

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ НАГРЕВА В КЕРНЕ ПЕЧИ ГРАФИТАЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Д.С. Ярымбаш, канд. техн. наук, А.М. Олейников, докт. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет,
ул. Университетская, 33, Севастополь, 99053, Украина

Предлагается 3D модель электромагнитного поля в керне печи графитации 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. Анализируется пространственное распределение плотности тока и удельной мощности тепловыделения в керне, определяются факторы, которые позволяют повысить интенсивность ввода мощности и энергоэффективность графитации. Библ. 10, рис. 3.

Ключевые слова: математическая модель, векторный магнитный потенциал, печь графитации, плотность тока, мощность тепловыделения, энергоэффективность.

Введение. На современном этапе развития металлургической промышленности Украины выдвигаются жесткие требования к уровню качества электродной продукции и снижению энергозатрат при ее производстве. Это относится и к энергоемким технологическим процессам графитации заготовок электродов, и к самим режимам работы электротехнических комплексов графитации (ЭТКГ). При этом особенности нагрева и характер распределения активной мощности в объеме керна печи графитации, оказывающие существенное влияние на энергоэффективность технологического процесса, изучены все еще недостаточно.

При исследовании электрических параметров и характеристик электротехнологического оборудования для графитации заготовок электродов используются экспериментальные, аналитические, численные методы моделирования и их комбинации. Возможности экспериментальных исследований на действующем технологическом оборудовании ограничены как температурными режимами графитации и агрессивными средами, так и значительными финансовыми затратами при варьировании конструктивных параметров и технологических режимов [5, 7]. Аналитические методы применяются, как правило, при исследовании линейных или линеаризованных моделей. При численном моделировании могут учитываться особенности конструкции печей графитации (ПГ) и шинных пакетов печной петли, пространственное размещение заготовок электродов в пересыпке керна, температурные зависимости электромагнитных и теплофизических свойств материалов керна ПГ и бокового шинного пакета (БШП), а также технологические режимы графитации. При этом математические модели и методы их численной реализации должны удовлетворять требованиям точности и вычислительной эффективности.

Математическому моделированию этих процессов в печах графитации (ПГ) посвящено немало работ. Так, в [4, 6] рассмотрена математическая модель системы «кern графитировочной печи – боковые шинные пакеты», основанная на методе среднегеометрических расстояний и позволяющая идентифицировать распределение токов в керне и шинах БШП, которая, однако, не позволяет достоверно оценить мощность тепловыделения в керне ПГ переменного тока, так как не учитывает влияние поверхностного эффекта от поля собственных токов и внешние поверхностные эффекты. В работах [1, 2] для описания тепловых и электрических полей ПГ предложено использовать сопряженные уравнения стационарного электрического поля в формулировках скалярного электрического потенциала и нестационарной нелинейной теплопроводности, однако не учитывается влияние самоиндукции и взаимной индукции на характер распределения токов в керне и шинах БШП, что для ПГ переменного тока может вносить существенную погрешность в результаты расчетов.

Значительно более высокие возможности при численном моделировании процессов графитации открывают методы конечных элементов, которые позволяют реализовывать сопряженные модели, описывающие электромагнитные процессы с учетом температурных зависимостей электрических, магнитных и теплофизических свойств материалов [5, 8]. Необходимость исследования пространственного распределения токов в проводниках БШП и в керне ПГ переменного тока, нелинейности магнитных и тепловых свойств материалов кожуха печи, ее керна, шинных пакетов, конструктивных особенностей печной петли ЭТКГ обуславливает потребность в расширении области приложения полевых расчетов и моделирования и актуальность 3D моделирования.

Целью работы является разработка 3D модели электромагнитных процессов в ПГ переменного тока, которая учитывает особенности конструкции ПГ и шинных пакетов печной петли, пространственное расположение заготовок электродов в керне, нелинейность параметров активных и конструкционных материалов, обеспечивая высокую точность при анализе распределения плотности токов и удельной мощности нагрева в объеме керна.

