

О ПАРАМЕТРАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАТУШЕК ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Г. Е. Левшин

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Проведен анализ основных параметров главного элемента индукционной тигельной печи – электрической катушки – и их взаимосвязи с параметрами печи. Предложены новые критерии оценки эффективности работы катушки и пути ее повышения.

Ключевые слова: индукционная тигельная печь, электрическая катушка

ABOUT THE PARAMETERS OF THE ELECTRICAL COILS OF INDUCTION CORELESS FURNACES

G. E. Levshin

Altai state technical university, Barnaul, Russia

The analysis of the main parameters of the main element of coreless induction furnaces - electric coils - and their relationship with the parameters of the furnace. Proposed new criteria for evaluating the performance of coils and ways to improve it.

Ключевые слова: induction crucible furnace, electric coil

В индукционных индукторных тигельных печах электрическая катушка (ЭК) – индуктор – с площадью сечения $S_{\text{ЭК}}$ рабочей полости является главным элементом, т.к. создает в этой полости вертикальный переменный рабочий электромагнитный поток $\Phi_{\text{раб}} \approx B_e S_{\text{ЭК}}$ с частотой f и индукцией B_e , который индуцирует в садке электродвижущую силу (ЭДС) $U_{\text{инд}} \approx 4,44 f \Phi_{\text{раб}}$. Под действием ЭДС в каждом куске шихты или расплаве с сопротивлением $R_{\text{ш}}$ индуцируются вихревые токи суммарной величиной $I_{\text{инд}} \approx U_{\text{инд}}/R_{\text{ш}}$ и мощностью $P_{\text{инд}} \approx U_{\text{инд}} I_{\text{инд}} \approx (I_{\text{инд}})^2 R_{\text{ш}}$. ЭК создает и поток рассеяния $\Phi_{\text{рас.}}$, практически равный $\Phi_{\text{раб}}$ и находящийся вне этой полости [1 – 7]. Он составляет до 50 % полного магнитного потока Φ и не участвует в нагреве шихты и расплава, но бесполезно нагревает окружающие индуктор вертикальные магнитопроводы и другие электропроводные элементы печи [1].

Наиболее распространенная однофазная однослойная ЭК имеет следующие основные параметры: высоту $h_{\text{ЭК}}$, внутренний диаметр $D_{\text{ЭК}}$ рабочей полости, площадь сечения $S_{\text{ЭК}}$ полости, рабочий объем $V_{\text{ЭК}}$ полости, число витков w , ток $I_{\text{ЭК}}$, магнитодвижущую си-

лу (МДС) $I_{\text{ЭК}} w$ при электрическом напряжении $U_{\text{ЭК}}$ частотой f и полную электрическую мощность $P_{\text{пол}} = U_{\text{ЭК}} I_{\text{ЭК}}$, рабочую температуру T .

Представляет научный и практический интерес более внимательное рассмотрение отдельно только параметров ЭК печей различных размеров и назначения, полученных проектировщиками при их расчете.

Если связать МДС $I_{\text{ЭК}} w$ и $P_{\text{пол}}$ с перечисленными параметрами ЭК, то можно получить важную информацию для анализа работы ЭК.

МДС $I_{\text{ЭК}} w$ характеризует ЭК как средство для создания рабочего магнитного потока $\Phi_{\text{раб}}$ с необходимой индукцией B_e , при недостаточной величине которой плавка становится невозможной. Электромагнитное поле (полный поток Φ), создаваемое однофазной ЭК без садки, является очень неоднородным. Оно имеет близкую к тороидальной форму с разным направлением вектора индукции относительно центра тороида (ЭК) и неравномерное распределение величины индукции в ее рабочей полости. А именно: 1) по высоте – у торцов ЭК она почти в 2 раза меньше, чем в середине; 2) по сечению – у витков ЭК она заметно больше, чем у оси. Это приводит к по-

явлению значительных разнонаправленных градиентов индукции [1, 4].

