

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГРАФИТАЦИИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОДУКЦИИ В ПЕЧАХ АЧЕСОНА

Панов Е.Н., Кутузов С.В., Уразлина О.Ю., Лелека С.В., Шилович И.Л., Карвацкий А.Я.

ОАО «Украинский графит», Украина, г. Запорожье, Северное шоссе, 20
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
Украина, г. Киев, пр. Победы, 37, тел./факс (+38044) 2418609, e-mail: admin@rst.kiev.ua

1. Постановка задачи

Основой технологического процесса косвенного нагрева заготовок в печи Ачесона является физический процесс выделения джоулевой теплоты при протекании переменного или постоянного электрического тока через kern [1-4]. Тепловой процесс нагрева керна сопровождается рассеянием выделяющейся теплоты через конструкционные элементы печи в окружающую среду [5].

Математическим описанием тепло-электрических полей в печи Ачесона является система дифференциальных уравнений теории поля. Данная система уравнений включает в себя нестационарное нелинейное неоднородное уравнение теплопроводности и квазистационарное нелинейное уравнение безвихревого поля электрического потенциала (1). Для замыкания системы (1) записываются соответствующие начальные и граничные условия (Дирихле, Неймана и Фурье):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial \tau} = \nabla[\lambda(T)\nabla T] + \frac{1}{\gamma(T)}|\nabla u|^2, \tau > 0 \\ \nabla\left[\frac{1}{\gamma(T)}\nabla u\right] = 0, \\ H = \int_0^T c_p^*(T)\rho^*(T)dT, \\ q = -\lambda(T)\nabla T, i = -\frac{1}{\gamma(T)}\nabla u \end{array} \right. \quad (1)$$

где H – энтальпия, Дж/м³; c_p^* – удельная изобарная теплоемкость, в которой для материалов, содержащих влагу, учтена теплоемкость воды и теплота парообразования путем введения температурного интервала сглаживания, Дж/(кг·К); ρ^* – плотность, кг/м³; T – температура, К; τ – время, с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); γ – удельное электрическое сопротивление (УЭС), Ом·м; u – электрический потенциал, В; q – плотность теплового потока, Вт/м²; i – плотность электрического тока, А/м²; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$ – оператор Гамильтона; $(x, y, z) \in \Omega$ – координаты, м.

Энтальпийная форма записи уравнения теплопроводности используется для учета влагосодержания в крновой пересыпке и теплоизоляции:

$$H = \int_0^{T_m - \Delta T / 2} c_{pm-0}(T) \rho_{m-0}(T) dT +$$

$$+ \frac{\left[c_{pm-0} \left(T_m - \frac{\Delta T}{2} \right) \rho_{m-0} \left(T_m - \frac{\Delta T}{2} \right) + c_{pm+0} \left(T_m + \frac{\Delta T}{2} \right) \rho_{m+0} \left(T_m + \frac{\Delta T}{2} \right) \right] \Delta T}{2} + L_m +$$

$$+ \int_{T_m + \Delta T / 2}^{T > T_m + \Delta T / 2} c_{pm+0}(T) \rho_{m+0}(T) dT$$

где T_m - температура парообразования (фазового перехода), К; ΔT - температурный интервал сглаживания, К; $c_{pm-0} \cdot \rho_{m-0}$ и $c_{pm+0} \cdot \rho_{m+0}$ свойства слева и справа от температуры фазового перехода; L_m - теплота парообразования (фазового перехода), Дж/м³.

В материалах без влаги

$$c_p^* = c_p, \quad \rho^* = \rho \quad \text{и} \quad H = \int_0^T c_p(T) \rho(T) dT.$$

Преимущество энтальпийной формулировки заключается в возможности использования наиболее простой и устойчивой схемы сквозного счета.

Начальные условия

$$T|_{\tau=0} = T(x, y, z). \quad (2)$$

Для поля электрического потенциала начальные условия не задаются.

Граничные условия для уравнения теплопроводности при $\tau > 0$:

на границе (Γ) системы с окружающей средой (условие Фурье)

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \alpha(T_{oc} - T_{\Gamma}),$$

где n - нормаль к поверхности (границе); α - эффективный коэффициент теплоотдачи от поверхности (границы) к среде, Вт/(м·К); T_{oc} - температура окружающей среды, К; T_{Γ} - температура поверхности, К;

на осях симметрии - адиабатные условия (условие Неймана)

$$\frac{\partial t}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

Граничные условия для уравнения электрического потенциала при $\tau > 0$.

