

О. С. Иванова, В. Н. Рыбак

Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ ЭШТП

Разработана математическая модель электрического сопротивления шлаковой ванны электрошлаковой тигельной плавки (ЭШТП). Разработанная модель может быть использована для расчета электрического сопротивления шлаковой ванны печей ЭШТП в зависимости от параметров шлаковой ванны.

Ключевые слова: электрошлаковая тигельная плавка, электрическое сопротивление, шлаковая ванна, математическая модель.

Розроблено математичну модель електричного опору шлакової ванни електрошлакової тигельної плавки (ЕШТП). Розроблена модель може бути використана для розрахунку електричного опору шлакової ванни печей ЕШТП залежно від параметрів шлакової ванни.

Ключові слова: електрошлакова тигельна плавка, електричний опір, шлакова ванна, математична модель.

A mathematical model of the electrical resistance of slag bath of electroslag crucible melting (ESCM) was developed. The model can be used to calculate the electric resistance of slag bath for ESCR furnaces depending on its parameters.

Keywords: electroslag crucible remelting, electrical resistance, slag, mathematical model.

Введение

Электрошлаковий переплав (ЭШП) является одним из эффективных способов получения металлов и сплавов с высокими физико-механическими характеристиками. При электрошлаковом переплаве металл очищается от вредных примесей, неметаллических включений и газов, а за счет направленной кристаллизации слитка обеспечивается получение плотной структуры металла. Высокая технологическая гибкость процесса ЭШП и хорошее качество переплавляемого металла способствовали быстрому внедрению процесса не только для переплава заготовок, но и для производства литья. Например, методы электрошлакового кокильного и центробежного литья основаны на накоплении жидкого металла в тигле с последующим сливом его в форму [1].

Постановка задачи

В настоящее время в некоторых странах идет активная работа по повышению эффективности процессов ЭШП с помощью имитационного моделирования. Особенно прогрессивными в данном вопросе являются такие страны как Австрия, Китай и Франция. Например, в Австрии существует университет Leoben University Modelling and Simulation of Metallurgical Processes, в котором занимаются созданием имитационных моделей различных металлургических процессов, в том числе и процессов ЭШП. Во Франции студенты-металлурги изучают процессы ЭШП на специальных компьютерных моделях, в которых можно наглядно увидеть протекающие во время переплава процессы, а также управлять ими. В Китае тоже внедряются в процессы обучения и производства разнообразные имитационные модели металлургических процессов.

Авторами статьи была проведена огромная работа по созданию собственной

имитационной модели электрошлаковой тигельной плавки на жидком старте [2]. Разработанная имитационная модель была внедрена в учебный процесс подготовки по специальности «Металлургия» специализации «Специальная металлургия» в Национальном техническом университете Украины «КПИ им. Игоря Сикорского» и показала свою высокую эффективность, что позволило студентам исследовать процессы, протекающие при электрошлаковом переплаве, а также получить необходимые практические навыки управления соответствующим оборудованием. Таким образом, была решена актуальная задача подготовки современных высококвалифицированных специалистов с минимальными затратами, так как в данное время изучение электрошлакового процесса студентами вузов связано с трудностями проведения реальных плавов из-за сложного экономического положения в стране.

Несмотря на свою высокую эффективность, разработанная имитационная модель имеет ряд недостатков, которые требуют устранения путем внесения соответствующих изменений в исходный код программы модели. В первую очередь это касается пересчета электрического сопротивления шлаковой ванны в каждый момент времени – ведь именно от значения этого параметра зависят значения всех остальных параметров процесса электрошлаковой тигельной плавки. В разработанной имитационной модели для расчета электрического сопротивления шлаковой ванны использовалась формула, приведенная в [3]:

$$R_{\text{шл}} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \rho_{\text{шл}}}{D_{\text{кр}}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{шл}}$ – активное электрическое сопротивление шлаковой ванны, Ом; k_1 – коэффициент, учитывающий соотношение расстояния от торца электрода к поверхности металлической ванны к высоте шлаковой ванны; k_2 – коэффициент, учитывающий влияние коэффициента заполнения кристаллизатора; k_3 – коэффициент, учитывающий влияние отношения расстояния между электродами к их определяющему размеру при использовании нескольких электродов; k_4 – коэффициент, учитывающий изменение электрического сопротивления шлаковой ванны в случае применения расходоуемых электродов прямоугольного сечения; $\rho_{\text{шл}}$ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·м; $D_{\text{кр}}$ – диаметр кристаллизатора, м.