При наличии садки в виде расплава с удельным электросопротивлением ρ ток в витках ЭК и создаваемое им поле направлены в противоположном направлении индуцированному ими в расплаве току и полю. Это обуславливает наличие значительных разнонаправленных градиентов индукции и электромагнитных и механических сил F отталкивания в расплаве и его интенсивное движение (двухконтурную циркуляцию) и перемешивание в разных направлениях с возможным выбросом его из тигля [1 – 4]. Это является причиной повышенного износа стенок тигля, нарушения сплошности шлакового покрова, увеличения угара металла и замешивания в расплав продуктов износа, воздуха и шлака (рисунок 1). Интенсивность циркуляции уменьшается с повышением частоты f , что позволяет увеличивать подводимую удельную мощность и скорость плавки. Однако это удорожает электрооборудование из-за наличия преобразователя частоты и снижает КПД при выдержке и перегреве расплава.

В середине ЭК силовое воздействие направлено внутрь, а на ее краях появляется и аксиальная составляющая. Силы F оказывают давление p на боковую цилиндрическую поверхность садки (расплава) диаметром d_c и высотой h_c [3]:

$$p = 31,6 P_{\text{инл}} 10^{-5} / (\rho f)^{0,5} \pi d_c h_c.$$

Оно действует преимущественно в радиальном направлении и выталкивает расплав вверх в средней части тигля. По бокам расплав вновь стекает вниз. Под действием радиальных сил на поверхности расплава с плотностью γ образуется мениск высотой $H_m = p/\gamma$. Он увеличивается до тех пор, пока значение металлостатического давления γH_m не сравняется с электродинамическим p .

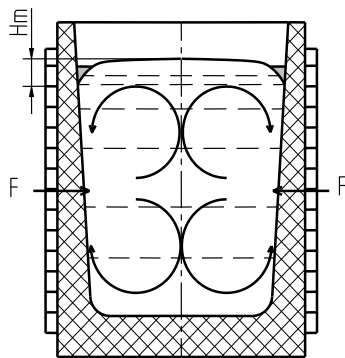


Рисунок 1 – Схема мениска и электродинамической циркуляции расплава

Высота H_m мениска повышается с уменьшением частоты поля и увеличением давления p и удельной мощности $P_{\text{уд}}$, передаваемой в садку и может быть определена и по формуле $H_m = k P_{\text{уд}} / f^{0,5}$, где k – коэффициент пропорциональности. Высота h_m увеличивает общую высоту тигля. Обычно H_m составляет до ~15 % высоты h_c [3].

Давление может быть увеличено до такой степени, что расплав перейдет во взвешенное состояние [3]. Поэтому максимальное значение индукции и электрической мощности ограничивается интенсивностью движения расплава для предупреждения выброса его из тигля. Для печей промышленной частоты $P_{\text{уд}}$ не превышает 400 кВт/т. Кроме того, в них верхний уровень ЭК располагают ниже уровня садки на 20...30 % ее высоты [7]. При этом для предотвращения перегрева верхней части тигля над садкой располагают «холостую» (бестоковую) водоохлаждаемую катушку (или кольцо). Если же она является рабочей частью ЭК, то с помощью отпайки отключается после расплавления шихты для уменьшения циркуляции. Однако уменьшение высоты ЭК уменьшает КПД.

Внутренний диаметр $D_{\text{ЭК}}$ ЭК определяется поперечными размерами садки, увеличенными на толщину футеровки тигля и теплоизоляции [3 – 7]:

$$D_{\text{ЭК}} = d_c + 2(t_1 + t_2),$$

где t_1 – эмпирическая толщина (в м) стенки тигля, равная (0,25...0,30) d_c для печей вместимостью $M_T < 0,5$ т; (0,15...0,25) d_c для M_T от 0,5 до 3 т; (0,10...0,15) d_c для $M_T > 3$ т;

t_2 – эмпирическая толщина (в м) изоляционного слоя из асбеста между тиглем и индуктором, равная: 0,005 м при $M_T < 3$ т; (0,005...0,01 м) при M_T от 3 до 15 т; (0,10...0,15 м) при $M_T > 15$ т.