Для печи постоянного тока на торцах токоподводов задается плотность электрического тока (условие Неймана)

$$i \Big|_{\Gamma_{\text{токоподв}}} = -\frac{1}{\gamma(T)} \frac{\partial u}{\partial n}. \quad (4)$$

Для печи переменного тока на торцах токоподводов для $1/4$ части печи задается действующее электрическое напряжение умноженное на $\cos \varphi$ и деленное на 2 для половины печи (условие Дирихле)

$$u \Big|_{\Gamma_{\text{токоподв}}} = \frac{u_d(\tau) \cdot \cos \varphi}{2}, \quad (5)$$

т.к. при переменном токе активная электрическая мощность, идущая на нагрев зерна, равняется

$$P_a = u_d \cdot I_d \cdot \cos \varphi,$$

где $u_d = \frac{u}{\sqrt{2}}$, $I_d = \frac{I}{\sqrt{2}}$ - действующие значения напряжения (В) и силы тока (А).

Граничные условия на торце зерна записываются одинаково для обоих типов печей. На торцевой части половины зерна задается нулевой потенциал (условие Дирихле)

$$u \Big|_{\Gamma_{\text{зерна}}} = 0, \quad (6)$$

а на остальных поверхностях условия отсутствия протекания тока (условие Неймана)

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0. \quad (7)$$

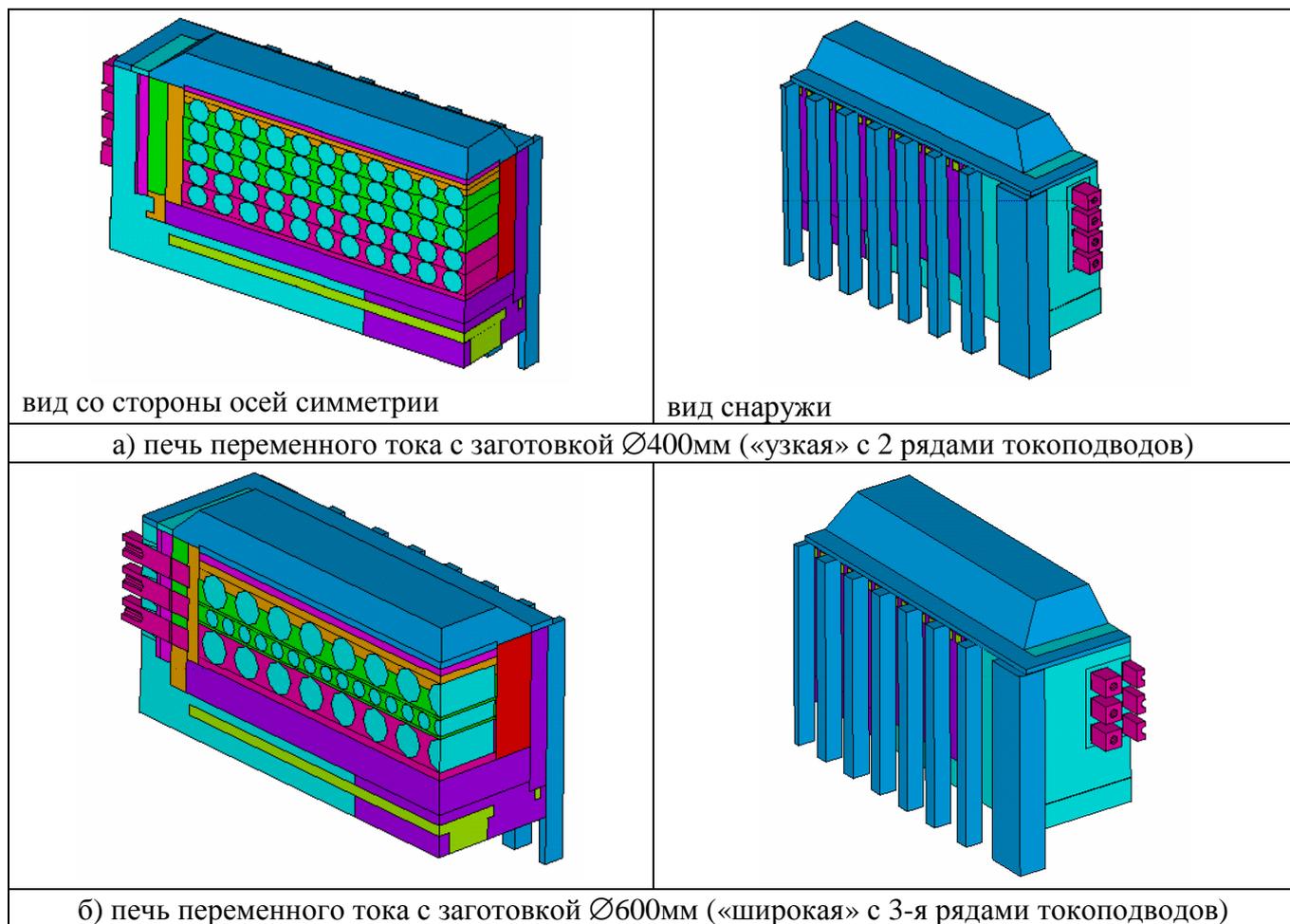
Постановка (1)-(7) позволяет организовать сквозной расчет тепло-электрических полей в печах постоянного и переменного тока и применить для этого стандартное программное обеспечение.