Материал и результаты исследований. При формировании 3D модели выделяется участок печной петли с БШП и керном ПГ переменного тока (рис. 1 а), который включает графитируемые заготовки электродов 1, пересыпку керна 2, электропроводящую засыпку 3 и теплоизоляционную шихту 4, шамотную футеровку 5, стальной кожух 6, шины БШП. Расчетная область (рис. 1 б) ограничивается вертикальной плоскостью симметрии, которая проходит через продольную ось керна ПГ.

При описании электромагнитных процессов в расчетной области (рис. 1 б) принимается допущение о подобии электрических полей в электроизоляционных и электропроводящих средах с достаточно малой удельной электрической проводимостью. Поэтому электроизоляционные среды, окружающие области керна, БШП и кожуха ПГ, замещаются электропроводящей средой с удельной электропроводностью, составляющей 0,1 % от соответствующего значения электропроводности для пересыпки керна. Математическая модель электромагнитного поля в частотной области формулируется в виде системы уравнений Максвелла для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов в электропроводящих средах [8]:

$$\begin{cases} j\omega\sigma(\theta)_j \mathbf{A}_j + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0\mu_s} \mathbf{B}_j \right) = 0, & \mathbf{B}_j = \nabla \times \mathbf{A}_j, \\ \nabla \cdot (\sigma_j(\theta_j) \cdot (\nabla \cdot V_j + j\omega\mathbf{A}_j)) = 0, & \nabla \cdot \mathbf{A}_j = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал (ВМП); \mathbf{B} – магнитная индукция; V – электрический потенциал; σ – удельная электрическая проводимость; θ – температура; ω – угловая частота; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_s – эквивалентная относительная магнитная проницаемость; индекс $j = 1...7$ определяет подобласти расчетной области (рис. 1 а).

