

I. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.365.32

Ярымбаш Д. С.

Канд. техн. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Украина, E-mail: Yarymbash@gmail.com

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗАГОТОВОК ЭЛЕКТРОДОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ В КЕРНЕ ПЕЧИ АЧЕСОНА

Предлагается обладающая высокой точностью и эффективностью численной реализации 3D модель электромагнитных и термоэлектрических полей в керне печи Ачесона постоянного и переменного тока, позволяющая учесть особенности конструкции печи и боковых шинных пакетов, пространственное размещение заготовок электродов в токопроводящей пересыпке керна, температурные зависимости электромагнитных и теплофизических свойств материалов, а также технологические режимы графитации. Выполнен анализ пространственного распределения удельной мощности тепловыделения в керне при вертикальном и горизонтальном расположении заготовок электродов в керне.

Ключевые слова: математическая модель, электромагнитное поле, термоэлектрическое поле, печь Ачесона, постоянный ток, переменный ток, заготовки электродов, мощность тепловыделения.

В отечественной электродной промышленности для производства продукции качества Ultra High Power (UHP) используются печи графитации Ачесона (ПГ), которые относятся к группе электрических печей сопротивления прямого нагрева. Энергоемкость процесса графитации достигает 7...8 МВт·часов на тонну электродной продукции [1, 2]. Характерными особенностями графитации Ачесона являются высокие перепады температур, которые определяются распределением удельной мощности нагрева в объеме керна и способствуют трещинообразованию в заготовках электродов. Это накладывает ограничение на интенсивность ввода мощности и, следовательно, разогрева керна, что приводит к росту продолжительности технологического процесса и затрат электроэнергии для компенсации тепловых потерь в окружающую среду.

Недостаточная изученность механизмов распределения активной мощности, особенностей нагрева и формирования температурного поля керна ПГ в зависимости от расположения заготовок электродов, электрических, магнитных и теплофизических свойств материалов компонентов керна, ограничивают возможности дальнейшего повышения энергоэффективности технологического процесса графитации.

При исследовании электротепловых процессов широко используются экспериментальные, аналитические, численные методы моделирования и их комбинации. В известных моделях термоэлектрических процессов для графитации постоянным током применяются сопряженные системы дифференциальных уравнений стационарной электропроводности и нестационарной теплопроводности для расчетного объемного элемента керна ПГ [6]. Этот элемент располагается между вертикальными плоскостями, одна из которых проходит через оси заго-

товок вертикального ряда, а другая – посередине ближайшей междурядной пересыпки. Поскольку его длина не превышает 3...4 % от длины керна печи, то он не отображает в достаточной мере особенности конструктивного строения ПГ, а допущение о постоянстве электрических потенциалов на граничных плоскостях объемного элемента керна, не соответствует реальной картине электрического поля [7]. Кроме того, термоэлектрическая модель [6] не позволяет исследовать электромагнитные и электротепловые процессы графитации заготовок электродов переменным током. Она не обеспечивает требуемую точность и достоверность расчетов объемного распределения удельной электрической мощности в керне и графитируемых заготовках электродов, так как не учитывает особенности электромагнитных и температурных полей в торцевых и внутренних зонах керна, влияние токов в боковых шинных пакетах, экранирующие эффекты от стального кожуха.

В мировой практике в ПГ Ачесона используется как вертикально-поперечная, так и горизонтально-поперечная укладка заготовок электродов [1, 2]. Однако, в настоящее время достоверных данных о влиянии способов укладки на рациональное распределение удельной тепловой мощности в объеме керна ПГ нет.

Настоятельная потребность в разработке технических решений, обеспечивающих современные требования энергоэффективности технологического процесса графитации и UHP уровень качества продукции, которая обуславливает актуальность создания достоверных корректно сформулированных сопряженных электромагнитных, электротепловых и теплообменных 3D моделей и расширение области их приложения для исследования процессов графитации постоянным и переменным током.

Целью работы является анализ влияния расположения заготовок электродов на распределение удельной мощности нагрева и на энергоэффективность процесса графитации на основе 3D моделирования сопряженных электромагнитных, электротепловых и теплообменных процессов с учетом особенностей конструкции ПГ, ее керна и шинных пакетов, температурных зависимостей электрофизических, теплофизических и массообменных свойств.

