

Влияние формы тока дуги на реактивность эквивалентной схемы дуговых сталеплавильных печей

КРУЧИНИН А.М., ЧУРСИН А.Ю.

Показаны сложности, возникающие перед специалистами при определении оптимальных режимов плавки во все периоды работы дуговых сталеплавильных печей различных конструкций шихтового материала. Предлагается при решении данной задачи воспользоваться методикой, в основе которой лежит теплообменная модель электрической дуги. Авторами предложена формула, учитывающая влияние на показатель реактивности эквивалентной схемы дуговой печи типа ее конструкции, показателя интенсивности теплообмена дуги в заданный период плавки и показателя импеданса печи. При решении задачи учтены такие факторы, как условия теплообмена дуги в плавильном пространстве, влияние теплового режима электродов, а также длины дуги на структуру тепловых потоков при нагреве дугами, химического состава рабочей среды на теплофизические характеристики плазмы столба дуги.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрическая дуга, дуговые сталеплавильные печи, теория нагрева электрической дугой, сложности оптимальных режимов плавки, теплообменная модель дуги

При проектировании и наладке рационального электрического режима дуговых сталеплавильных печей (ДСП) с целью повышения устойчивости горения дуг и снижения расхода электроэнергии на плавление шихты приходится решать ряд методологических проблем. Они вызваны отсутствием математических методов описания связи электрических процессов в электрическом контуре установки ДСП с тепловым режимом в плавильном пространстве при плавлении шихты [1–4]. Одной из проблем является основополагающая задача определения рабочей реактивности эквивалентной схемы ДСП в расчете электрических и рабочих характеристик печи.

Принятые для решения этой задачи классические методы математического моделирования электрического контура установки ДСП с применением динамических вольт-амперных характеристик дуги [2–5], рассчитанных на основе электрической модели динамической дуги Кассии, отличаются математической неопределенностью и не имеют однозначного решения. Специалистами в мировой практике проектирования ДСП были приняты методы обобщения показателя влияния формы тока дуги на реактивность эквивалентной схемы ДСП (показателя реактивности ДСП) K_p или K_x на основе экспериментальных данных из опыта режимов действующих в промышленности дуговых печей. Однако применение этих обобщенных характеристик показателя реактивности ДСП в практике проектирования и наладки рационального электрического режима значительно расходятся с опытни-

ми данными конкретной печи. Многофакторность данной задачи обусловлена зависимостью показателя реактивности ДСП от типа конструкции и технологии плавки, условий теплообмена дуги в плавильном пространстве, вторичного напряжения печного трансформатора, показателя импеданса печи, диаметра и теплового режима электродов. Решение данной многофакторной задачи возможно только на основе теплообменной модели электрической дуги (ТОМЭД) [6], основанной на положениях современной теории нагрева электрической дугой и устанавливающей однозначную связь электрического и теплового режимов ДСП с учетом перечисленных факторов.

Обобщенные опытные зависимости показателя реактивности ДСП. Широко известными исследованиями в этой области являются работы американских [7] и итальянских [8] специалистов по исследованию реактивности ДСП высокой и сверхвысокой мощности. Исследования [7] позволили установить зависимость показателя реактивности ДСП от ёмкости (вместимости) печей, работающих в период жидкой ванны. Эта зависимость графически представлена на рис.1 в виде значений реактивного сопротивления эквивалентной схемы ДСП для рабочего режима и режима опыта короткого замыкания печи.

Линейные зависимости на рис. 1 можно представить формулами (X_3 и $X_{кз}$ в мОм):

$$X_3 = X_e = 2,7252 + 0,00442G_p; \quad (1)$$

$$X_{кз} = X_{kz} = 2,6942 + 0,0028887G_p. \quad (2)$$

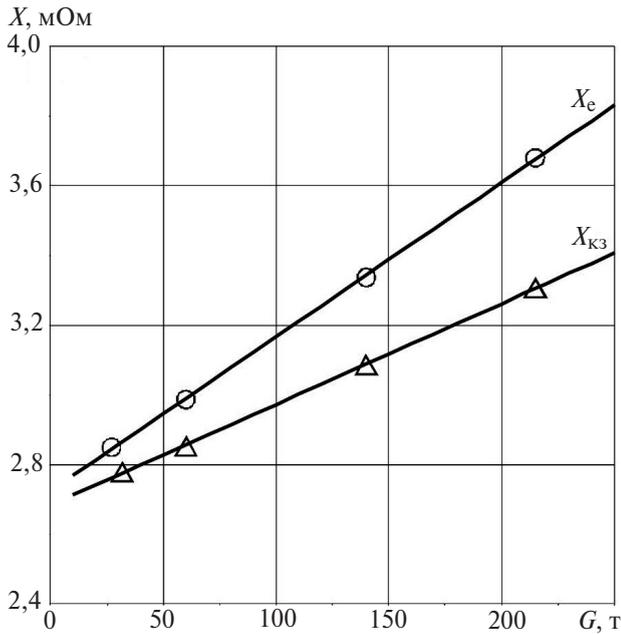


Рис. 1. Зависимость реактивного сопротивления эквивалентной схемы ДСП от емкости: $X_э$ – эксплуатационный (рабочий) режим; $X_{кз}$ – синусоидальный режим