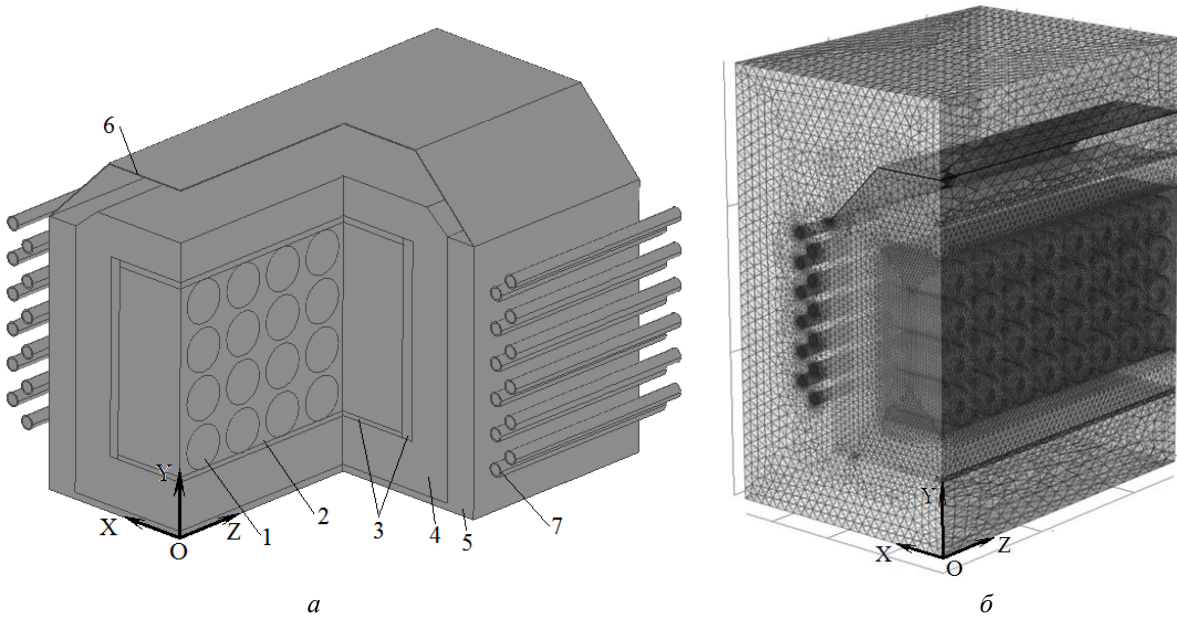


Рис. 1

Температурная зависимость для удельных электрических проводимостей активных и конструкционных материалов $\sigma(\theta)$ принимается согласно данным [5, 7], а эквивалентная относительная магнитная проницаемость μ_r для стального кожуха 6 ПГ (рис. 1 а) определяется как функция средних значений индукции в этом кожухе [9].

Для сокращения затрат вычислительных ресурсов и времени на реализацию электро-тепловой модели, распределение температур в расчетной области ядра задавалось по данным работы [3].

Условия сопряжения на границах электропроводящих сред формулировались в виде

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k} \\ \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k} \end{cases} \quad (2)$$

где $\mathbf{E} = -\nabla \cdot V - j\omega \mathbf{A}$, $\mathbf{H} = (\mu_0 \mu)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}$ – напряженности электрического и магнитного полей; $\mathbf{J} = \sigma(\theta) \cdot \mathbf{E}$ – плотность тока в электропроводящей среде.

На внешних границах расчетной области задаются условия первого рода

$$\left\{ \mathbf{A}_j = 0 \Big|_{\forall j \in (1,4)}, \quad V_j = \varphi_j \Big|_{\forall j \in (1,3)}, \quad \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{J}_j = 0 \Big|_{j=4}, \right. \quad (3)$$

а на плоскости YOZ – условия симметрии [8]

$$\left\{ \mathbf{n}_i \times \mathbf{H}_i = 0 \Big|_{i=1,4}, \quad \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{J}_i = 0 \Big|_{i=1,4}. \right. \quad (4)$$

Численная реализация системы дифференциальных уравнений в частных производных (1) с условиями сопряжения (2), граничными условиями (3) и условиями симметрии (4) выполняется методом конечных элементов в структуре средств ПО Comsol Multiphysics. Определяется пространственное распределение составляющих векторного магнитного и электрического потенциалов, магнитной индукции и напряженности, плотности вихревых токов и удельных потерь

$$p_i = \sigma_i^{-1} \mathbf{J} \cdot (\mathbf{J})^* \quad (5)$$

Для сокращения затрат времени и вычислительных ресурсов размеры конечных элементов в расчетной области варьируются (рис. 1 б). В шинах БШП плотность конечных элементов увеличивается, а в области ядра и по мере приближения к внешним границам расчетной области она снижается. Итерационный вычислительный процесс отвечает заданным

критериям точности для комплексных амплитуд полного тока в шинах БШП и керне ПГ как по модулю $\varepsilon_{J_{\text{БШП}}} \leq [\varepsilon_{J_{\text{кern}}}]$, так и фазовому углу $\varepsilon_{\varphi_{\text{БШП}}} \leq [\varepsilon_{\varphi_{\text{кern}}}]$.

Точность численного моделирования оценивается путем сравнения расчетных токов в керне и шинах БШП, а также с экспериментальными данными регистрации тока графитации (класс точности регистратора – 0,2 [10]). Для токовой нагрузки БШП и тока графитации относительная погрешность расчета составляет для модулей амплитуд токов 3,73 % и для их фаз – 0,24 %.

Важно подчеркнуть, что численная реализация 3D модели электромагнитного и электрического полей позволяет установить ряд характерных особенностей объемного распределения плотности тока и удельных потерь в керне ПГ. Для примера на рис. 2 показано распределение амплитуд плотности тока в керне ПГ в вертикальном сечении плоскостью, параллельной YOZ при $X=0,945$ м (рис. 2 а), и в горизонтальных сечениях плоскостями, параллельными XOZ при $Y=1,931$ м (рис. 2 б) и при $Y=2,206$ м (рис. 2 в).

Локализация основного объема тока в керне ПГ происходит вдоль укладок заготовок параллельно его оси, в то время как сила тока в горизонтальных слоях пересыпки не превышает 3...4 % тока графитации. Распределение плотности тока в слоях укладок заготовок (рис. 2 б) и межслойных пересыпках (рис. 2 в) имеет явно выраженный циклический характер с периодом, кратным расстоянию между осями смежных заготовок электродов. Выделяется также «овражность» поверхностей плотности тока, которая характерно выражена как в горизонтальных плоскостях диаметрального сечения заготовок в укладках (рис. 2 б), так и в горизонтальных слоях пересыпки (рис. 2 в).

Распределение амплитуд плотности тока в окрестности вертикальной плоскости симметрии обуславливается, прежде всего, кривизной цилиндрических боковых поверхностей электродов. В области торцов заготовок плотности тока существенно увеличиваются, возрастая на порядок и более, что объясняется совместным влиянием эффекта вытеснения и внешнего поверхностного эффекта от токов в шинах БШП и послойной локализацией тока в керне ПГ (рис. 2 б).

Следует также отметить характерные изменения кривизны поверхностей плотности

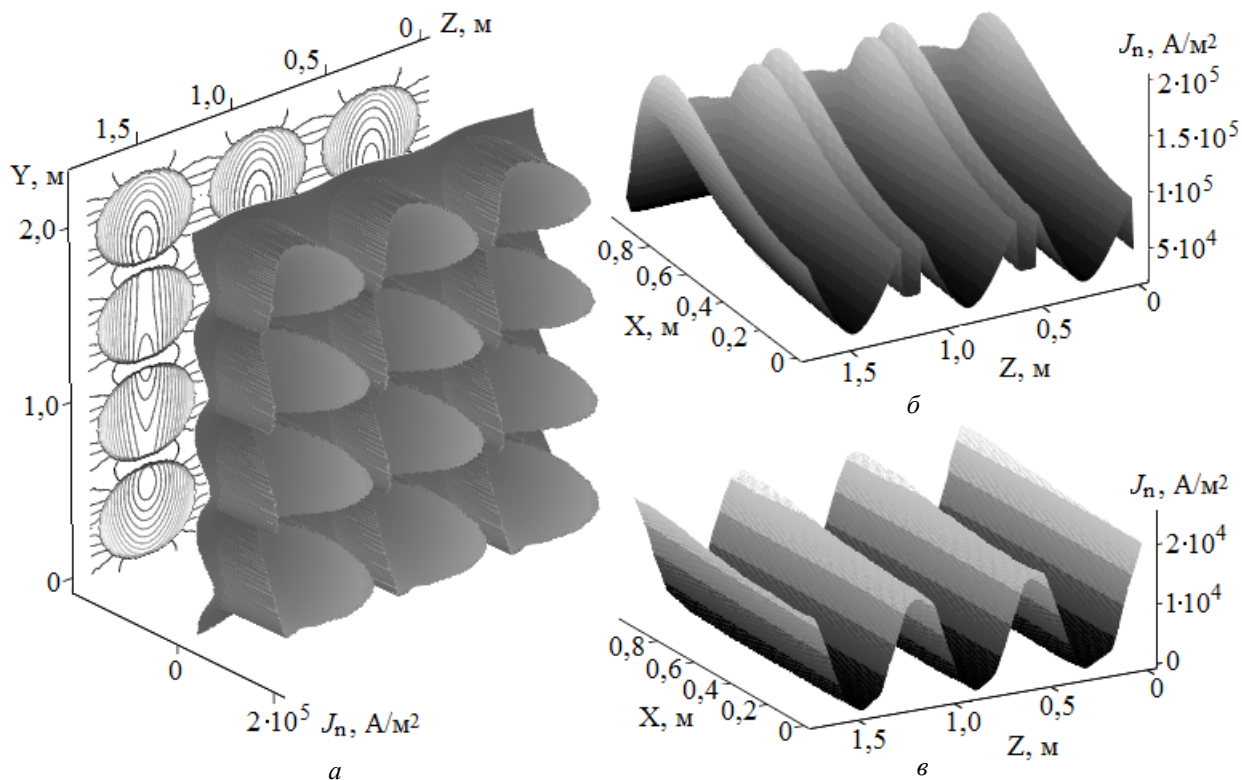


Рис. 2

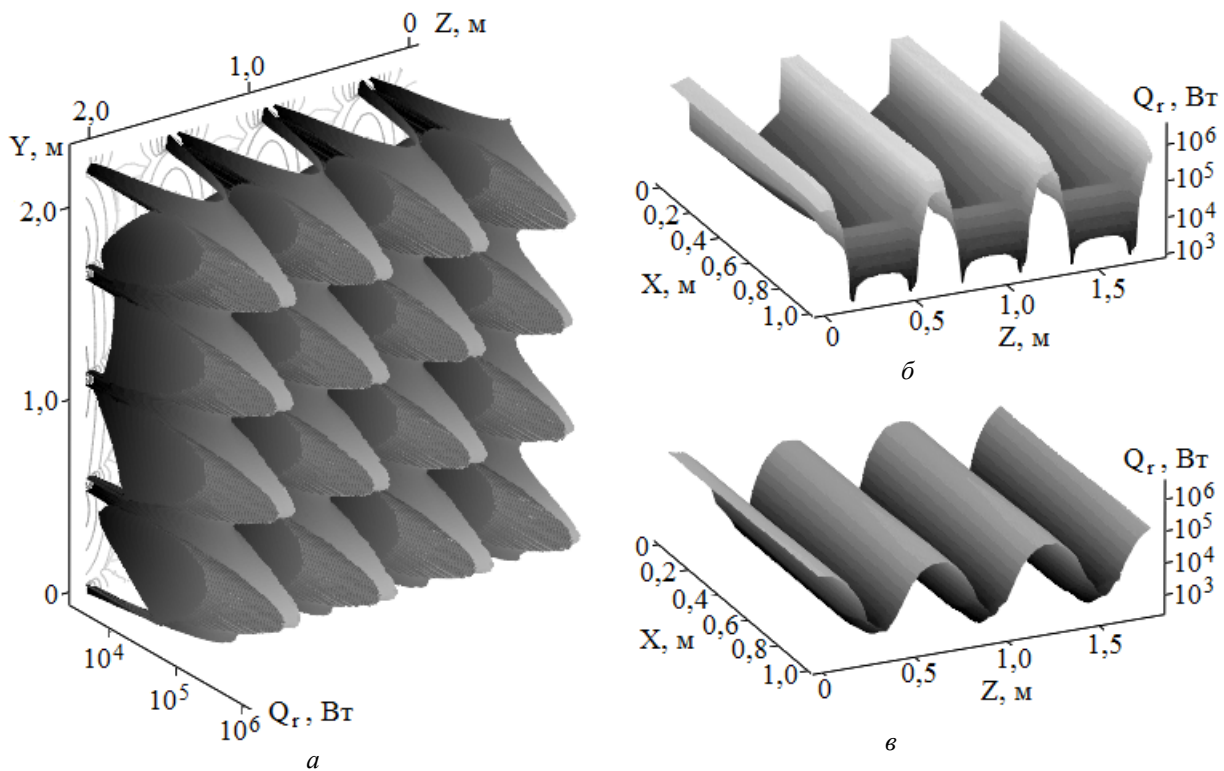


Рис. 3

тока в поперечном сечении заготовок в направлениях от середины горизонтального сечения керна и между вертикальными рядами пересыпки шихты (рис. 2 а). При этом максимальные значения модуля амплитуды плотности тока в заготовках достигаются в горизонтальных диаметральных сечениях в области их торцевых поверхностей (рис. 2 б). Они превышают минимальные значения модуля плотности тока на середине длины заготовки более чем в 18...19 раз. Значения амплитуды плотности тока в пересыпке горизонтального ряда укладки заготовок электродов достигают максимума возле их боковой поверхности, а затем снижаются в 4...5 раз к середине толщины вертикального слоя пересыпки (рис. 2 а). Эффекты вытеснения поля и внешний поверхностный эффект оказывают влияние и на распределение плотности тока в пересыпке между горизонтальными слоями укладки заготовок (рис. 2 в). Однако эти факторы являются менее существенными, хотя отношение локальных максимумов к соответствующим значениям локальных минимумов плотности тока достигает 1,5 и более раз.

Особенности распределения токов в заготовках электродов и пересыпке, соотношения их удельных проводимостей являются определяющими для объемного распределения активной мощности в кернах ПГ. На рис. 3 представлено распределение удельной мощности тепловыделения в кернах ПГ в вертикальном сечении плоскостью, параллельной YOZ возле торца заготовки при $X=0,945$ м (рис. 3 а), горизонтальных сечениях плоскостями, параллельными XOZ при $Y=1,931$ м (рис. 3 б) и $Y=2,206$ м (рис. 3 в). В результате расчетов установлено, что более 50 % электрической мощности выделяется в вертикальных слоях пересыпки между заготовками электродов (рис. 3 а), при этом локальные максимумы удельной мощности тепловыделения располагаются в слоях укладки между заготовками в окрестности горизонтальных плоскостей диаметральных сечений электродов (рис. 3 а, б). Отмечается существенная неравномерность распределения удельной электрической мощности нагрева керна; отношение максимального значения мощности тепловыделения в вертикальных рядах пересыпки (рис. 3 а, б) к ее минимальному значению в горизонтальных слоях пересыпки (рис. 3 в) достигает двух и более порядков.

Циклический характер распределения амплитуд плотности тока обуславливает такое же проявление цикличности в распределении удельной мощности тепловыделения с периодом, кратным расстояниям между осями смежных заготовок электродов. На плоскости сим-

метрии зерна в направлениях под углом $\pi/4$ к плоскости укладки отмечаются локальные минимумы тепловыделения в пересыпке между электродами смежных укладок (рис. 3 в). Удельные мощности тепловыделения в горизонтальных слоях пересыпки менее значительны и не превышают 3...7 % от мощности графитации.

Совместное влияние эффекта вытеснения тока в заготовках электродов и пересыпке зерна, а также внешнего поверхностного эффекта, обусловленного токами в шинах БШП, приводит к росту удельной мощности тепловыделения в электродах и пересыпке между торцами заготовок (рис. 3 б). Мощность тепловыделения в примыкающих к футеровке ПГ боковых поверхностях зерна увеличивается на 40...45 % по сравнению с постоянным током, а распределение температур вдоль заготовок электродов будет более равномерным.

Это расширяет ограничения на интенсивность повышения мощности графитации по допустимым температурным напряжениям в заготовках и позволяет ускорить ввод мощности графитации на 10...12 % по сравнению с постоянным током, исключая необходимость выполнения шунтирующих слоев пересыпки вдоль боковой футеровки ПГ [1]. Существенно сокращаются затраты времени и ресурсов на подготовительных этапах кампании графитации, ее продолжительность и себестоимость готовой продукции.

Выводы. Предложенная 3D модель электромагнитного поля для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов в электропроводящих средах позволяет учесть особенности конструкции печной петли, печи графитации и боковых шинных пакетов, укладки заготовок электродов в пересыпке зерна, а также многокомпонентность технологической системы.

Методами численного анализа установлено, что при нагреве зерна переменным током промышленной частоты, совместное действие эффекта вытеснения поля и внешних поверхностных эффектов от токов в БШП обуславливает рост плотности тока и удельной мощности тепловыделения возле торцов заготовок и боковых поверхностей зерна до 40...45 %.

Более равномерный прогрев заготовок переменным током расширяет ограничения на интенсивность повышения мощности графитации, позволяет интенсифицировать ввод мощности на 10...12 % по сравнению с постоянным током, обеспечивая сокращение продолжительности кампании графитации и снижение себестоимости готовой продукции

1. Коржик М.В., Гурчик Г.И. Дослідження бічного шунта печі графітації // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/5 (57). – С. 39–43.
2. Панов Е.Н., Кутузов С.В., Уразлина О.Ю., Лелека С.В., Шилович И.Л., Карвацкий А.Я. Применение численного моделирования для совершенствования процесса графитации электродной продукции в печах Ачесона // Сб. докл. XII Междунар. конф. "Алюминий Сибири – 2006" 5–7 сентября 2006 г. – Красноярск, 2006. – С. 373–380.
3. Панов Е.Н., Лелека С.В., Коржик М.В. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов // ПиКАД. – 2005. – № 2. – С. 28–30.
4. Розенберг В.Л., Сычев В.А., Метелица Я.В. Метод расчета индуктивностей токопроводящей системы «кern графитировочной печи – боковые шинопакеты» // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1985. – С. 15–18.
5. Соседов В.П., Чалых Е.Ф. Графитация углеродистых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 176 с.
6. Сычев В.А. Расчет индуктивностей некоторых конструкций токопроводящей системы боковые шинопакеты – графитировочная печь // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1986. – С. 23–25.
7. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
8. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации // Электротехника и электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 49–54.
9. Ярымбаш Д.С., Кишимик И.М. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука прессы // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2007. – № 4(45). – Ч. 1. – С. 53–55.
10. Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Тютюнник О.В. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2006. – Вип. 3/2006(38). – С. 53–55.

Севастопольський національний технічний університет,
вул. Університетська, 33, Севастополь, 99053, Україна

Особливості розподілу електричної потужності нагріву в керні печі графітації змінного струму

Запропоновано 3D модель електромагнітного поля в керні печі графітації змінного струму, що дає змогу врахувати особливості конструкції печі й бічних шинних пакетів, просторове розміщення заготовок електродів у струмопровідній пересипці керна, температурні залежності електромагнітних і теплофізичних властивостей матеріалів, технологічні режими графітації, що має високу точність і ефективність чисельної реалізації. Проаналізовано просторовий розподіл щільності струму і питомої потужності тепловиділення у керні, визначено фактори, що дають змогу інтенсифікувати введення потужності та підвищити енергоефективність графітації. Бібл. 10, рис. 3.

Ключові слова: математична модель, векторний магнітний потенціал, піч графітації, щільність струму, потужність тепловиділення, енергоефективність.

D.S. Yarymbash, O.M. Olejnikov

Sevastopol National Technical University,
Universitetska str, 33, Sevastopol, 99053, Ukraine

The distribution features of electric power heating in kern of graphitization ac furnaces

The electromagnetic fields 3D model in the AC graphitization furnace core is proposed. The features of the furnaces design and construction of lateral packages of bus bars, the spatial placement of the electrodes in the electro conductive core, the temperature dependences of the electromagnetic and thermal properties of materials, technological regimes of graphitization are taken into account. The high accuracy and efficiency of numerical calculation are provided. The three- dimensional distribution of current density and heat power density in the core are analyzed. The factors of the rise intensity of the input power and the energy effectiveness of the graphitization process are identified. References 10, figure 3.

Key words: mathematical model, magnetic vector potential, graphitization furnace, current density, power of heat, energy efficiency.

Надійшла 12.11.2013

Received 12.11.2013