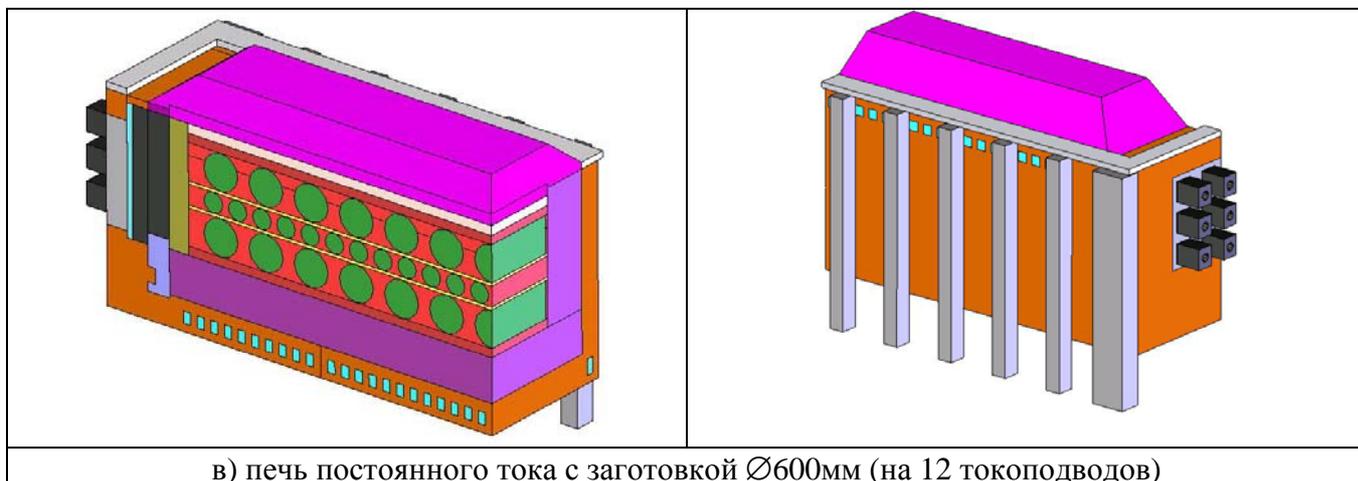
2. Численные модели для расчета тепло-электрических полей печей Ачесона

Рассмотрим 3D геометрические модели ¼ печей графитации наиболее характерных типов:

- «узкая» с 2-я рядами токоподводов;
- «широкая» с 3-я рядами токоподводов;
- постоянного тока на 12 токоподводов.

Геометрические характеристики численных моделей отмеченных печей графитации для выполнения расчетов тепло-электрических полей представлены на рис. 1.





в) печь постоянного тока с заготовкой $\varnothing 600\text{мм}$ (на 12 токоподводов)

Рис. 1. Геометрические характеристики численных тепло-электрических моделей печей графитации различных типов

Представленные численные модели позволяют проводить оценку влияния на энергетические показатели работы печи целого ряда как конструктивных, так и технологических параметров кампании печи графитации:

- геометрия керна: размеры заготовок и способ их укладки; толщины теплоизолирующих и пересыпочных слоев;
- физические свойства материалов печи и керна с учетом различного исходного влагосодержания;
- регламент ввода электрической мощности;
- условия теплообмена с окружающей средой и т.д.

Выходными параметрами численных моделей являются:

- электрические параметры печи;
- температуры конструкционных элементов печи и керна;
- теплототери печи;
- скорости изменения температуры керна;
- удельный расход электроэнергии и т.д.

3. Результаты расчетов физических полей печей Ачесона

С помощью представленных численных моделей тепло-электрических полей ($T-U$) $\frac{1}{4}$ печей графитации переменного тока выполнены тестовые расчеты при графитации заготовок $\varnothing 400\text{мм}$ и $\varnothing 600\text{мм}$.

При выполнении тестовых расчетов производилась отработка следующих параметров с использованием данных натуральных экспериментов:

- электрических параметров: напряжение, сила тока, подведенная мощность, электрическое сопротивление печи, соотношение между активной и реактивной мощностью, удельный расход электроэнергии;
- температур: среднеинтегральная, минимальная и максимальная температура заготовок, темп нагрева заготовок, средние температуры тепловой изоляции керна, шамотной стенки и т.д.;
- физических свойств материалов печи;
- влияние координатной сетки и шага интегрирования по времени на погрешность расчета $T-U$ –полей.

Результаты тестовых расчетов кампании печи переменного тока при графитации заготовок $\varnothing 400\text{мм}$ представлены на рис. 2,4(а), 5, а при графитации заготовок $\varnothing 600\text{мм}$ - на рис. 3,4(б), 6.

4. Выводы

1. Путем компьютерного моделирования разработан усовершенствованный регламент ввода электроэнергии в печь, который характеризуется более высокой интенсивностью ввода мощности в печь на начальном этапе кампании.
2. Применение усовершенствованного регламента позволило обеспечить 98% графитацию заготовок диаметром 400мм [6,7] при сокращении длительности кампании на 7 часов и уменьшении удельных затрат электроэнергии на ~11%.
3. Сокращение длительности кампании на отдельной печи позволяет провести еще одну дополнительную кампанию в течение года.