На основе (1) и (2) можно записать обобщенную зависимость показателя реактивности ДСП от емкости печи:

$$K_X^* = X_э / X_{кз} = 1,0218 + 4,162 \cdot 10^{-4} G_p. \quad (3)$$

Зависимость относится к ДСП высокой мощности типа конструкции – $n_{pm} = 3$: верхняя часть стен из плавлено-литого периклазохромитового кирпича; свод из периклазохромитовых кирпичей типа ПХСП, ПХСУТ, ПХСОТ с металлическими вставными водоохлаждаемыми элементами.

Тип конструкции, а следовательно и режим плавки зависят от уровня активной мощности печи [8, 9] (рис. 2), которая может быть определена на основании алгоритма:

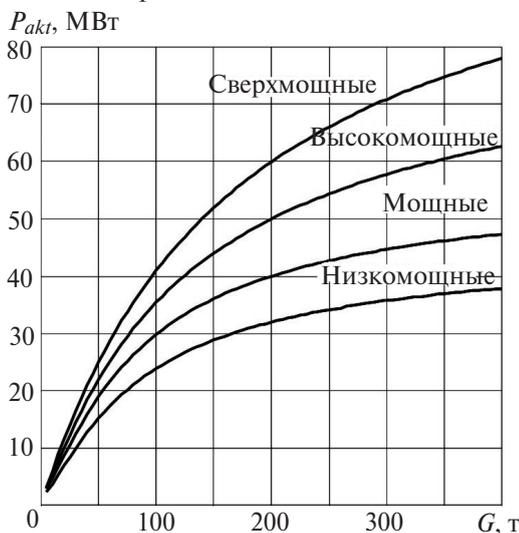


Рис. 2. Классификация ДСП по уровню активной мощности

$$(P_{akt})_{SW} = (P_{ud})_{SW} G_p, \text{ кВт}; \quad (4)$$

$$(P_{ud})_{SW} = \left[\frac{(a + cG_p)}{1 + bG_p + dG_p^2} \right]^2, \text{ кВт}. \quad (5)$$

Коэффициенты формулы (5): $a=37,052$; $b=0,27337527$; $c=6,32381$; $d=0,00048963624$.

$$(P_{akt})_{WM} = \frac{(P_{akt})_{SW}}{1,22}, \text{ кВт}; \quad (6)$$

$$(P_{akt})_M = \frac{(P_{akt})_{SW}}{1,445}, \text{ кВт}; \quad (7)$$

$$(P_{akt})_{NM} = \frac{(P_{akt})_{SW}}{1,9}, \text{ кВт}. \quad (8)$$

В соответствии с приведенной классификацией ДСП можно ввести показатель типа конструкции печи n_{pm} . Для ДСП малой мощности показатель типа конструкции печи $n_{pm} = 1$, значение активной мощности лежит ниже границы $(P_{akt})_M$, а конструкция отличается следующими свойствами: стены из магнезитового кирпича; свод из динаса или термостойкого хромомagnesита.

Для ДСП повышенной мощности показатель типа конструкции печи $n_{pm} = 2$, значение активной мощности лежит ниже границы $(P_{akt})_{WM}$ и выше границы $(P_{akt})_M$. Конструкция отличается тем, что стены – из термостойкого хромомagnesита.

Для ДСП высокой мощности показатель, значение активной мощности лежит ниже границы и выше границы.

Конструкция отличается следующими свойствами: верхняя часть стен из плавлено-литого периклазохромитового кирпича; свод из периклазохромитовых кирпичей типа ПХСП, ПХСУТ, ПХСОТ с металлическими вставными водоохлаждаемыми элементами.

Для ДСП сверхвысокой мощности показатель $n_{pm} = 4$, значение активной мощности лежит ниже границы $1,2(P_{akt})_{SW}$ и выше границы $(P_{akt})_{SW}$.

Конструкция отличается следующими свойствами: стены в виде трубчатых холодильников, на специальные штыри внутренней поверхности которых наносится огнеупорная масса толщиной 40–50 мм, нижняя часть стен из огнеупорных графитопериклазовых кирпичей.