При формировании обобщенной 3D модели графитации выделяется расчетная область с боковыми шинными пакетами (БШП) 7 и ПГ с шамотной футеровкой 5, стальным кожухом 6 и керном, которой включает заготовки электродов 1, пересыпку керна 2, электропроводящую засыпку 3 и теплоизоляционную шихту 4 (рис. 1). Эта расчетная область обладает свойствами симметрии относительно вертикальной плоскости симметрии, которая проходит через продольную ось керна ПГ.

Согласно [8, 9], электромагнитное поле в окрестностях графитовых плит и торцов керна ПГ приближается к плоскопараллельному полю, а падения напряжения в графитовых плитах существенно меньше падений напряжения на других участках печной петли (ПП). Это позволяет рассматривать область керна ПГ и БШП инвариантно к областям торцевых шинных пакетов и токоподводов.

В соответствии с [1, 2] принимаются допущения об изотропности свойств материалов, неизменности магнитных свойств неферромагнитных материалов, отсутствии токов смещения и свободных зарядов. На основании подобия электрических полей в электроизоляционных средах и в электропроводящих средах с достаточно малой удельной электрической проводимостью, электроизоляционные среды, окружающие области керна, БШП и кожуха ПГ заменяются электропроводящими средами с достаточно малой удельной электропроводностью.

Геометрическая симметрия ПГ и ПП (рис. 1), допущение о симметричном распределении токовых и тепловых нагрузок в токоподводах, керна, других элементах ПГ, ПП обуславливают симметрию электромагнитных и температурных полей относительно вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось ПГ. Таким образом, для моделирования и расчетов можно рассматривать только одну из двух симметричных подобластей.

Электромагнитное поле в электропроводящих средах описывается сопряженной системой уравнений Максвелла относительно векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов [8]

$$\begin{cases} \nabla \times [(\mu_0 \mu_{\varepsilon_j})^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j] = \mathbf{Q}_A, \\ \nabla \cdot [\sigma_j(\theta_j) \cdot \nabla \cdot V_j] = \mathbf{Q}_V, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{A} , V – векторный магнитный и электрический потенциалы; $\sigma_j(\theta)$ – температурная зависимость удельной электрической проводимости; θ_j – локальная температура; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_{ε} – эквивалентная относительная магнитная проницаемость.

Для ПГ постоянного тока уравнения системы (1) будут однородными, так как

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_A = 0, \\ \mathbf{Q}_V = 0, \end{cases} \quad (2)$$

а для ПГ переменного тока должны рассматриваться выражения для правых частей в дифференциальных уравнениях системы (1)

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_A = -j\omega\sigma_j(\theta_j)(\mathbf{A}_j + \nabla V_j), \\ \mathbf{Q}_V = -j\omega \cdot \nabla \cdot (\sigma_j(\theta_j) \cdot \mathbf{A}_j), \end{cases} \quad (3)$$

где ω – угловая частота; индексы $j = 1...7$ определяют электропроводящие подобласти в расчетной области (рис. 1, а).