Поскольку с увеличением вместимости M_T возрастает давление садки на тигель, толщина его стенок также увеличивается для обеспечения достаточной прочности тигля, особенно при его повороте для разливки расплава. Особо отметим, что при этом ЭК должна выдержать без заметной деформации воздействие на нее суммарной массы тигля и садки. Увеличение толщины футеровки уменьшает не только тепловые потери, но и, к сожалению, электрический КПД печи, т. к. повышается индуктивность и реактивная мощность ЭК из-за наличия зазора между садкой и ЭК [2 – 7].

Последнее объясняется тем, что и существенная часть рабочего потока $\Phi_{\text{раб}}$ с наибольшим значением индукции не

используется для полезного нагрева, т. к. проходит в этом зазоре, а не по садке. Все это уменьшает полезное использование полного потока Φ , создаваемого индуктором, почти до 10 – 35 %, а коэффициент мощности $\cos\varphi$ до 0,03 – 0,10 и повышает расход энергии. Покажем это используя только приведенное выше соотношение между внутренними диаметрами индуктора $D_{\text{ЭК}}$ и садки d_c [7].

Расчеты по этим данным для черных сплавов показывают следующее (таблица 1).

Таблица 1 – Геометрические параметры ЭК и садки

Диаметр $D_{\text{ЭК}}$, м	Диаметр d_c , м	Площадь $S_{\text{ЭК}}$, м ²	Кольцевая площадь $S_{\text{ТИ}}$, м ²	Полезная площадь $S_{\text{П}}$, м ²	Отношение $S_{\text{ТИ}}/S_{\text{ЭК}}$	Отношение $S_{\text{П}}/S_{\text{ЭК}}$
0,5	0,195	0,19625	0,166	0,0305	0,845	0,155
1,0	0,74	0,785	0,355	0,430	0,452	0,548
1,5	1,335	1,048	0,367	0,681	0,35	0,65

Следовательно, полезное использование рабочего магнитного потока $\Phi_{\text{раб}}$ зависит от диаметра индуктора и находится в пределах ~15,5 – 65 %, а полезное использование полного потока Φ , создаваемого индуктором, составляет ~10 – 35 % и повышается с увеличением его диаметра и вместимости тигля. Однако при этом значительно (практически прямо пропорционально вместимости M_T) возрастают мощность печи и расход электроэнергии [2 – 7].

Так, для печи ИЧТ-31 с диаметрами $D_{\text{ЭК}} = 1,97$ м и $d_c = 1,61$ м при толщине футеровки и изоляционного слоя 0,18 м полная расчетная мощность печи равна 44719 кВА, а реактивная мощность в зазоре между садкой и индуктором 37703 кВАр. Это означает, что $(37703/44719)100 = 84,3$ % электроэнергии расходуется впустую [7]. В печи ИСТ-0,16 такие потери составляют 91,1 %, в ИСТ-0,4 – 92,5 % [4, 6].

Высота ЭК составляет $h_{\text{ЭК}} = (0,7 \dots 1,3)h_c$ [7]. Для печей повышенной частоты высота $h_{\text{ЭК}}$ принимается большей, чем h_c , а для промышленной частоты высота $h_{\text{ЭК}}$ меньше, чем h_c (в т. ч. из-за повышенной высоты H_m мениска). Высота $h_{\text{ЭК}}$ практически всегда меньше высоты тигля h_T . С уменьшением $h_{\text{ЭК}}$ заметно снижается электрический КПД печи, т. к. он тем больше, чем выше ЭК при равных диаметрах $D_{\text{ЭК}}$ [3, 7]. При высоте ЭК $h_{\text{ЭК}} = h_T/2$ получаются наихудшие экономические показатели [3]. Увеличение же $h_{\text{ЭК}}$ (без изменения диаметра $D_{\text{ЭК}}$) затрудняет изготовление и ремонт узкого и глубокого тигля и загрузку шихты. Поэтому высота $h_{\text{ЭК}}$ мало отличается от

Для печи с $D_{\text{ЭК}} = 0,5$ м диаметр садки $d_c = 0,5 - (0,3 + 0,005) = 0,195$ м. Круговая площадь ЭК $S_{\text{ЭК}} = 0,19625$ м², а кольцевая площадь, занятая стенками тигля и теплоизоляцией, $S_{\text{ТИ}} = 0,166$ м². Она составляет 84,5 % от площади ЭК $S_{\text{ЭК}}$, оставляя для полезной площади $S_{\text{П}}$ шихты только 15,5 %. Для печи с $D_{\text{ЭК}} = 1$ м диаметр садки $d_c = 1 - (0,25 + 0,01) = 0,74$ м. Для печи с $D_{\text{ЭК}} = 1,5$ м диаметр садки $d_c = 1,5 - (0,15 + 0,015) = 1,335$ м.