Для ДСП сверхвысокой мощности показатель $n_{pm} = 5$, значение активной мощности лежит выше границы $1,2(P_{akt})_{SW}$. Конструкция отличается следующими свойствами: стены в виде кессонов из листовой стали с внутренними перегородками для организации циркуляции воды.

Исследования [8] позволили установить связь показателя реактивности ДСП с коэффициентом мощности установки (рис. 2) для печей большой мощности при трех периодах плавки.

Для основного периода плавления твердой шихты кривую (2) на рис. 3 можно представить аппроксимативной зависимостью:

$$K_X = K_p = 1 + 1,44 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{\cos \varphi}{0,1474}\right). \quad (9)$$

Более удобной для проектирования ДСП является интерпретация формулы (9) в виде зависимости показателя реактивности ДСП от показателя импеданса ДСП $k_I = \frac{I_{rab}}{I_{kze}}$.

Необходимо отметить, что обобщение и идентификация электрических характеристик ДСП и всех энергофизических показателей ДСП невозможны относительно тока «глухого» короткого замыкания I_{kz} при полном отсутствии дуги (опыт короткого замыкания). При «зажигании» дуги сразу после подъема электрода в системе автоматического регулятора мощности после «глухого» короткого замыкания будет наблюдаться искажение формы тока дуги относительно основной гармоники. В этой связи показатель импеданса ДСП $k_I = \frac{I_{rab}}{I_{kze}}$ необходимо

соотносить не с током короткого замыкания I_{kz} , а с током зажигания дуги I_{kze} , учитывается увеличение реактивности в результате искажения формы тока. Ток зажигания дуги существенно отличается от тока короткого замыкания I_{kz} .

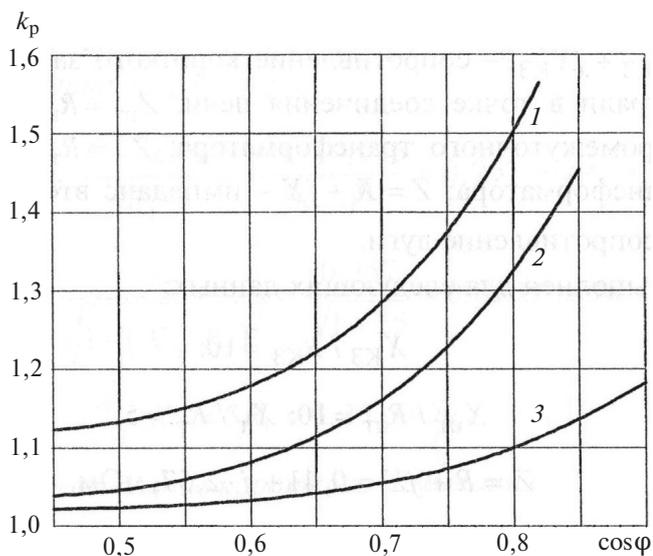


Рис. 3. Зависимость показателя реактивности ДСП от коэффициента мощности установки: 1 – начальный период плавления; 2 – основной период плавления твердой шихты; 3 – плавка пенистым шлаком

К сожалению, предложенное в [10] преобразование зависимости (9) показателя реактивности ДСП от показателя импеданса в виде

$$k_X = \left(\frac{I_{rab}}{I_{kz}}\right)^{-k}, \quad (10)$$

где $k=0,5 \div 0,6$, не учитывает основного условия подобия и идентификации электрических характеристик ДСП, базовым параметром обобщения которых является ток зажигания дуги I_{kze} , который в отличие от тока короткого замыкания I_{kz} , зависит от условий горения дуги в плавильном пространстве в каждый заданный период плавки.

Зависимость показателя реактивности ДСП от условий теплообмена дуги в плавильном пространстве печи и влияние показателя типа конструкции ДСП не учитываются в формулах (9) и (10), что обуславливает неопределенность их использования в решении задачи проектирования и наладки рационального электрического режима ДСП.

В частности, расчеты по (9) и (10), выполненные для печей различной емкости одного типа конструкции указывают на снижение показателя реактивности ДСП с увеличением емкости печи, что противоречит результатам опытных данных американских специалистов [7] (рис. 1).