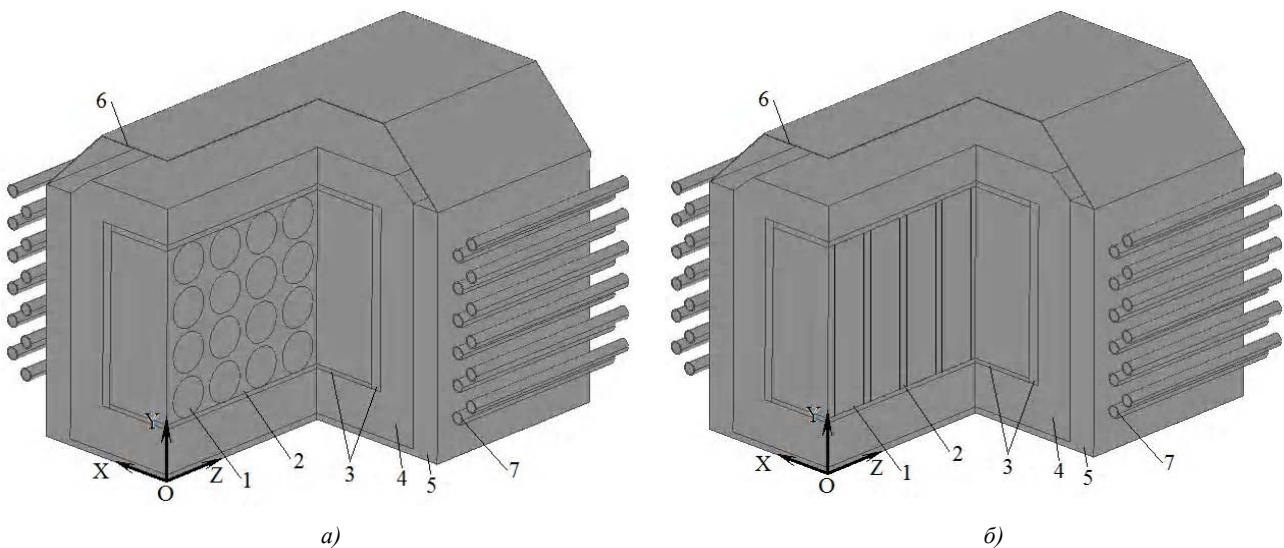


Рис. 1. Расчетная область ПГ и БШП с различным расположением заготовок электродов: а – горизонтальное; б – вертикальное

Температурные зависимости для удельных электрических проводимостей активных и конструкционных материалов ($\sigma_j(\theta)$, $j = 1, 2, 3, 6, 7$) принимаются по данным [1, 2], а эквивалентная относительная магнитная проницаемость μ_{Σ} для стального кожуха 6 ПГ (рис. 1) определяется как функция модулей амплитудных значений индукции в этом кожухе [10].

Система уравнений (1) дополняется условиями калибровки Кулона [8]

$$\text{div}(\mathbf{A}) = 0. \quad (4)$$

Электротепловая модель отображается сопряженной системой уравнений нестационарной теплопроводности

$$\begin{cases} c_{\text{экв}j}(\theta_j) \cdot \rho_j(\theta_j) \cdot \partial\theta_j / \partial\tau + \text{div}(\lambda_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(\theta_j)) = \\ k_I \sigma_j(\theta_j)^{-1} |\mathbf{J}_j(\theta_j)|^2 + \rho(\theta_j) \cdot \sum_{k=1}^n r_k(\theta_j) \cdot \partial u_{k,j} / \partial\tau, j = 1, 2, 3, \\ c_j(\theta_j) \cdot \rho_j(\theta_j) \cdot \partial\theta_j / \partial\tau + \text{div}(\lambda_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(\theta_j)) = 0, j = 4, 5, \\ c_j(\theta_j) \cdot \rho_j(\theta_j) \cdot \partial\theta_j / \partial\tau + \text{div}(\lambda_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(\theta_j)) = \\ = k_I \sigma_j(\theta_j)^{-1} |\mathbf{J}_j(\theta_j)|^2, j = 6, 7, \end{cases} \quad (5)$$

где $c_{\text{экв}j}(\theta_j) = c_j(\theta_j) + \sum_{k=1}^n (r_k(\theta_j) \cdot \partial u_{k,j} / \partial\tau)$ – эффективные удельные теплоемкости компонентов керна; $c_j(\theta_j), \rho_j(\theta_j), \lambda_j(\theta_j)$ – удельные теплоемкости, плотности и коэффициенты теплопроводности; $r_k(\theta_j)$ – удельная теплота фазового перехода влаги химических реакций для графитируемых компонентов заготовок электродов, пересыпки и шихты керна; $u_{k,j}$ – влагосодержание и степень графитации.

Плотности токов определяются соотношениями:

$$\mathbf{J}_j(\theta_j) = -\sigma_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(V_j), k_I = 1, j = 1, 2, 3, 6, 7$$

– при графитации постоянным током,

$$\mathbf{J}_j(\theta_j) = -\sigma_j(\theta_j) \cdot (\mathbf{grad}(V_j) + j\omega \mathbf{A}_j), k_I = 0, 5, j = 1, 2, 3, 6, 7$$

– при графитации переменным током.