Формула (1) дает значительную ошибку расчета электрического сопротивления шлаковой ванны электрошлаковой тигельной плавки по следующим причинам:

- формула применяется для расчета электрического сопротивления шлаковой ванны ЭШП круглого сечения и не учитывает сложную конфигурацию тигля ЭШТП, который, в основном, футеруется кирпичом и поэтому имеет не круглое сечение, а скорее сечение параллелограмма без углов;

- формула разрабатывалась для процесса электрошлакового переплава в кристаллизатор, и поэтому учитывает электрический ток, который замыкается не только через поверхность шлак-металл, но и через шлак-кристаллизатор. В электрошлаковой тигельной плавке электрический ток имеет возможность замыкаться только через поверхность шлак-металл;

- как известно, в процессе переплава плавящийся торец электрода приобретает форму конуса, что может привести к изменению электрического сопротивления шлаковой ванны. Данные изменения в рассматриваемой формуле не отражены вовсе.

Таким образом, возникает острая необходимость в создании совершенно новой математической модели зависимости электрического сопротивления шлаковой ванны печей ЭШТП в зависимости от параметров шлаковой ванны и переплавляемого электрода, которая исправляла бы все указанные выше недостатки. Созданию данной математической модели и посвящена данная статья.

Получение и обработка расплавов

Вместо формулы (1), в которой используются четыре разных поправочных коэффициента, для расчета электрического сопротивления шлаковой ванны ЭШТП предлагается использовать формулу, включающую в себя так называемый коэффициент конфигурации тигля, зависящий от диаметра электрода, высоты его оплавленной части и текущего расположения в шлаковой ванне:

$$R_{\text{шл}} = k \cdot \rho_{\text{шл}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{шл}}$ – активное электрическое сопротивление шлаковой ванны, Ом; k – коэффициент конфигурации тигля, 1/м; $\rho_{\text{шл}}$ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·м.

Коэффициент конфигурации тигля представляет собой функцию ряда факторов:

$$k = f(D_{\text{эл}}, L, H_{\text{к}}, L_{\text{п}}), \quad (3)$$

где k – коэффициент конфигурации тигля, 1/м; $D_{\text{эл}}$ – диаметр электрода, м; L – расстояние между торцом электрода и поверхностью ванны жидкого металла, м; $H_{\text{к}}$ – высота оплавленной части электрода, м; $L_{\text{п}}$ – длина погруженной в шлак части электрода, м.

Для установления функциональной связи между параметрами был применен метод планирования эксперимента. Использовался центральный композиционный ортогональный план второго порядка.

Обозначения аргументов, входящих в формулу (2), представлены на рис. 1.

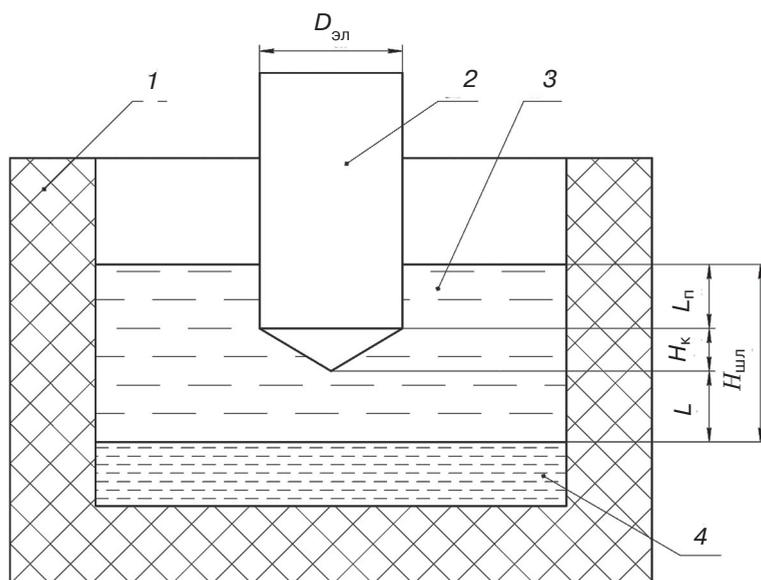


Рис. 1 Обозначение аргументов математической модели: 1 – тигель; 2 – электрод; 3 – шлаковая ванна

Для получения математической зависимости коэффициента конфигурации тигля ЭШТП от указанных выше параметров шлаковой системы необходимо провести серию экспериментов с различными значениями аргументов. Измеряя сопротивление шлаковой ванны при этих значениях и зная удельное сопротивление шлака, по формуле (2) можно рассчитать для этих значений значения коэффициента конфигурации тигля. Имея набор таких данных при помощи регрессионного анализа можно построить математическую модель зависимости (3) и использовать ее в

Получение и обработка расплавов

дальнейшем при проведении расчетов параметров ЭШТП или в компьютерном моделировании [2].

Методика проведения исследований и обработки полученных результатов

Для определения сопротивления шлаковой ванны использовали метод физического моделирования, который предполагает моделирование электрического поля шлаковой ванны.

Из теории распространения электромагнитных волн в проводящей среде известно, что для модели и оригинала достаточно ограничиться удовлетворением трех условий подобия: 1 – геометрического, 2 – граничного и 3 – распределения удельной электрической проводимости в объеме проводящей среды. Первые два условия легко реализуются при моделировании и были выполнены. Третье условие с некоторой погрешностью может быть сведено к требованию подобия удельной проводимости проводящей среды модели и оригинала.

Моделирование электрошлаковой тигельной плавки возможно только на трехмерной модели. Одна из таких моделей – электролитическая – была принята в данной работе.

Для проведения физического эксперимента и сбора экспериментальных данных по чертежу тигля ЭШТП (рис. 2) авторами был создан макет внутренней поверхности тигля ЭШТП в реальную величину (рис. 3), а также были созданы макеты электродов круглого сечения различных диаметров с конусами различной высоты (таблица), которые крепились к торцам электродов при помощи скоб.

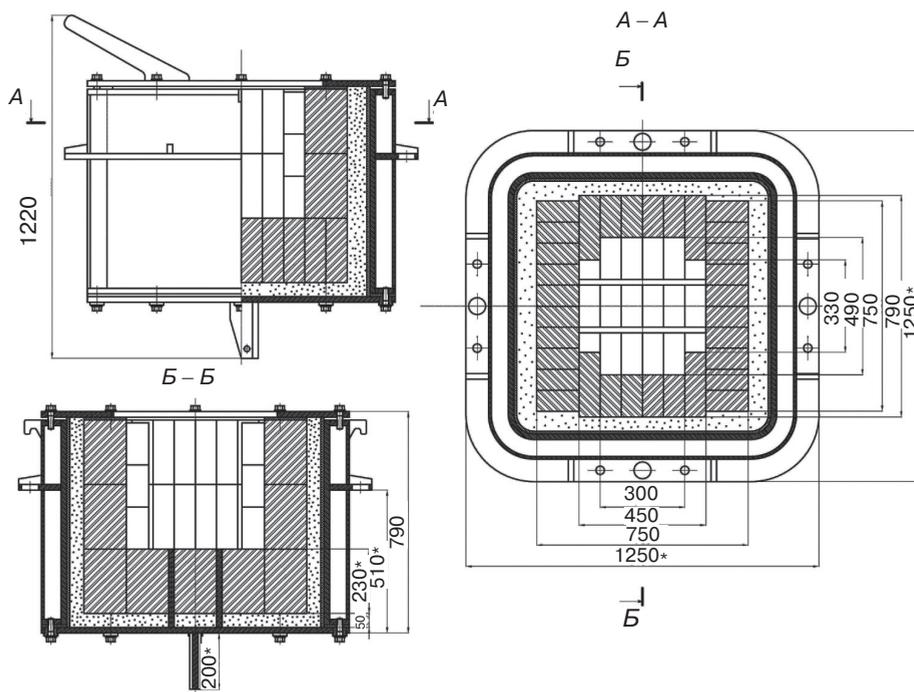


Рис. 2. Чертеж тигля ЭШТП

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.

При проведении исследований использовался источник питания постоянного тока типа Б5-47 с возможностью получения напряжения в диапазоне от 0,1 до 29,9 В с шагом 0,1 В и погрешностью установки напряжения 0,5 %, вольтметр типа В7-21А с диапазоном измерения напряжения от 1 мкВ до 1000 В и классом точности 0,04/0,02, амперметр типа М1104 с диапазоном измерения постоянного тока от 0 до 30 А и классом точности 0,2.

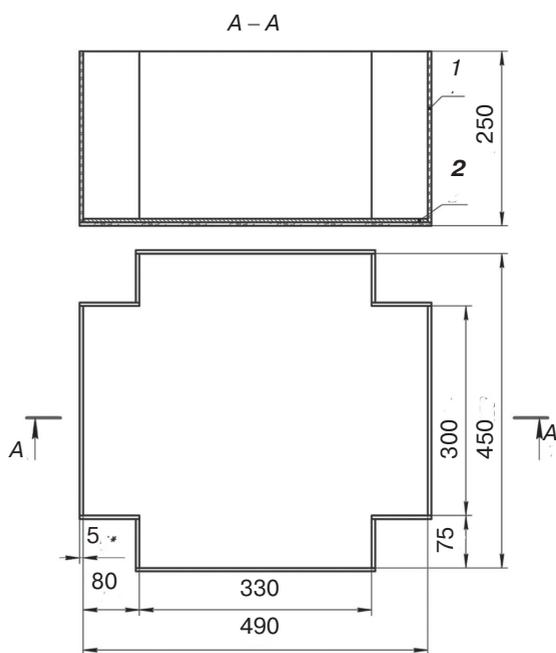


Рис. 3. Макет внутренней поверхности тигля ЭШТП: 1 – стеклянная емкость; 2 – металлическая пластина

В качестве заменителя шлака использовался водный раствор хлорида натрия. В начале и конце каждой серии экспериментов измерялось удельное электрическое сопротивление раствора, которое использовалось в дальнейшем при расчете математических моделей. Для измерения удельного электрического сопротивления солевого раствора был создан специальный цилиндрический пробник, состоящий из корпуса, крышки и двух металлических круглых пластин с токоподводящими проводами (рис. 5).

Расчет удельного электрического сопротивления раствора проводился по формуле:

$$\rho = \frac{U_{пл}}{I_{пл}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{пл}^2}{4 \cdot L_{пл}}, \quad (4)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление раствора, Ом·м; $U_{пл}$ – напряжение между пластинами, В; $I_{пл}$ – сила электрического тока между пластинами, А; $D_{пл}$ – диаметр пластин, м; $L_{пл}$ – расстояние между пластинами, м.

Размеры электродов и конусов

Диаметр электрода, мм	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
Высота конуса, мм	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	20	20	20	20	20	20	20	20	30	30	30
	30	30	40	40	30	30	30	30	50	80	80
	50	50	60	70	50	50	50	50	80	130	140
	–	–	–	–	80	70	70	80	120	–	–
–	–	–	–	–	90	100	110	–	–	–	

Порядок проведения экспериментов состоял из следующих этапов: измерение удельного электрического сопротивления солевого раствора, монтирование в лабораторной установке электрода соответствующего диаметра с соответствующим конусом, подключение его к электрической цепи, погружение на требуемую глубину, включение электрической цепи, измерение напряжения и силы электрического тока. Изменение глубины погружения электродов осуществлялось с шагом 10 мм при помощи специально изготовленной планки с пазами.