Обобщенная зависимость показателя реактивности ДСП на основе методов ТОМЭД. Метод ТОМЭД [11] позволяет выполнить обобщение зависимости показателя реактивности ДСП с учетом как типа конструкции, так и условий теплообмена дуги в плавильном пространстве печи в зависимости от периода плавки, характеризуемого температурой среды, при которой горит дуга. Исследования и опыт эксплуатации дуговых сталеплавильных печей позволяют оценить средние значения температуры газа в плавильном пространстве по показаниям термопары, измеряющей температуру среды в верхней части ванны печи вблизи сводового кольца. Для каждой температуры среды в плавильном пространстве методом ТОМЭД были рассчитаны показатели интенсивности теплообмена дуги, горящей в среде оксидов углерода:

Начало плавления шихты	Конец проплавления колодца в шихте	Расплавление основной массы шихты	Режим жидкой ванны	Конец плавки
F1	F2	F3	F4 _S	F4
$T_p = 1200$	$T_p = 1275$	$T_p = 1400$	$T_p = 1850$	$T_p = 1935$
$K_{jf} = 3,2$	$K_{jf} = 2,9$	$K_{jf} = 2,4$	$K_{jf} = 1,2$	$K_{jf} = 1,0$

Таким образом, с учетом типа конструкции ДСП и показателя интенсивности теплообмена дуги формула (3) принимает вид:

$$K_X(n_{pm}) = (1,0218 + 4,162 \cdot 10^{-4} G_p) [T] \times \frac{(0,85 + 0,15 \cdot 3)^{0,25}}{(0,85 + 0,15 n_{pm})^{0,25}} k_{ff}^{0,25} \quad (11)$$

или

$$K_X(n_{pm}) = \frac{1,06779(1,0218 + 4,162 \cdot 10^{-4} G_p) [T]}{(0,85 + 0,15 n_{pm})^{0,25}} k_{ff}^{0,25}. \quad (12)$$

С учетом показателя импеданса ДСП или, иными словами, показателя рабочего тока дуги формула показателя реактивности эквивалентной схемы ДСП принимает вид:

$$K_X(n_{pm}) = \frac{1,06779(1,0218 + 4,162 \cdot 10^{-4} G_p) [T]}{(0,85 + 0,15 n_{pm})^{0,25}} \times \left(\frac{I_{rab}}{I_{kze}} \right)^{-0,15} k_{ff}^{0,25}. \quad (13)$$

Предложенная обобщенная на основе методов ТОМЭД, формула показателя реактивности эквивалентной схемы ДСП позволяет учесть многофакторность влияния формы тока дуги на реактивность эквивалентной схемы ДСП. Приведенная в статье формула отличается от известных в практике проектирования дуговых печей формул тем, что учитывает влияние на показатель реактивности эквивалентной схемы ДСП типа конструкции печи, показатель интенсивности теплообмена дуги в заданный период плавки и показатель импеданса печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maecker H. Plasmaströmungen in Lichtbogen infolge eigen-magnetischer Kompression. *Z für Physik*, 141 (1955) pp. 198–216.

Electrichestvo, 2020, No. 9, pp. 40–44

2. Платонов. Параметры и электрические режимы металлургических электродных печей. М.: Энергия, 1965, 150 с

3. Bowman B. Measurements of plasma velocity distributions in free-burning DC arcs up to 2160A. *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 5 (1972), pp. 1422–1432.

4. Свенчанский А.Д., Жердев И.Д., Кручинин А.М. др. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки спецагрева/Под ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат. 1981. 296 с

5. Миронов Ю.М., Миронова А.Н. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок. М.: Энергоатомиздат, 1991, 376 с.

6. Кручинин А.М. Физические основы теплообменной модели электрической дуги в электротехнологии. — Сб.: докладов научно-технического семинара «Электротехнология в первом десятилетии XXI в.», посвященного 100-летию проф. М.Я. Смелянского, М.: Изд-во МЭИ 2013, с. 55–77.

7. Смоляренко В.Д. Высокомощные дуговые сталеплавильные печи. М.: Энергия, 1976, 104 с.

8. Алиферов А.И., Бикеев Р.А., Горева Л.П., Луи С., Форцан М., Барглик Д. Дуговые печи. Учебное пос. для вузов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016, 204 с.

9. Кручинин А.М., Погребиский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю. Прогнозирование расхода электрической энергии при наладке энергосберегающего электрического режима дуговых сталеплавильных печей. *Электротехнология*, 2018, № 11, с.16–21.

10. Миронов Ю.М. Электромеханика электрических печей дугового, резистивного и смешанного нагрева: Монография. М.: ИНФРА-М, 2018, 336 с.

11. Кручинин А.М., Погребиский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю. Прогнозирование энергопотребления в период плавки шихты в дуговых сталеплавильных печах. — *Вестник МЭИ*, 2019 № 6, с. 83–90.

[13.03.2020]

А в т о р ы: Кручинин Анатолий Михайлович — доктор техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий» НИУ «МЭИ».

Чурсин Андрей Юлианович — заведующий учебной лабораторией кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий» НИУ «МЭИ».

DOI:10.24160/0013-5380-2020-9-40-44

The Influence of the Arc Current Waveform on the Electric Arc Steelmaking Furnace Equivalent Circuit Reactance

KRUCHININ Anatoly M. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Technologies Dept., Dr. Sci. (Eng.)

CHURSIN Andrey Yu. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Leading Engineering of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Technologies Dept.

Difficulties encountered by specialists in determining the optimal charge material melting modes at all operation stages of electric arc steelmaking furnaces of different designs are described. It is proposed to solve the problem by using a procedure based on the electric arc heat transfer model. A formula for the arc furnace equivalent circuit reactance is suggested that takes into account the furnace design, the arc heat transfer intensity indicator in the specified melting stage, and the furnace impedance indicator. In solving

the problem, the influence of such factors as the arc heat transfer conditions in the melting space, the thermal operation conditions of the electrodes, the arc length on the structure of heat fluxes in heating by arcs, and also the effect the working medium chemical composition has on the thermophysical characteristics of the arc column plasma are taken into account.

Key words: *electric arc, electric arc steelmaking furnaces, electric arc heating theory, complexities of optimal melting modes, arc heat transfer model*

REFERENCES

1. **Maecker H.** Plasmaströmungen in Lichtbogen infolge eigen-magnetischer Kompression. *Z für Physik*, 141 (1955), pp. 198–216.
2. **Platonov.** *Parametry i elektricheskiye rezhimy metallurgicheskikh elektrodnykh pechey* (EnergiyaParameters and electrical modes of metallurgical electrode furnaces). M.: Energiya, 1965, 150 p.
3. **Bowman B.** Measurements of plasma velocity distributions in free-burning DC arcs up to 2160A. *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 5 (1972), pp. 1422–1432.
4. **Svenchanskiy A.D., Zherdev I.D., Kruchinin A.M. i dr.** *Elektricheskiye promyshlennyye pechi. Dugovyye pechi i ustanovki spetsnagreva/Pod red. A.D. Svenchanskogo* (Electric industrial ovens. Arc furnaces and special heating installations/Ed. HELL. Svenchansky). M.: Energoizdat, 1981, 296 p.
5. **Mironov Yu.M., Mironova A.N.** *Elektrooborudovaniye i elektrosnabzheniye elektrotermicheskikh, plazmennyykh i luchevyykh ustanovok* (Electrical equipment and power supply of electrothermal, plasma and beam installations). M.: Energoatomizdat, 1991, 376 p.
6. **Kruchinin A.M.** *Fizicheskiye osnovy teploobmennoy modeli elektricheskoy dugi v elektrotekhnologii.* – *Sb.: dokladov nauchno-tekhnicheskogo seminara «Elektrotekhnologiya v pervom desyatiletii XXI v.»*, posvyashchen–nogo 100-letiyu prof. M.Ya. Smelyanskogo (Physical foundations of the heat exchange model of an electric arc in electrical technology. - Sat: reports of the scientific and technical seminar «Electrotechnology in the first decade of the XXI century», dedicated to the 100th anniversary of prof. M. Ya. Smelyanskiy). M.: Izd-vo MEI, 2013, pp. 55–77.
7. **Smolyarenko V.D.** *Vysokomoshchnyye dugovyye staleplavil'nyye pechi* (High power arc furnaces). M.: Energiya, 1976, 104 p.
8. **Aliferov A.I., Bikeyev R.A., Goreva L.P., Lupi S., Fortsan M., Barglik D.** *Dugovyye pechi: Uchebnoye pos. dlya vuzov* (Arc furnaces. Educational settlement for universities). Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016, 204 p.
9. **Kruchinin A.M., Pogrebisskiy M.Ya., Ryazanova Ye.S., Chursin A.Yu.** *Elektrometalurgiya – in Russ. (Electrometallurgy)*, 2018, No. 11, pp. 16–21.
10. **Mironov Yu.M.** *Elektromekhanika elektricheskikh pechey dugovogo, rezistivnogo i smeshannogo nagreva: Monografiya* (Electromechanics Electric arc furnaces, resistive and mixed heating: Monograph). M.: INFRA-M, 2018, 336 p.
11. **Kruchinin A.M., Pogrebisskiy M.Ya., Ryazanova Ye.S., Chursin A.Yu.** *Vestnik MEI – in Russ. (Nulletin of NRU «MPEI»*, 2019 No. 6, pp. 83–90.

[19.03.2020]