Механизмы теплообмена при свободной конвекции охлаждающего воздуха и линейной температурной зависимости его плотности описываются системой уравнений [8]

$$\begin{cases} (\mathbf{W}_j \cdot \nabla) \mathbf{W}_j = -\rho(\theta_j)^{-1} \nabla p_j + \nu(\theta_j) \Delta \mathbf{W}_j - \\ - \beta_j(\theta_j - \theta_0) \mathbf{g}, \\ \rho(\theta_j) \cdot C_p(\theta_j) (\mathbf{v}_{i,j} \cdot \nabla \theta_j) - \nabla(\lambda(\theta_j) \cdot \nabla \theta_j) = 0, \\ \text{div} \mathbf{v}_j = 0, j = 8, \end{cases} \quad (6)$$

где \mathbf{W} – скорость охлаждающего воздуха; $\rho(\theta), p, C_p(\theta), \nu(\theta), \beta$ – плотность, давление, удельная теплоемкость,

кинематическая вязкость и коэффициент объемного расширения воздуха; \mathbf{g} – ускорение свободного падения.

Внутри расчетной области (рис. 1, б) условия сопряжения магнитных, электрических и температурных полей на границах раздела сред с различными электрофизическими и теплофизическими свойствами формулируются в виде:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0|_{\nabla_{i,k} \in (1,4), i \neq k}, \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_k) = 0|_{\nabla_{i,k} \in (1,4), i \neq k}, \\ \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i - \lambda(\theta_k)_k \nabla \theta_k) = 0, \theta_i - \theta_k = 0|_{\nabla_{i,k} \in (1,3), i \neq k}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\mathbf{H} = (\mu_0 \mu)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}$ – напряженность магнитного поля.

Задаются однородные граничные условия на внешних боковых поверхностях расчетной области

$$\begin{cases} \mathbf{A}_j = 0|_{\nabla_j \in (1,4)}, \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{J}_j = 0|_{j=4}, \Delta \theta = \theta_j - \theta_0 = 0|_{j=1,4}, \end{cases} \quad (8)$$

формулируются граничные условия на торцах керна ПГ

$$\begin{cases} A_j = \bar{k} \cdot A_z(x, y)|_{j=4}, V_j = \varphi_j|_{\nabla_j \in (1,3)}, \theta_j = \theta_{\text{ГП}}|_{j=1,4}, \end{cases} \quad (9)$$

и на плоскости симметрии

$$\begin{cases} \mathbf{n}_i \times \mathbf{H}_i = 0|_{i=1,4}, \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{J}_i = 0|_{i=1,4}, \mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i) = 0, \\ \theta_{i+} - \theta_{i-} = 0|_{i=1,4}, \end{cases} \quad (10)$$

При описании процессов теплообмена в шинах БШП с окружающей средой с учетом свободной конвекции и радиационной теплоотдачи может применяться эмпирическое соотношение [3], которое преобразуется в граничное условие

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_j \cdot (\lambda(\theta_j)_j \nabla \theta_j) = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_{\kappa j} \cdot (\theta_j - \theta_{oc}) + 5,7 \times \\ \times \varepsilon \cdot (1 - \varphi) \cdot \left(\left(\frac{\theta_j}{1000} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{oc}}{1000} \right)^4 \right), j = 1, 2, \end{aligned} \quad (11)$$

где α_{κ} – коэффициент, зависящий от высоты (длины) шин; φ – коэффициент лучистого экранирования шин.

Условие (11) позволяет реализовывать решение систем уравнений электромагнитного поля (1)–(4) инвариантно по отношению к системам уравнений теплопроводности (5) и тепломассообмена (6). При расчетах температурных полей учитываются требования ПУЭ по допустимым уровням нагрева вторичных токопроводов.

Трехмерная модель (1)–(3) с условием калибровки Кулона (4), условиями сопряжения (7) и граничными условиями (8)–(11) реализуется методом конечных элементов в структуре средств Comsol Multiphysics.

Плотность и размеры конечных элементов в расчетной области (рис. 1, б) варьируются для сокращения зат-

рат времени и вычислительных ресурсов без снижения требуемого уровня точности расчетов. В шинах БШП плотность конечных элементов увеличивается, а по мере приближения к внешним границам расчетной области она снижается.

По данным моделирования определяются токи, протекающие через выделенную площадку $S(S_{yz}, S_{xz}, S_{xy})_j$, удельные потери в керне ПГ и в шинах БШП, мощность графитации:

$$\left\{ \begin{aligned} I_{S|_j} &= \sqrt{|I_x|^2 + |I_y|^2 + |I_z|^2} \Big|_j, I_x|_j = \\ &= \iint_{S_{yz}} \mathbf{J}_x dydz \Big|_j, I_y|_j = \iint_{S_{xz}} \mathbf{J}_y dx dz \Big|_j, I_z|_j = \iint_{S_{xy}} \mathbf{J}_z dx dy \Big|_j, \\ p|_j &= \sigma_j^{-1} |\mathbf{J}_j|^2, P|_j = \iiint_{V_j} p|_j dx dy dz. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Итерационный вычислительный процесс отвечает принятым критериям точности для результирующих токов в шинах БШП и керне ПГ. Причем для графитации постоянным током сравниваются силы токов графитации и суммарных токов в БШП, а для переменного тока такое сравнение выполняется как по модулю амплитуд $\varepsilon_{I_{\text{тшп}}} \leq [\varepsilon_{I_{\text{тп}}}]$, так и фазовому углу $\varepsilon_{\text{тшп}} \leq [\varepsilon_{\text{тп}}]$ этих токов. Для суммарного тока БШП и тока графитации относительная невязка не превышает для модулей амплитуд 0,24%, для фаз этих токов – 0,07%.

Среднее удельное электрическое сопротивление и средняя температура керна ПГ рассчитываются с помощью интегральных соотношений

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{\text{кern}} &= \frac{\iiint_{V_j} p|_j dx dy dz}{\iint_{V_j} |\mathbf{J}_j|^2 dx dy dz}, \\ \theta_{\text{кern}} &= \frac{1}{\sum V_j} \iint_{V_j} \theta|_j dx dy dz. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Реализация математической модели (1)–(11) с использованием интегральных соотношений (12) осуществлялась для интервала изменения средней температуры керна (13) от $\theta_{\text{кern}} = 20^\circ\text{C}$ до $\theta_{\text{кern}} = 3000^\circ\text{C}$.

Точность результатов численного моделирования оценивается путем сравнения расчетных значений мощности графитации, токов и падений напряжения в керне и БШП с экспериментальными данными регистрации электрических режимов для различных кампаний графитации переменным током (класс точности регистра-

тора – 0,2 [9]). Относительные погрешности расчетов падений напряжений и мощности графитации не превышают 0,9% и 1,03%, относительная токовая погрешность составляет 1,12%.

Для вертикальной и горизонтальной укладки электродов температурные зависимости удельного электрического сопротивления (УЭС) керна ПГ и коэффициента мощности для температур от 20°C до 3000°C на постоянном и переменном токе отличаются на 0,5...0,6%, что соизмеримо с погрешностью численной реализации. Следовательно, УЭС керна определяются соотношением УЭС заготовок электродов, материалов пересыпки и шунтирующих слоев, и практически не зависят от ориентации заготовок электродов.

По данным полевых расчетов исследуется распределение нормированных удельных потерь при переменном (AC) и постоянном токе графитации (DC).

$$\left\{ \begin{aligned} q_{AC} &= \frac{|p_{AC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))|}{\max [p_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]_{\forall (x, y, z) \in S_g}}, \\ q_{DC} &= \frac{p_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))}{\max [p_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]_{\forall (x, y, z) \in S_g}}. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Для визуализации полевых расчетов рассматриваются распределения нормированных удельных потерь (рис. 2) в вертикальных плоскостях поперечного сечения, проходящего через оси заготовок основной зоны керна, при средних температурах графитации, равных $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$. Светлые поверхности нормированных удельных потерь и черные линии их равного уровня соответствуют вертикальному расположению заготовок, более темные поверхности относительных плотностей тока и белые линии равного уровня – горизонтальному расположению (рис. 2).

При графитации переменным током наблюдается неравномерное распределение удельной мощности тепловыделения в диаметральном сечении заготовок. Максимальное значение удельной мощности отмечается возле торцов заготовок. Для вертикального расположения заготовок оно в 1,28 раза превышает соответствующее значение при их горизонтальном расположении (рис. 2, а). Для постоянного тока при средней температуре керна $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ эти поверхности сближаются и контуры линии равного уровня при горизонтальной и вертикальной укладках заготовок практически повторяют друг друга (рис. 2, б).

При графитации переменным током для температур керна до $\theta_{\text{кern}} = 1000^\circ\text{C}$ и достаточно больших УЭС поверхностный эффект и внешний поверхностный эффект практически не оказывают влияния на средние по объему керна удельные потери, а добавочные не превышают 1,4%.

Для температур керна выше 2000°C отмечается рост локальной удельной мощности тепловыделения в торцевых областях заготовок до 2,5 раз при увеличении тепловой мощности в боковых шунтирующих слоях керна до 42%.

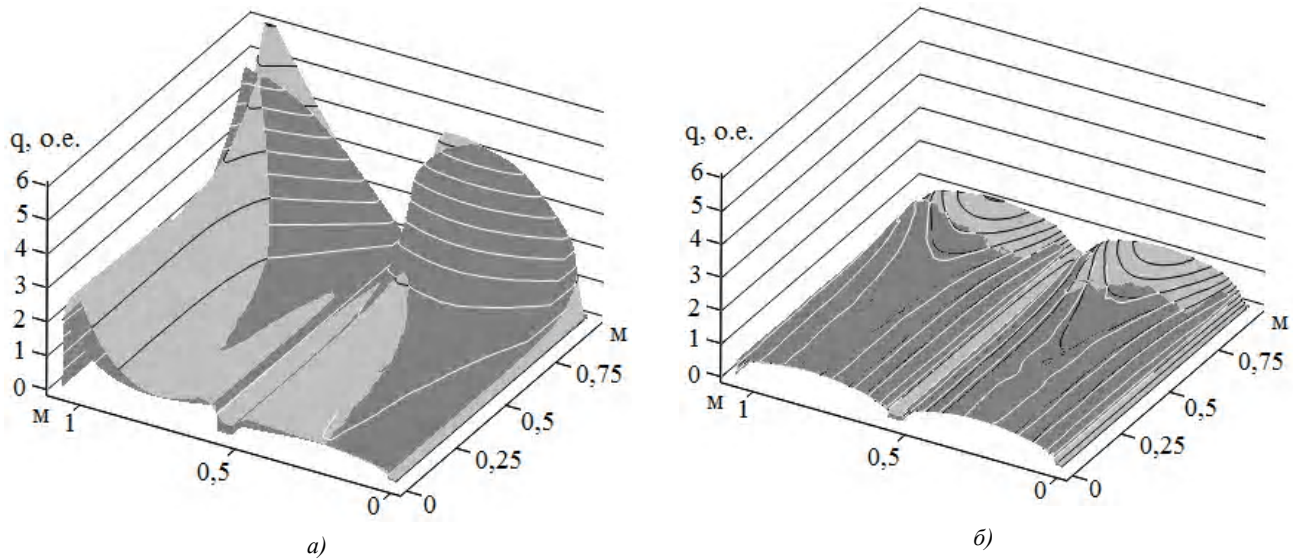


Рис. 2. Распределение нормированных значений удельных потерь в диаметральных сечениях заготовок при температуре $\theta_{\text{керна}} = 2500 \text{ }^\circ\text{C}$: а – при графитации переменным током; б – при графитации постоянным током

На протяжении кампании графитации в торцевых зонах керна удельные потери в заготовках крайних электродов на 1,5...7,8 % больше, чем во внутренней зоне керна.

При графитации переменным током в диаметральном сечении заготовок в интервале температур 500...1500 °С значение средней удельной мощности тепловыделения для вертикальной укладки на 7,9...11,8 % выше, чем для горизонтальной укладки заготовок, а при графитации постоянным током – на 8,2...13 % (рис. 3).

Температурные поля в заготовках электродов при графитации переменным и постоянным током при изменении средних температур керна от 20 °С до 1000 °С практически идентичны. Наибольшие различия в температурных полях заготовок отмечаются в интервале средних температур керна от 2000 °С до 3000 °С. Добавочные потери, обусловленные поверхностными эффектами в кернах и внешними поверхностными эффектами от токов в шинах БШП, способствуют выравниванию темпе-

ратур в объеме заготовок электродов и снижению перепадов температур на 7...11 % по сравнению с графитацией постоянным током. В интервале средних температур керна от 1000 °С до 2000 °С эти факторы также имеют место, но они менее выражены. При вертикально-поперечной укладке электродов на начальном этапе разогрева средние значения удельной мощности нагрева увеличиваются по сравнению с горизонтально-поперечной укладкой. Все это позволяет интенсифицировать ввод мощности, сократить продолжительность кампании и энергозатраты.

ВЫВОДЫ

Предложены сопряженные пространственные модели, адекватно отображающие особенности электромагнитных, электротепловых и теплообменных процессов в печной петле и печи графитации, учитывающие особенности конструкции печи графитации, ее керна, боковых шинных пакетов печной петли и температурные зависимости электрофизических и теплофизических свойств материалов печи, керна, заготовок электродов, шинных пакетов и охлаждающей среды. Относительные погрешности расчетов падений напряжений на БШП и мощности графитации не превышают 0,9 % и 1,03 % при сравнении с данными регистрации электрических режимов во время различных кампаний графитации.

При вертикальном расположении заготовок в кернах ПГ Ачесона в диаметральном сечении заготовок в интервале температур 500...1500 °С в их объеме выделяется мощность нагрева, которая больше на 8...13 % больше по сравнению с горизонтально-поперечной укладкой, что обеспечивает интенсификацию нагрева, сокращение продолжительности кампании и энергозатрат.

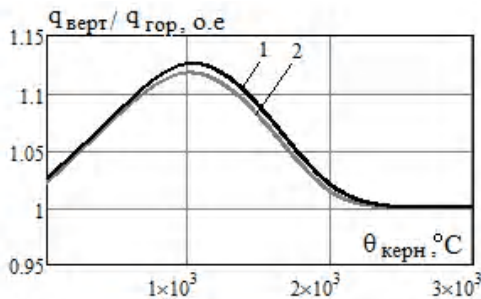


Рис. 3. Изменение отношения мощностей тепловыделения в диаметральном сечении заготовок электродов при вертикальном и горизонтальном расположении заготовок в кернах ПГ от температуры

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов Д. М. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования [Текст] / Д. М. Кузнецов, В. П. Фокин. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2001. – 132 с.
2. Кузнецов Д. М. Графитация крупногабаритных электродов. Процесс Ачесона [Текст] / Д. М. Кузнецов. – Ростов н/Д: РГАСХМ ГОУ, 2003. – 168 с.
3. Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. [Текст] / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – М. : Издательство МЭИ, 2005. – 550 с.
4. Дрешпак Н. С. Результаты анализа режимов индукционного нагрева разъемных деталей машин [Текст] / Н. С. Дрешпак // Научный вестник НГУ. – 2012. – № 4. – С. 108–113.
5. Ярымбаш Д. С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Электротехника та електроенергетика. – 2010. – № 2. – С. 36–43.
6. Коржик М. В. Дослідження бічного шунта печі графітації [Текст] / М. В. Коржик, Г. І. Гурчик // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков : Технологический центр, 2012. – №3/5 (57). – С. 39–43.
7. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов : Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений [Текст] / О. Б. Буль. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.
8. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // Электротехника и электромеханика. – 2012. – №1. – С. 49–54.
9. Ярымбаш Д. С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, О. В. Тютюнник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук : КДПУ, 2006. – Вип. 3/2006(38). – С. 53–55.
10. Ярымбаш Д. С. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мунштука прессы / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету – Кременчук, КДПУ, 2007. – №4(45) Частина 1. – С. 53–55.

Стаття надійшла до редакції 16.06.2014.

Ярымбаш Д. С.

Канд. техн. наук, доцент, Запорізькій національний технічний університет, Україна

ВПЛИВ РОЗТАШУВАННЯ ЗАГОТОВОК ЕЛЕКТРОДІВ НА РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ НАГРІВУ В КЕРНІ ПЕЧАЧЕСОНА

Запропоновано 3D модель електромагнітних та термоелектричних полів у керні печі Ачесона постійного та змінного струмів, що має високу точність і ефективність чисельної реалізації та дозволяє врахувати особливості конструкції печі і бокових шинних пакетів, просторовий розподіл заготовок електродів у струмопровідній пересипці керна, температурні залежності електромагнітних та теплофізичних властивостей матеріалів, а також технологічні режими графітації. Виконано аналіз просторового розподілу питомої потужності тепловиділення у керні при вертикальному та горизонтальному розташуванні заготовок електродів у керні.