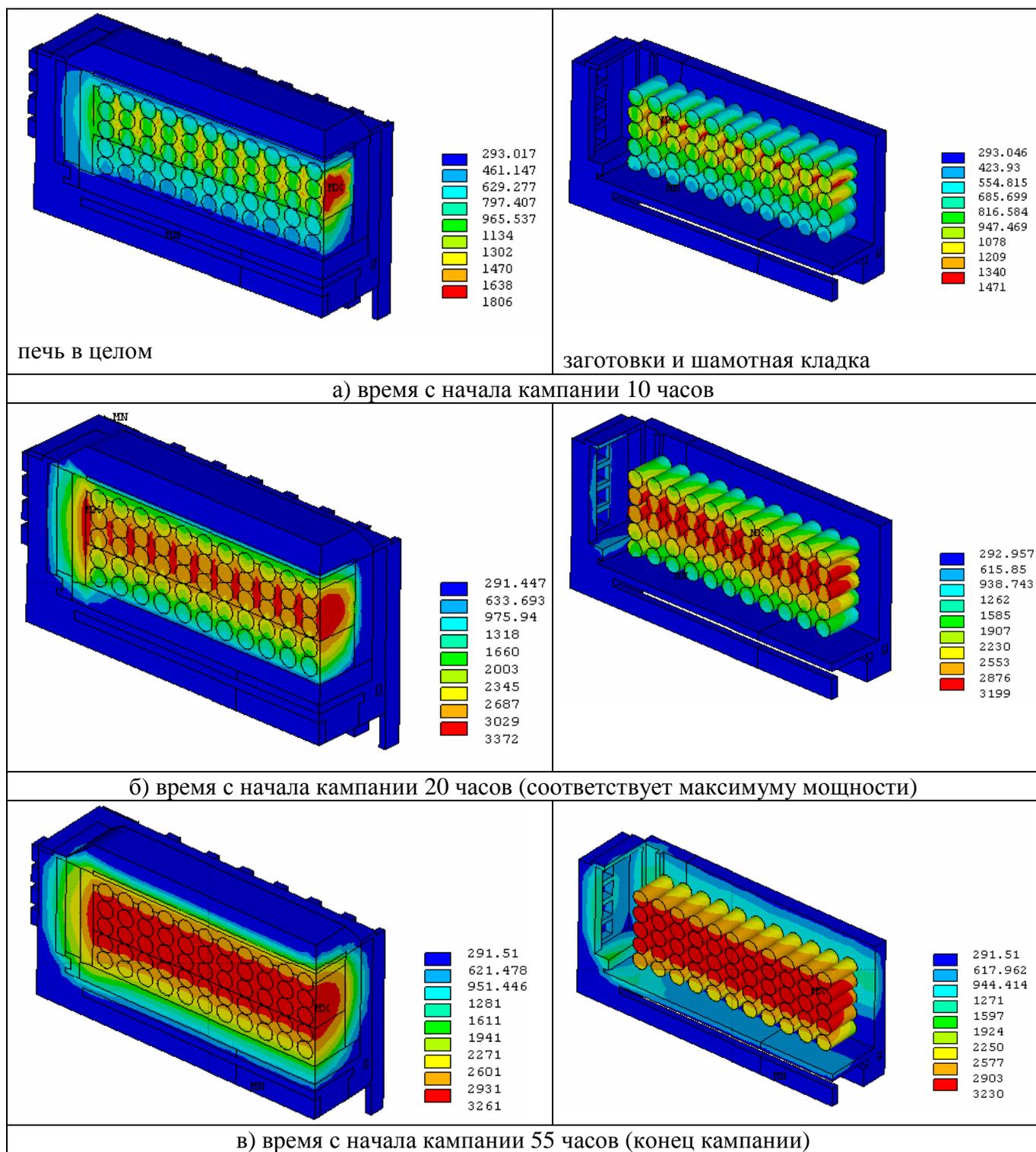


Рис. 2. Температурные поля (К) кампании печи (55 ч.) переменного тока при графитации заготовок $\varnothing 400\text{мм}$

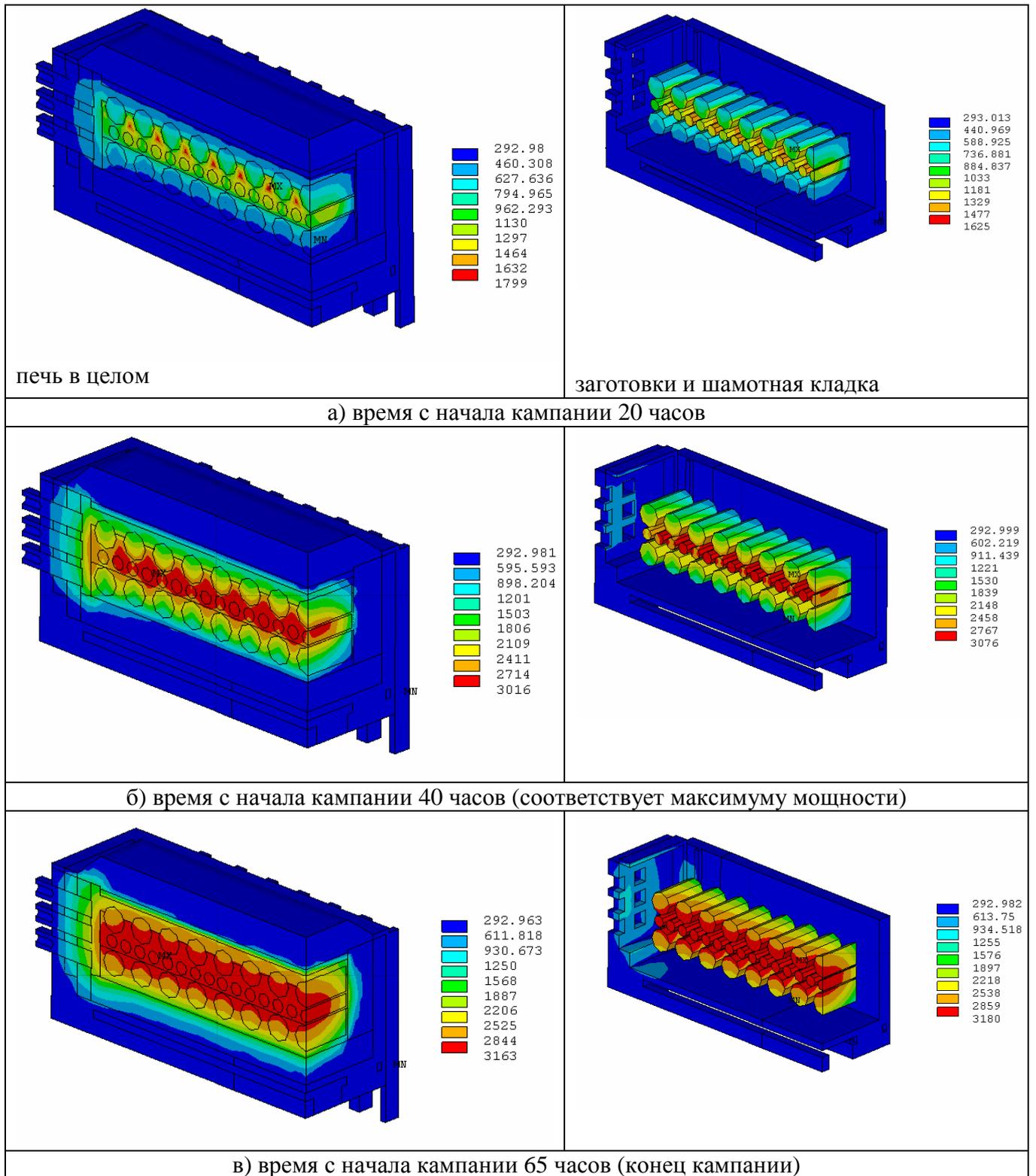


Рис. 3. Температурные поля (К) кампании печи (65 ч.) переменного тока при графитации заготовок $\varnothing 600\text{мм}$

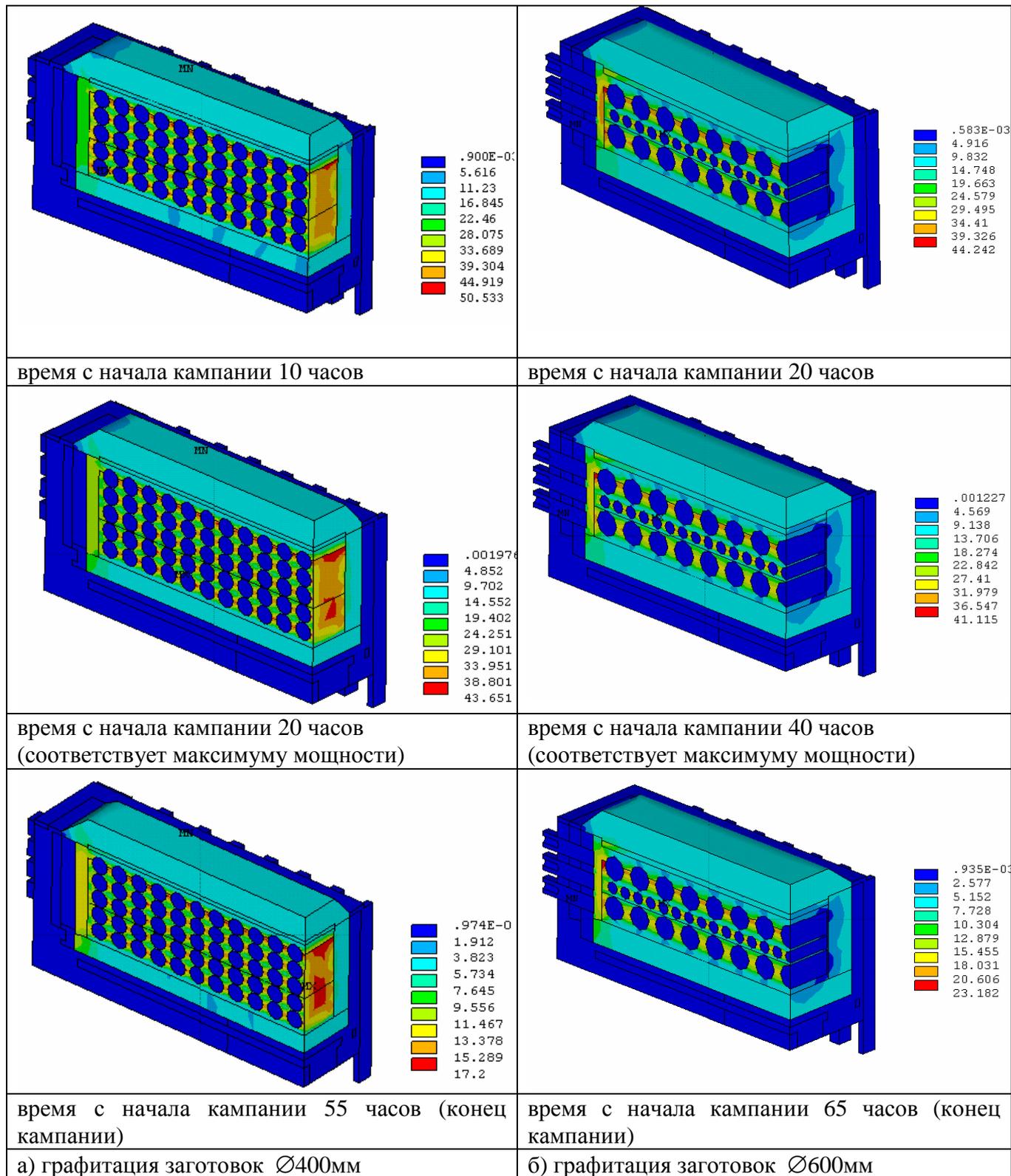


Рис. 4. Поля суммарного градиента электрического потенциала (плотности тока) кампаний печи переменного тока при графитации заготовок $\varnothing 400\text{мм}$ и $\varnothing 600\text{мм}$. (Плотность тока ($\text{А}/\text{м}^2$) пропорциональная величине градиента электрического потенциала ($\text{В}/\text{м}$))

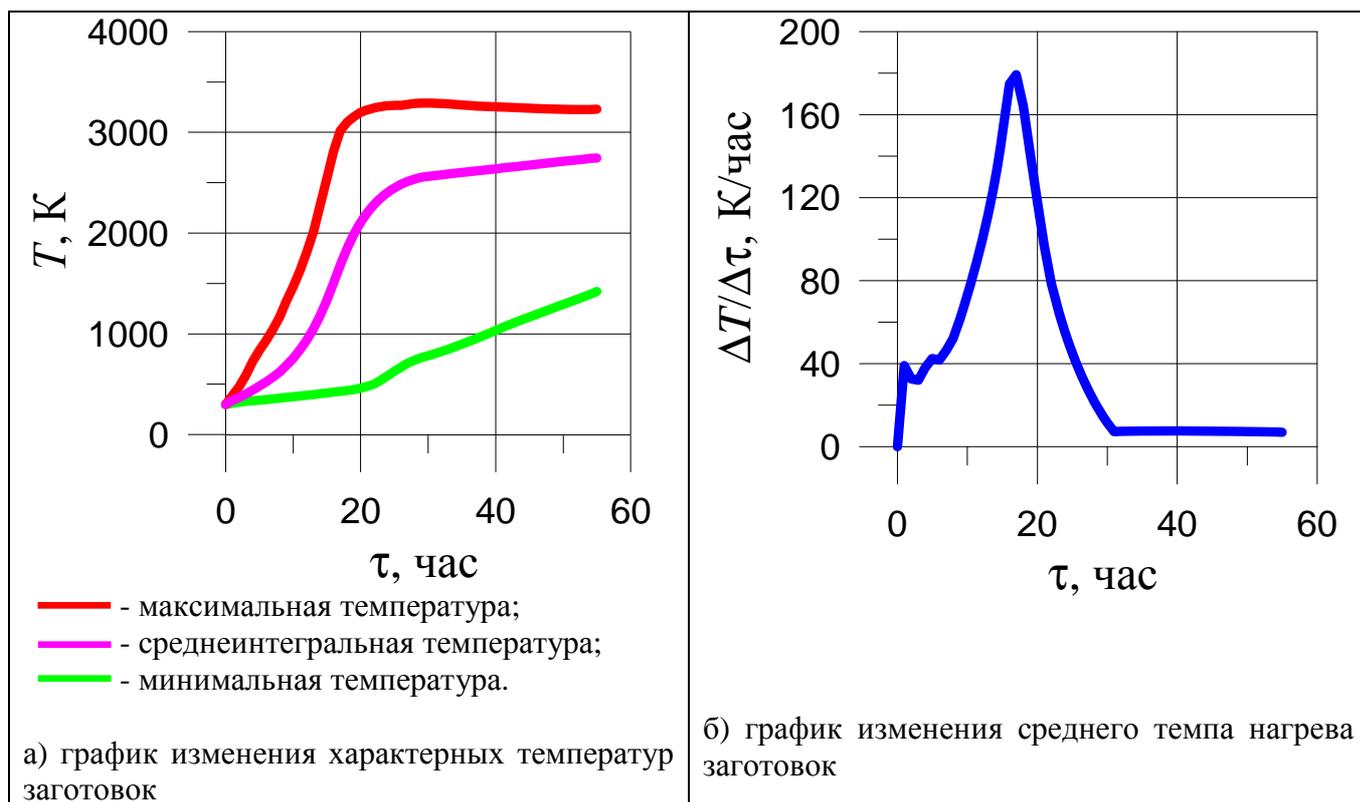


Рис. 5. Расчетные характеристики кампании печи (55 ч.) переменного тока при графитации заготовок $\varnothing 400\text{мм}$. Расчетный удельный расход э/э на кампанию – 5605 кВт·ч/т

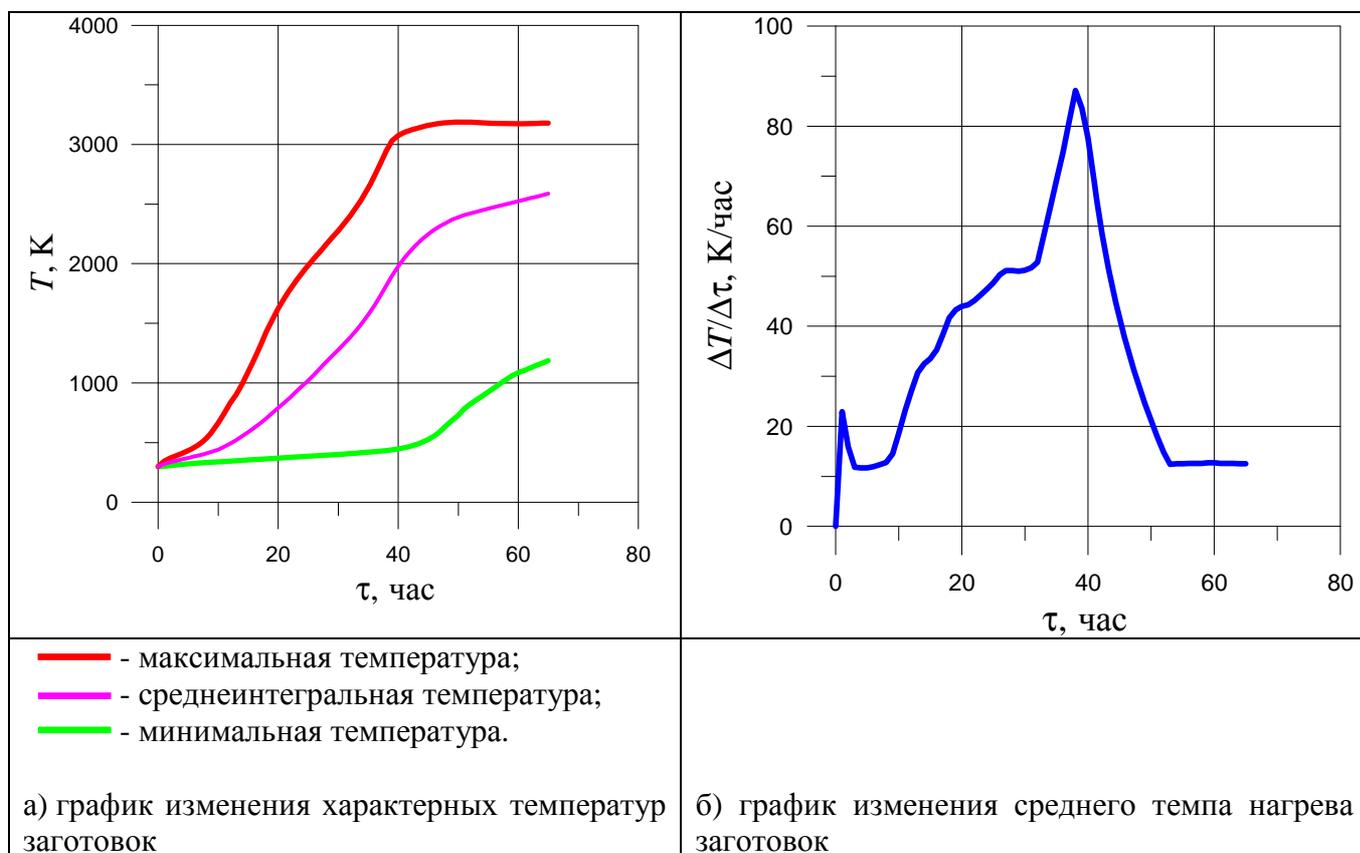


Рис. 6. Расчетные характеристики теплового состояния заготовок кампании печи (65 ч.) переменного тока при графитации заготовок $\varnothing 600\text{мм}$. Расчетный удельный расход э/э на кампанию – 6904 кВт·ч/т

Литература

1. *Соседов В.П., Чалых Е.Ф.* Графитация углеродистых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 176 с.
2. *Санников А.К., Сомов А.Б., Ключников В.В. и др.* Производство электродной продукции. – М.: Металлургия, 1985. – 129 с.
3. *Шулепов С.В.* Физика углеграфитовых материалов. – М.: Металлургия, 1972. – 256 с.
4. *Коржик М.В., Карвацкий А.Я., Шилович И.Л., Уразлина О.Ю.* Исследование электрического поля печи графитации// Промышленная теплотехника. – 2005. -Т.27 – № 3. – С. 25 – 31.
5. *Е.Н.Панов, Г.Н.Васильченко, С.В.Даниленко, А.Я.Карвацкий, И.Л.Шилович, М.Ф.Боженко.* Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства/ Под общ. ред. Б.С. Громова.- М.: Издательский дом «Руда и металлы», 1998. - 256 с.
6. *Коржик М.В., Жученко А.И.* Метод оцінювання ступеня графітації// Автоматизація виробничих процесів. – 2004. – №1. – С. 52 – 54.
7. *Коржик М.В., Шилович И.Л., Жученко А.И., Уразлина О.Ю.* Вдосконалення регламенту графітації електродних виробів// Наукові вісті НТУУ “КПІ”. –2004.-№2.-С. 107-110.