диаметра $D_{\text{ЭК}}$: $h_{\text{ЭК}} = (0,8 \dots 1,1)D_{\text{ЭК}}$ [2 – 7].

Мощность $P_{\text{пол}} = U_{\text{ЭК}}I_{\text{ЭК}}$ характеризует ЭК как потребителя электроэнергии для выполнения своей главной функции. Она также прямо или косвенно связана с другими параметрами ЭК.

При своей работе ЭК, имеющая длину медного трубчатого проводника $L_{\text{пр}}$ сечением $S_{\text{пр}}$ с удельным электросопротивлением $\rho_{\text{пр}}$, может характеризоваться электросопротивлениями активным $R = \rho_{\text{пр}}L_{\text{пр}}/S_{\text{пр}}$, полным $z = U_{\text{ЭК}}/I_{\text{ЭК}}$, индуктивным $X_L = \sqrt{z^2 - R^2}$ и индуктивностью $L_{\text{ЭК}} = X_L/2\pi f$. Из-за малости R обычно принимают $z \approx X_L \approx U_{\text{ЭК}}/I_{\text{ЭК}}$. Индуктивность ЭК с ферромагнитным заполнением, имеющим магнитную проницаемость μ_i , можно приближенно оценить и по формуле [8] $L_{\text{ЭК}} = \mu_0\mu_i w^2 S_{\text{ЭК}}/h_{\text{ЭК}}$.

Она показывает, что индуктивность ЭК с ферромагнитной садкой больше в μ_i раз, чем с неферромагнитной. Индуктивность ЭК возрастает с увеличением площади $S_{\text{ЭК}}$ и весьма значительно (в квадрате) числа ее витков w , но уменьшается с увеличением высоты $h_{\text{ЭК}}$. Поэтому для снижения электрической мощности ЭК целесообразно уменьшение ее индуктивности путем оптимизации значений w , $S_{\text{ЭК}}$, $h_{\text{ЭК}}$.

Приравнивая значения $L_{\text{ЭК}}$, полученных по этим формулам, можно оценить величину $\mu_i = X_L h_{\text{ЭК}} / 2\pi f \mu_0 w^2 S_{\text{ЭК}}$, не проводя специальных измерений, т. к. все величины в этой формуле, кроме X_L , известны до включения печи, а X_L становится известной после включения (по показаниям щитовых приборов).

Индуктивность ЭК $L_{\text{ЭК}}$ и полное электросопротивление z изменяются во время плав-

ки (из-за изменения магнитного и агрегатного состояния садки и увеличения электросопротивления), при переходе на шихту других размеров или с немагнитной на магнитную, по мере износа тигля. Это отражается на КПД печи и расходе электроэнергии. Поэтому для интенсификации работы печи применяют отпайки от витков ЭК, позволяющие регулировать число ее витков при работе печи. Это позволяет снизить удельный расход электроэнергии на 10 – 15 %, а отключением «холостой» ЭК высоту мениска. Подключением этой ЭК можно устранить еще и образование «мостов» из шихты.

После расчета МДС Iw встает вопрос определения величины тока I и числа витков w ЭК при заданном или выбранном напряжении питания U . Число витков w влияет на активное R и индуктивное X_L сопротивление ЭК и потери активной мощности $P = I^2 R$ в ней. Определять число витков w необходимо наиболее тщательно, т. к. после изготовления ЭК его трудно увеличить. Возможно уменьшение, если ЭК выполнена с отпайками секций, путем их отключения. Напряжение питания U технически легче регулировать (автотрансформатором, секционным трансформатором, изменением емкости конденсаторной батареи и др.).