Ключові слова: математична модель, електромагнітне поле, термоелектричне поле, піч Ачесона, постійний струм, змінний струм, заготовки електродів, потужність тепловиділення.

Yarymbash D. S.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Zaporizhzhya national technical university, Ukraine

INFLUENCE OF THE ELECTRODES BLANKS LOCATION ON THE ELECTRIC HEATING POWER DISTRIBUTION IN THE ACHESON FURNACES CORE

The modeling of electromagnetic and thermoelectric processes on the basis of numerical realization by finite element method of the generalized three-dimensional models of DC and AC graphitization is proposed.

The features of furnace structure and side busbar packages, spatial arrangement of the electrodes blanks in the conductive backfill of core, temperature dependence of the electromagnetic and thermal properties of materials, technological regimes of graphitization are taken into account. The high accuracy and efficiency of numerical implementation are provided.

The character and regularities of the spatial distribution of specific thermal power in the core at the vertical and horizontal location of the electrode blanks in the core are defined.

It is revealed that the specific electric resistance of the core is determined by the ratio of specific electric resistance of electrode blanks, backfill materials, shunt layers and don't practically depend on the orientation of the electrodes blanks in the Acheson furnace.

It is found that in vertical stacking of blanks in the Acheson furnace core at diametric section blanks more heating capacity is allocated compared with the horizontal transverse stacking. Intensification of the heating, reduction in the duration the campaign and energy are provided.

Keywords: mathematical model, electromagnetic field, the thermoelectric field, Acheson furnace, direct current, alternating current, electrodes blanks, thermal power.

REFERENCES

1. Kuznecov D. M. and Fokin V. P. Process grafitacii uglirodnyh materialov. Sovremennye metody issledovanija, JuRGU, Novoherkassk, 2001, 132 p.
2. Kuznecov D. M. Grafitacija krupnogabaritnyh jelektrodov. Process Achesona, RGASHM GOU, Rostov n/D, 2003, 168 p.
3. Cvetkov F. F. and Grigor'ev B. A. Teplomassoobmen: Uchebnoe posobie dlja vuzov. Moscow, Izdatel'stvo M'EI, 2006, 550 p.
4. Dreshpak N. S. Rezul'taty analiza rezhimov indukcionnogo nagreva raz'emnyh detalej mashin, *Scientific bulletin of National mining university*, 2012, No.4, pp. 108–113.
5. Yarymbash D. S., Kilimnik I. M. and Yarymbash S. T., Osobennosti opredelenija parametrov jelektricheskoi shemy zameshenija pechnoi petli pechi grafitacii peremennogo toka, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2010, pp. 36–43.
6. Korzhyk M. V., and Gurchyk A. I., Doslidzhennya bichnoho shunta pechi hrafitatsiyi, *Vostochno-evropejskij zhurnalпередовых технологий*. Kharkov, Tehnologicheskij centr, 2012, No.3/5 (57), pp. 39–43.
7. Bul' O. P., Metody rascheta magnitnyh sistem jelektricheskikh apparatov: Magnitnye cepi, polja i programma FEMM: Ucheb.posobie dlja studentov vyssh. uceb. zavedenij, Izdatel'skij tsentr Akademiya. Moscow, 2005, 336 p.
8. Yarymbash D. S., Osobennosti kontrolja jelektricheskikh parametrov, moshhnosti i jenergopotreblenija vo vremja kampanii grafitacii v pechi peremennogo toka, *Jelektrotehnika i jelektromehanika*, 2012, No. 1, pp. 49–54.
9. Yarymbash D. S., Yarymbash S. T. and Tyutyunnik O. V., Identifikacija jelektricheskikh parametrov pechnoi petli moshhnyh pechej grafitacii, *Visnyk Kremenchuckogo derzhavnogo politehničnogo universytetu*, KDPU, Kremenschuk, 2006, No. 3(38), pp. 53–55.
10. Yarymbash D. S. and Kilimnik I. M., Osobennosti modelirovanija jelektromagnitnyh processov v induktore kalibra mundshtuka pressa, *Visnyk Kremenchuckogo derzhavnogo politehničnogo universytetu*, KDPU, Kremenschuk, 2007, No. 4(45), pp. 53–55.