallurgy plants"

**Starodubtsev B.I.,** Engineer

National Technical University of Donetsk (58, Artema str., Donetsk, 83000, Ukraine)

**Abstract.** The application prospects of dispensing systems for slagging mixtures in molds of continuous casting machines are illuminated and the necessity of their further improvement, in particular, through the use of spiral screw, is substantiated. The method and results of experimental researches of design and power parameters of flexible

screws are given with inner diameter 15, 20 and 25 mm. They transport the fine granular materials by steel coils rotated with a frequency of 250–500 rpm and differed by outer diameters (11, 16 and 18 mm) and pitch of coils (5, 10, 15 and 20 mm). It is found, that the dependence of volume efficiency of spiral screw from rotation frequency of the working part in the studied range is linear for the tested combinations of geometrical parameters of the transporting device. Noticeable effect on the flow characteristics of the screw system has a ratio of spiral coil pitch  $S_v$  and its outer diameter  $d_{sp}$ . The dependence of the change of spirals volume flow for one of its turnover from this ratio has a non-linear form with a maximum in the range  $S_v/d_{sp} = 0.9–1.1$ , and the minimum specific energy of spiral screw was fixed at the values of  $S_v/d_{sp} = 0.5–0.6$ . The obtained data are used during the calculation and construction of a linear series of next generation dispensing slag-forming mixtures systems in molds of continuous casting machines with different cross-section.

**Keywords:** slagging mixture, mold, flexible screw, sleeve, spiral, coil, winding pitch, torque, volumetric flow rate.

REFERENCES

1. Kuklev A.V., Leites A.V. *Praktika nepreryvnoi razlivki stali* [The practice of continuous casting of steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2011. 432 p. (In Russ.).
2. Gorostkin S. V., Garten V. The introduction of a system of automatic filing of slag-forming mixture into the mold of continuous casting machine. *Novye ogneupory*. 2013, no. 4, pp. 39–42. (In Russ.).
3. Eron'ko S.P. Designing experience for systems of dispensing of slag-forming mixtures in molds of continuous casting machines. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' OAO "Chermetinformatsiya"*. 2011, no. 11, pp. 35–40. (In Russ.).
4. *Spiral'no-vintovye transportery (gibkie shneki) i smesiteli* [Spiral screw conveyors (flexible augers) and mixers]. Preobrazhenskii P.A., Trufanov A.A. eds. Kazan: KKhTU, 1970. 176 p. (In Russ.).
5. Grigor'ev A.M. *Vintovye konveiry* [Screw conveyors]. Moscow: Mashnostroenie, 1972. 184 p. (In Russ.).
6. Herrmann H. *Schneckenmaschinen in der Verfahrenstechnik*. Berlin, Springer-Verlag, 1972, 179 p. (Russ.ed.: Herrmann H. *Shnekovye mashiny v tekhnologii*. Leningrad: Khimiya, 1975. 228 p.).
7. Eron'ko S.P., Yushchenko M.V., Mechik S.V. Next-generation dispensing slag-forming mixtures in molds of CCM. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' OAO "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 3, pp. 87–92. (In Russ.).

Received July 31, 2014

УДК 669.18:669.17.046:621.8.038.003.12

## ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ И ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ В ВАННЕ УСТАНОВКИ КОВШ–ПЕЧЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Пиптюк В.П.<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник (office.isi@nas.gov.ua)*

*Крикент И.В.<sup>2</sup>, преподаватель кафедры сварки*

*Самохвалов С.Е.<sup>2</sup>, д.т.н., зав. кафедрой прикладной математики*

*Греков С.В.<sup>1</sup>, научный сотрудник*

*Кабаков Д.Ю.<sup>2</sup>, аспирант*

**Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины**

(49050, Украина, г. Днепропетровск, пл. Ак. Стародубова, 1)

**Днепродзержинский государственный технический университет**

(51900, Украина, Днепропетровская обл., г. Днепродзержинск, Днепростроевская ул., 2)

**Аннотация.** Приведена методика расчета и оценены величины электромагнитных параметров, возникающих в ванне емкостью 60 т установки ковш–печь (УКП) постоянного и переменного тока при нагреве металлического расплава электрической дугой с одинаковой подводимой мощностью 7,7 МВт. Показаны особенности распределения плотности тока и электромагнитных сил (э.м.с.) в ковшовой ванне в зависимости от вида используемого тока на УКП. Численно в трехмерной постановке исследовано влияние э.м.с. на характер изменения условий перемешивания и скорости потоков расплава в зависимости от интенсивности подачи аргона через асимметрично расположенный донный продувочный узел ковша. Установлены рациональные, с точки зрения эффективного влияния э.м.с. на перемешивание расплава и энергосбережение процесса, режимы обработки расплава на УКП переменного тока в ковше исследуемой конструкции.

**Ключевые слова:** электромагнитные силы, перемешивание, нагрев расплава, ковшова ванна.

Рост производства стали с применением установок ковш–печь (УКП) на предприятиях Украины и государств постсоветского пространства и использование, главным образом, переменного тока для питания модуля нагрева такого оборудования с одной стороны, и отсутствие сведений о влиянии действующих в ванне электромагнитных сил (э.м.с.) на процессы обработки металла в таких условиях с другой стороны, обуславливают актуальность исследований оценки воздействия э.м.с. на расплав в ковше.

Ниже представлена расчетно-аналитическая методика оценки э.м.с., возникающих в металлической ванне УКП при электродуговом нагреве расплава от источника переменного тока.

Поле э.м.с., действующих на расплав при нагреве на УКП переменного тока, можно приближенно рассчитать путем аналитического решения задачи распределения плотности тока и магнитного поля в объ-

еме металлической ванны. Реальные геометрические размеры области анодной привязки дуги при этом игнорируются. Как было показано в работе [1], такой подход к расчету э.м.с. в ванне УКП постоянного тока обеспечивает достаточно высокую точность моделирования силового поля.

При использовании трехфазной схемы питания УКП в ванне ковша практически одновременно действуют три дуговых разряда. Электрическая дуга горит между катодом (электродом), подключенным к одной из фаз питающего трансформатора, и поверхностью металлической ванны (анодом), подключенной к нулевой точке источника питания. Следовательно, на поверхности металла имеют место три зоны ввода переменного тока, которые принимаем в виде точек.

В таком представлении векторные поля плотности тока и магнитной индукции необходимо рассматривать