Из формулы $P = I^2 R$ видно, что для снижения потерь активной мощности надо уменьшить величину активного сопротивления R ЭК. Это достигается увеличением площади поперечного сечения $S_{пр}$ проводника витка, но до некоторых пределов, зависящих от вида материала проводника и частоты f и определяемых скин-эффектом, т. е. толщиной Δ поверхностного скин-слоя проводника, по которому в основном течет ток. Так, для меди при частоте $f = 50$ Гц $\Delta = 9,34$ мм, при 60 Гц – 8,53 мм, при 10 кГц – 0,66 мм [2, 3]. Следовательно, для эффективного использования сечения проводника его диаметр или толщина не должны существенно превышать эти величины. Кроме того, для создания необходимой индукции в рабочей полости ЭК величину тока $I_{ЭК}$ в ее витках выбирают из условия обеспечения плотности тока менее 20 А/мм^2 [2 – 7]. Однако с увеличением тока и его плотности повышается нагрев ЭК за счет тепла $Q = I^2 R t$ в течение времени t , которое надо отводить от ЭК, охлаждая ее.

Эти задачи решают изготовлением проводника из специальной медной трубки с указанной толщиной стенки, обращенной к тиглю. При этом через полость трубки пропускают под давлением до 0,2 – 0,7 МПа со ско-

ростью 1 – 1,5 м/с охлаждающую кондиционную воду (дистиллированную или с содержанием механических примесей до 80 г/м^3 , определенной жесткостью до 7 г-экв/м^3 , температурой $\leq 35 - 40^\circ\text{C}$ и водородным показателем $pH = 7$) [1]. Скорость менее 0,5 м/с не обеспечивает турбулентность потока воды, а более 1,5 м/с существенно увеличивает давление. Средняя температура T нагрева ЭК и выходящей охлаждающей воды желательна $\leq 40...50^\circ\text{C}$ для уменьшения образования накипи [2, 3], что предполагает большой расход водопроводной воды или значительные затраты энергии на охлаждение оборотной воды. Эта температура T должна превышать окружающую во избежание конденсации на ЭК влаги из воздуха и возможного пробоя изоляции.

С увеличением размеров ЭК возрастает суммарная длина трубчатых витков, гидравлическое сопротивление протеканию воды в трубке и давление, ухудшается охлаждение ЭК. Поэтому ЭК разделяют на n групп с отдельным подводом и отводом воды (без разрыва электрической цепи), подключаемых параллельно к источнику водоснабжения. Такое группирование ЭК снижает скорость воды в n раз [2].

В малых ЭК предусматривают между витками воздушный электроизоляционный зазор 10...20 мм, а в больших ЭК обычно наносят поверх трубки электроизоляционный слой толщиной $\geq 1,5$ мм для предупреждения межвиткового замыкания и уменьшения зазора. Обычно напряжение на 1 мм изоляционного зазора между витками составляет 10...40 В и не должно превышать 200 В [4].

ЭК скрепляют с жестким каркасом печи с помощью неэлектропроводных стоек двояко: 1) каждый виток латунными шпильками или уголками к стойке, обеспечивая зазор 10...20 мм; 2) изолированные витки ЭК сжимаются между плитами или водоохлаждаемыми кольцами с помощью регулируемых стоек.

Однако все это увеличивает поперечные размеры трубки, сложность конструкции и трудоемкость изготовления ЭК и ее эксплуатации, ограничивает число витков однослойной ЭК по ее высоте.

Реально уменьшить величину R можно, лишь выполняя ЭК из нескольких n параллельных проводников. Если параллельные проводники изолировать один от другого и соответствующим образом транспонировать, то можно получить для них одинаковую самоиндукцию, сопротивление, а также распо-

ложение их по отношению к садке. В этом случае сопротивление R , а следовательно, и потери P в ЭК уменьшаются в $1/n^{0,5}$ раз. Это приводит к увеличению электрического КПД печи η_{Σ} [2].