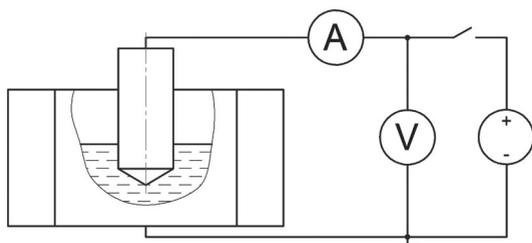


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Для расчета математической модели использовалась программная над-

Получение и обработка расплавов

стройка «Анализ данных», которая входит в пакет MS Excel.

Результаты исследований

В ходе проведения эксперимента было сделано 881 измерение напряжения и силы тока при различных значениях факторов – диаметра электрода, расстояния между торцом электрода и металлической пластиной, высоты конуса электрода и его заглубления (рис. 1).

Для каждой точки были рассчитаны значения электрического сопротивления ванны, которые по формуле (2) были пересчитаны в значения коэффициента конфигурации. Таким образом, удалось получить зависимость (3) в табличном виде.

На рис. 6-8 представлены некоторые полученные зависимости коэффициента конфигурации тигля от параметров плавки.

Проанализировав полученные зависимости и задав общий вид математической модели при помощи регрессионного анализа были рассчитаны коэффициенты математической модели.

Полученная математическая модель имеет вид:

$$k = 574,208 \cdot D_{\text{эл}}^2 - 81,645 \cdot D_{\text{эл}} - 1009,788 \cdot D_{\text{эл}}^3 + 888,977 \cdot L + 260,847 \cdot H_{\text{к}} + 236,245 \cdot L_{\text{п}} - 374,197 \cdot D_{\text{эл}} \cdot L - 90,007 \cdot D_{\text{эл}} \cdot H_{\text{к}} - 3375,867 \cdot L_{\text{п}} \cdot H_{\text{к}} - 3421,733 \cdot L \cdot L_{\text{п}} - 3362,497 \cdot L^2 - 38,167, \quad (5)$$

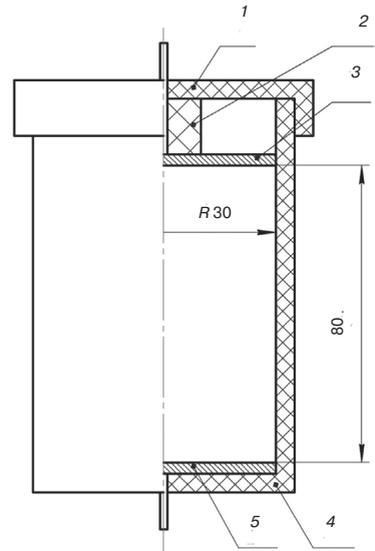


Рис. 5. Чертеж пробника для определения удельного электрического сопротивления раствора: 1 – крышка; 2 – вставка; 3 – верхний электрод; 4 – корпус; 5 – нижний электрод

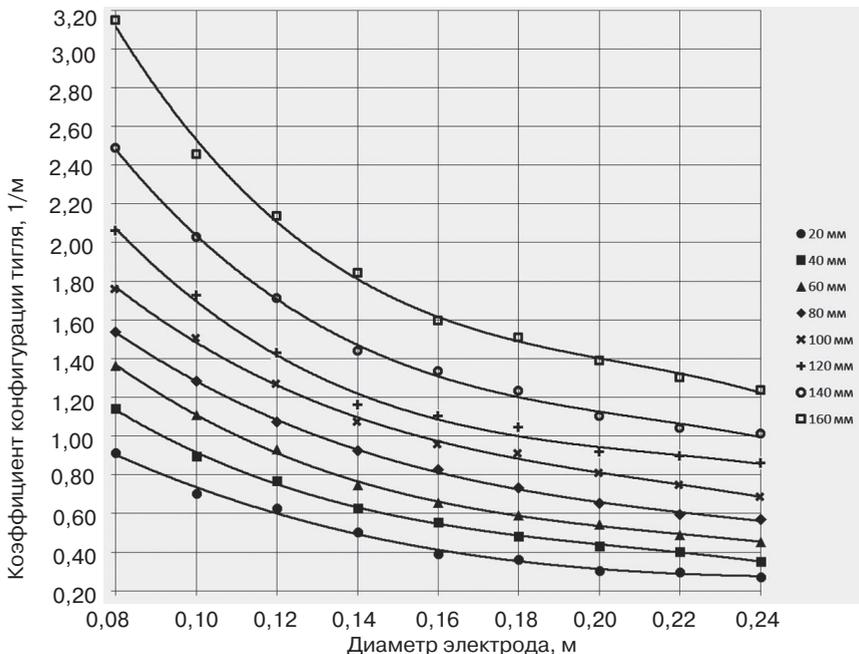


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента конфигурации тигля от диаметра электрода для разных значений расстояний между торцом электрода и ванной жидкого металла для электрода без конуса

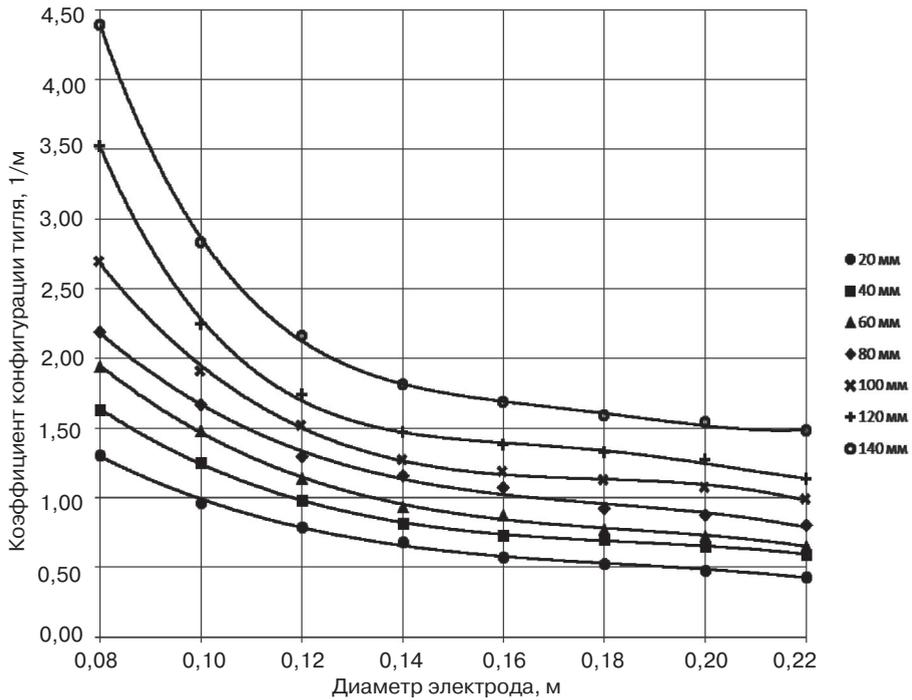


Рис. 7. Графики зависимости коэффициента конфигурации тигля от диаметра электрода для разных значений расстояний между торцом электрода и ванной жидкого металла для электрода с конусом высотой 20 мм

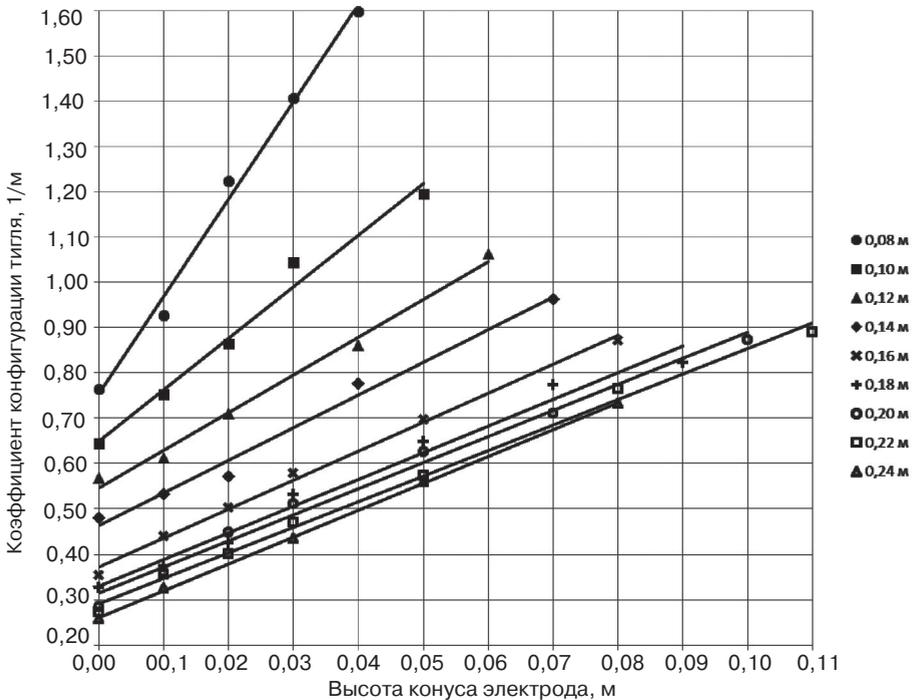


Рис. 8. Графики зависимости коэффициента конфигурации тигля от высоты конуса электрода для разных значений диаметров электрода для расстояния между торцом электрода и поверхностью ванны жидкого металла 10 мм

Получение и обработка расплавов

где k – коэффициент конфигурации тигля, $1/\text{м}$; $D_{\text{эл}}$ – диаметр электрода, м; L – расстояние между торцом электрода и поверхностью ванны жидкого металла, м; $H_{\text{к}}$ – высота оплавленной части электрода, м; $L_{\text{п}}$ – длина погруженной в шлак части электрода, м.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,94 при уровне надежности 95 %.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации параметры шлаковой системы должны находиться в следующих диапазонах: $D_{\text{эл}} \in 0.08 \dots 0.24$ м, $L \in 0 \dots 0.2$ м, $H_{\text{к}} \in 0 \dots 0.08$ м, $L_{\text{п}} \in 0 \dots 0.16$ м.

Выводы

Рассчитанная математическая модель зависимости коэффициента конфигурации тигля от параметров шлаковой ванны ЭШТП показала высокую эффективность (степень достоверности аппроксимации составляет 0,94), что позволяет применять ее для расчета активного электрического сопротивления шлаковой ванны ЭШТП при проведении инженерных расчетов, а также в разнообразных компьютерных программах, имитационных моделях и т. д.



Список литературы

1. Казачков Е. А. Электрошлаковый переплав. Ч. 1. / Е. А. Казачков, А. Д. Чепурной. – Мариуполь: ПГТУ, 1995. – 83 с.
2. Иванова О. С. Имитационная модель электрошлаковой тигельной плавки на жидком старте / О. С. Иванова, В. Н. Рыбак, Р. О. Лысюк // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 1. – С. 9 – 13.
3. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: Учебное пособие для вузов / А. В. Егоров. – М.: МИСИС, 2000. – 272 с.



References

1. Kazachkov E. A., Chepurnoy A. D. (1995) Elektroshlakovy pereplav. Ch. 1. [*Electroslag remelting*. P. 1]. Mariupol: PGU, 83 p.
2. Ivanova O. S., Rybak V. N., Lysyuk R. O. (2016) Imitatsionnaya model elektroshlakovoy tigelnoy plavki na zhidkom starte [*Simulation model of electroslag crucible melting on a liquid start*]. Metall i lite Ukrainy, no. 1, pp. 9-13.
3. Egorov A. V. (1990) Raschet moshchnosti i parametrov elektroplavilnykh pechey: Uchebnoe posobie dlya vuzov [*Calculation of parameters of electric power and steel industry: Textbook for Universities*]. Moscow: MISIS, 272 p.

Поступила 15.02.2017