При выполнении ЭК из n параллельных проводников повышенное значение электрического КПД печи η_{Σ} равно

$$\eta_{\Sigma} = n^{0,5} \eta_{\Sigma} / [1 + \eta_{\Sigma}(n^{0,5} - 1)]$$

Значения электрического КПД η_{Σ} индукторной печи в зависимости от количества n параллельных проводников в ЭК приведены в таблице 2. Легко видеть, что при реальном КПД печи $\eta_{\Sigma} = 0,5$ увеличение числа n проводников с 1 до 4 повышает η_{Σ} в 1,3 раза, а до 9 – в 1,5 раза и т. д.

Однако выполнение ЭК из параллельных трубчатых проводников пока практически решить не удалось вследствие конструктивной сложности [2], связанной с необходимостью расположения трубчатых витков более, чем в один ряд, и подачи в них охлаждающей воды.

Помимо рассмотренных соотношений и формул возможны и другие зависимости для оценки взаимосвязи параметров ЭК.

Так, если отнести МДС $I_{\Sigma}w$ к высоте h_{Σ} ЭК, то получим оценку физической величины напряженности $H_{\Sigma} \approx I_{\Sigma}w/h_{\Sigma} = B_e/\mu_0$ [А/дм] магнитного поля в ее полости. В теории индукционных тигельных печей аналогичное отношение (приходящееся на 1 м высоты) иногда называют настилом тока по поверхности садки или ЭК [4 – 6].

Отношение МДС $I_{\Sigma}w$ к площади сечения S_{Σ} полости ЭК дает критерий $K_{мп} = I_{\Sigma}w/S_{\Sigma}$ [А/дм²] магнитной поверхностной энергоёмкости, позволяющий сравнивать печи с ЭК разных диаметров (сечений).

Отношение же МДС $I_{\Sigma}w$ к рабочему объёму V_{Σ} полости ЭК дает критерий $K_{mv} = I_{\Sigma}w/V_{\Sigma}$ [А/дм³] магнитной объёмной энергоёмкости, позволяющий сравнивать печи с ЭК разных объёмов.

Таблица 2 – Значения η_{Σ} в зависимости от n ЭК

Число проводников n			
1	4	9	16
0,5	0,67	0,75	0,80
0,6	0,75	0,82	0,86
0,7	0,82	0,87	0,90
0,8	0,89	0,92	0,94
0,9	0,95	0,96	0,97

Аналогично отношение $K_{\Sigma} = P_{\text{пол}}/V_{\Sigma}$ можно назвать критерием электрической объёмной энергоёмкости ЭК и печи.

Выводы.

Для повышения эффективности работы ЭК целесообразны:

– оптимизация всех ее параметров, в т. ч. с применением предложенных критериев $K_{мп}$, K_{mv} и K_{Σ} ;

– уменьшение толщины футеровки путем применения новой конструкции тигля, включающей прочные огнеупорные и малотеплопроводные материалы, что позволит уменьшить диаметр, площадь, индуктивность и сопротивление ЭК;

– изменение конструкции ЭК для увеличения ее прочности и улучшения охлаждения.

Список литературы

1. Левшин, Г. Е. Развитие индукционной тигельной плавки в печах промышленной частоты. / Г. Е. Левшин, Д. С. Кульдайкин, А. В. Левагин // Актуальные проблемы в машиностроении. Матер. 1 международн. научно-практич. конф. – Новосибирск, 2014. – С. 33-37.
2. Фарбман, С. А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов / Фарбман С. А., И. Ф. Колобнев. – М.: Металлургия, 1968. – 496 с.
3. Брокмайер, К. Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1972. – 304 с.
4. Егоров, А. В. Электрические печи (для производства сталей) / А. В. Егоров, А. Ф. Моржин. – М.: Металлургия, 1975. – 352 с.
5. Егоров, А. В. Электроплавильные печи черной металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.
6. Егоров, А. В. Расчет мощности и параметров электропечей черной металлургии. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
7. Электрические печи для выплавки черных и цветных сплавов. / Л. М. Романов, А. Н. Болдин, А. Н. Граблев, Д. П. Михайлов. – М.: МГИУ, 2007. – 104 с.
8. Бурдун, Г. Д. Справочник по Международной системе единиц. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 232 с.

Левшин Геннадий Егорович – д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия