



УДК 669.187.004.18

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРЕ

В. И. Лакомский, А. М. Пальти, Д. Д. Юрченко

Настоящая работа посвящена моделированию тепловых и электрических полей в электрокальцинаторах. В пакете ANSYS проведен компьютерный анализ двух конструкций электрокальцинатора с дросселем и без него. Выполнен сравнительный анализ и показана более высокая эффективность конструкции с дросселем. Даны рекомендации по дальнейшему ее усовершенствованию.

The present work is devoted to the modeling of heat and electric fields in electric calcinators. In the scope of ANSYS package the computer analysis of two designs of electric calcinators was made: with and without a choke. Comparative analysis was made and the higher efficiency of design with a choke was shown. Recommendations are given on its further updating.

**Ключевые слова:** электрокальцинатор; термоантрацит; дроссель; температурное и электрическое поля; теплообмен

**Введение.** В работе [1] выполнено компьютерное моделирование тепловых и электрических полей при электрошлаковой наплавке в пакете прикладных программ ANSYS. Настоящая работа посвящена аналогичному моделированию тепловых и электрических полей в электрокальцинаторах с дросселем [2] и без него [3].

Электрокальцинатор — это электрическая печь сопротивления. Вертикальная шахта печи футерована внутри шамотным кирпичом и муллитовым уплотнением. Вдоль ее оси расположены верхний графитированный и нижний самообжигающийся электроды. В печь загружают антрацит с высоким электрическим сопротивлением. По мере нагревания антрацита газами возгонки угля его электрическое сопротивление падает и через него начинает проходить электрический ток. Основное тепловложение в антрацит происходит при электронагреве. Прокатка обеспечивает низкое удельное электрическое сопротивление и механическую прочность при высокой температуре, что необходимо для катодной футеровки алюминиевых электролизеров.

Предметом изучения явились поля температур и теплового потока, распределение электрического потенциала и плотности тока в рабочем пространстве установки. Рассмотрены два варианта вводи-

мой мощности. Как и в работе [1], учтены зависимости тепловых и электрических характеристик материалов объекта исследования от температуры. В процессе верификации модели некоторые характеристики материалов выбирали с помощью решения обратных задач на основе имеющихся экспериментальных данных о значениях температуры в установке. Численное моделирование тепловых и электрических полей выполнено в том же пакете прикладных программ ANSYS.

**Постановка задачи.** Приведем физические и геометрические характеристики моделей. Геометрии моделей в случае с дросселем и без него показаны на рис. 1. Области решения в обоих вариантах включают нижний 1 и верхний 2 электроды, технологическое пространство, заполненное антрацитом 3, верхний свод из бетона или шамота 4, футеровку шахты электрокальцинатора из шамотного кирпича 7, стальную оболочку 6, прослойку муллитовой изоляции 5 и дроссель 8. Габаритные размеры установки следующие:  $d_{\max} = 2,3$  м (диаметр объекта);  $h_{\max} = 6,6$  м (его высота).

Изучено двухмерное стационарное тепловое состояние технологического пространства с учетом эффективного (конвективного и лучистого) теплообмена наружных поверхностей в среду с температурой 293 К и отвода теплоты водой с той же температурой от нижнего электрода. Объект имеет осе-

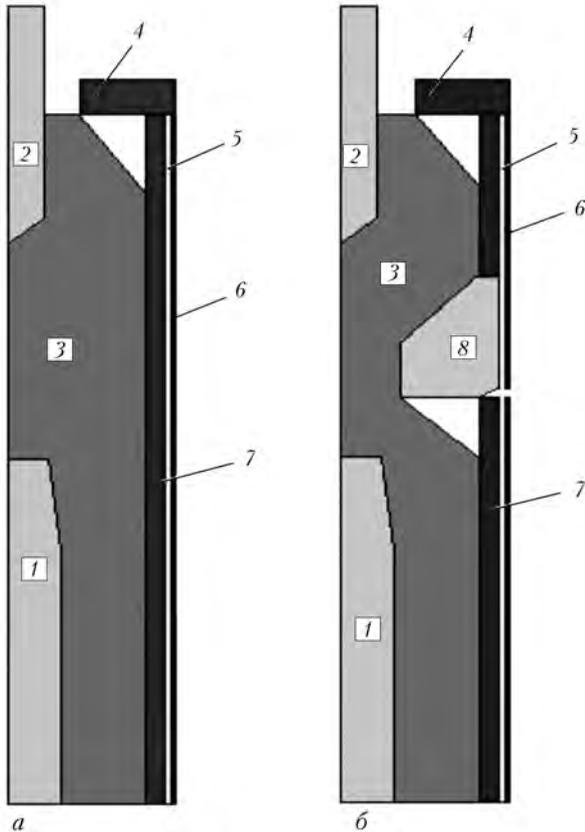


Рис. 1. Геометрии модели без дросселя (а) и с ним (б)

вую симметрию, поэтому рассматривается двумерная модель в цилиндрической системе координат. В модели учтена зависимость теплофизических характеристик термоантрацита от температуры и координаты по высоте шахты печи.

Медленное перемещение прокаливаемого материала в шахте печи со скоростью примерно 0,2...0,3 мм/с обуславливает стационарность задачи. Процесс описывается системой уравнений стационарной теплопроводности и электрического потенциала. Используются неравномерные конечно-элементные сетки рассматриваемого объекта для случая двух геометрий.

Процессы в печи описываются уравнением стационарной теплопроводности с внутренними источниками теплоты

$$\nabla(\hat{\lambda}\nabla T) + \rho(T)|\mathbf{j}|^2 = 0, \quad (1)$$

где  $T = T(r, z)$  — поле температур ( $r$  и  $z$  — переменные цилиндрической системы координат);  $\hat{\lambda}(z, r, T)$  — эффективная теплопроводность области (тензор), Вт/(м·К);  $\rho(T)$  — удельное электрическое сопротивление термоантрацита, Ом·м;  $\mathbf{j}$  — вектор плотности тока, А/м<sup>2</sup>.

В цилиндрической системе координат уравнение нелинейной теплопроводности для нашего объекта имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda(z, T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(z, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho(\nabla \varphi)^2 = 0. \quad (2)$$

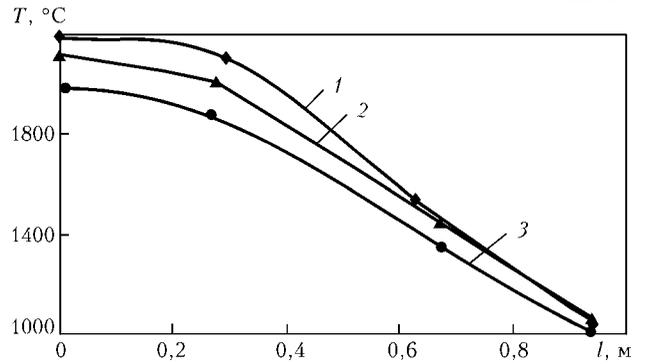


Рис. 2. Температурные распределения на трех следующих горизонтах в области между электродами (режим I): 1 — первый; 2 — второй; 3 — третий;  $l$  — расстояние от оси

Электрическое поле в объекте описывается уравнением Лапласа для потенциала

$$\nabla \mathbf{j} = 0 \text{ или } \Delta \varphi = 0, \quad (3)$$

где  $\varphi(r, z)$  — поле электрического потенциала.

Везде, кроме мест токоподвода, нормальная к границе плотность тока  $j_n$  (или  $-\nabla \varphi$ ) принята равной нулю.

Рассмотрена сопряженная электротепловая задача, т. е. учтены тепловая и электрический контакты различных областей (футеровки шахты, прокаливаемого термоантрацита и материала верхнего и нижнего электродов). На границах областей приняты условия непрерывности температур и электрического потенциала. Конвективный теплообмен в области шахты печи описывали с помощью эффективных коэффициентов теплопроводности. На внешних границах областей задавали условия конвективного и лучистого теплообмена:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r = \alpha(T - T_0) \text{ и } -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r = \sigma \varepsilon_{12}(T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

где обозначение  $|_r$  указывает на значения функции на границе области;  $T_0$  — температура охлаждающей воды, воздуха или стенок;  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_{12}$  — относительная степень черноты излучающих поверхностей.

Математические модели (1)–(4) записывали для всех отдельных участков области решения. Различные их физических свойств учитывали зависимость коэффициентов  $\rho, \lambda$  от координат. Используются данные о теплофизических характеристиках материалов [4, 5].

*Допущения модели и некоторые табличные данные.* С учетом квазистационарности процесса рассмотрено определенное состояние пространства шахты с антрацитом, соответствующее имеющимся опытным данным. Поверхность печи находится в конвективном и лучистом теплообмене с окружающей средой. Происходит воздушный конвективный теплообмен верхнего электрода и места выгрузки готового продукта с окружающей средой. В области подвода тока к верхнему и нижнему электродам

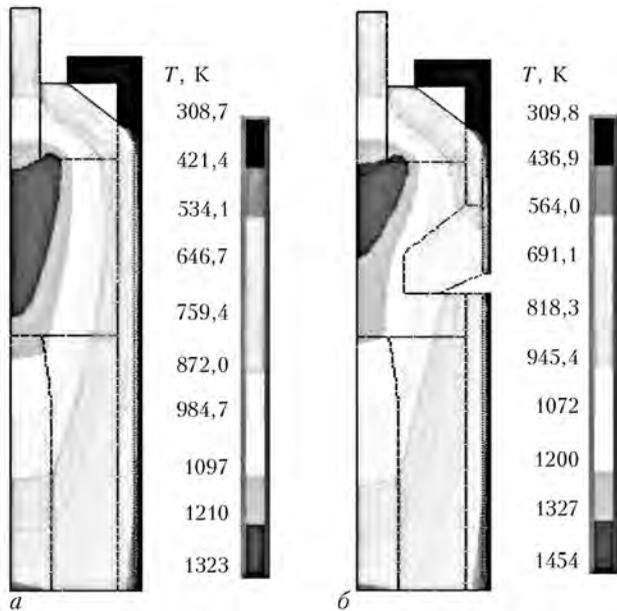


Рис. 3. Полное температурное поле печи в режиме II ( $U = 7$  В): без дросселя (а) и с ним (б) (температуры даны по шкале Кельвина)

имеет место конвективный теплообмен с охлаждающей водой. Коэффициенты конвективного теплообмена выбраны из диапазона  $10... 50$  Вт/(м·К) с помощью решения обратных задач теплопроводности.

Отвод теплоты газами в процессе прокалики, а также готовым продуктом определяется интегральным тепловыделением (в нашем случае, снижением разности потенциалов на электродах).

Приведем теплофизические характеристики по нижнему электроду и дросселю: удельные теплопроводность ( $T > 473$  К),  $\lambda = 7... 10$  Вт/(м·К) и электрическое сопротивление  $\rho = (50... 75)$  мкОм·м. Удельная теплопроводность термоантрацита аппроксимируется следующей линейной зависимостью  $373... 1173 =$

$= (0,41... 0,84)$  Вт/(м·К). Удельное электрическое сопротивление следующее:  $\rho = 0,01(1 - 0,0003\Delta t)$  Ом·м. Плотность насыпного термоантрацита с фракционным составом 6... 25 мм составляет  $1$  т/м<sup>3</sup>.

**Численный анализ температурных и электрических полей.** Как показали исследования температуры и давления контактного сопротивления термоантрацита [6], оно падает с ростом этих параметров по мере перемещения термоантрацита вдоль шахты печи. Поэтому в печи, где «сырой» антрацит подвергается термической обработке, при достижении некоторой температуры угля электрическое сопротивление стабилизируется.

Далее в процессе медленного продвижения сырья вдоль шахты электрокальцинатора оно практически не меняется. Подобная гистерезисная зависимость электрического сопротивления требует при более строгом подходе решения нестационарной задачи.

Мы рассмотрели первое приближение к сложным процессам в исходном сырье — стационарную электротепловую модель. Поэтому проведены численные эксперименты с разбиением области шахты с антрацитом на три зоны, в каждой из которых имеется своя температурная зависимость свойств по высоте печи (рис. 2).

В моделях, кроме нелинейной зависимости  $\rho(T)$  в ряде зон, предусмотрена анизотропия коэффициента теплопроводности термоантрацита (по высоте и радиусу шахты печи) с учетом медленного движения массы сырья (стационарный подход) и сопутствующих процессов обработки сырья, например взаимодействие его с газами сухой перегонки угля и газами — продуктами горения угля в атмосфере подсасываемого в печь воздуха. Принято во внимание также существование дополнительных источников тепловыделения, моделирующего отвод теплоты из печи с готовым термоантрацитом. Заметим также, что подход, учитывающий фазовый переход термоантрацита для обеспечения теплоты, отводимой им из печи, требует решения нестационарной задачи.

Необходимые для описания источники тепловыделения определяли следующим образом. Рассматривали стационарный режим, обычно устанавливающийся в промежутках между актами отбора готового термоантрацита, а теплоту, отводимую из печи вместе с готовым продуктом, учитывали по общему снижению подаваемой на печь мощности (рабочего напряжения на печи).

Приведем оценочный расчет указанного напряжения. Предположим, что мощность в нормальном технологическом режиме рабо-

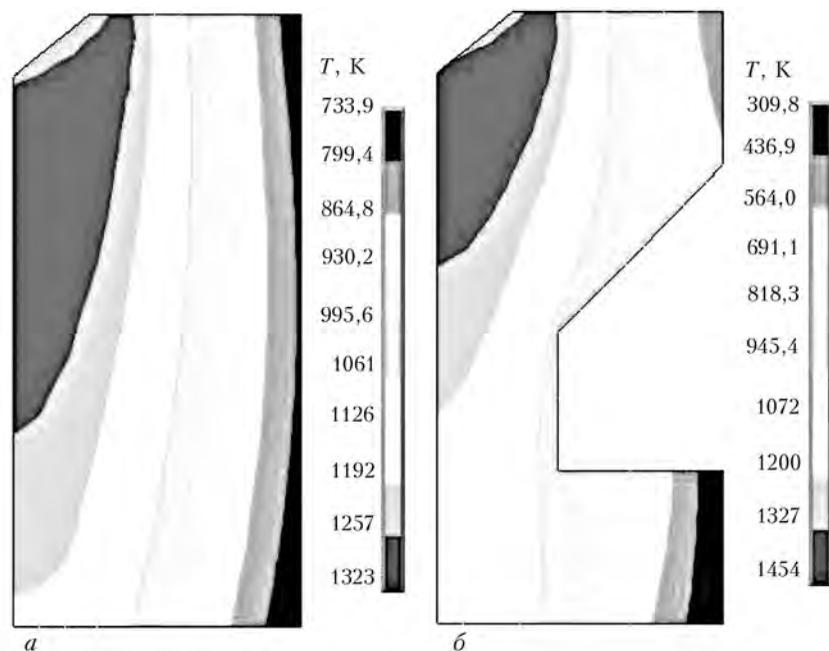


Рис. 4. Температурное поле участка шахты печи (области под электродом) при режиме II: а — без дросселя; б — с дросселем

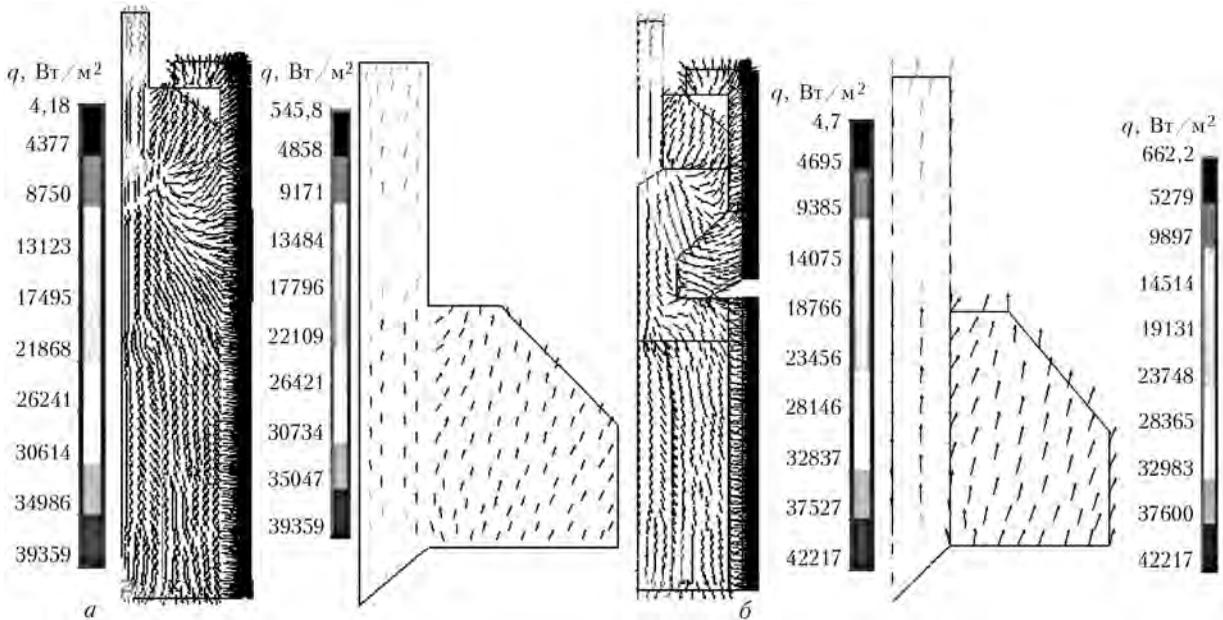


Рис. 5. Поле вектора теплового потока в пространстве шахты печи и участок поля вблизи электрода при режиме II: а – без дросселя; б – с ним

ты печи пропорциональна выходу готового продукта в единицу времени. Как показало численное моделирование, основанная на этом расчете оценка разности потенциалов между электродами согласовывалась с экспериментальными значениями температур на границах установки (металлическом кожухе печи). Характер распределения значений температур на разных горизонтах печи соответствовал указанным данным.

Итак, мощности 0,8 МВт отвечает производительность 2000 кг/ч. Имеющимся температурным данным соответствует выход 650 кг/ч термоантрацита. Такому выходу продукта характерна следующая мощность:

$$(650/2000) \cdot 0,8 = 0,26 \text{ [МВт]}. \quad (5)$$

Мощность, отводимая из печи готовым термоантрацитом, составляет

$$Gc\Delta T/S = (650/3600)1800(800 - 20)/2,3 \approx 0,12 \text{ [МВт]}, \quad (6)$$

где  $G$  – выход готового продукта, кг/с;  $c$  – его теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\Delta T$  – перегрев термоантрацита по отношению к исходному (холодному) продукту, К;  $S$  – площадь выходного сечения шахты,  $m^2$ .

Для получения адекватных значений температуры в модели задавали базовое падение напряжения  $U_1 = 10$  В (режим I), также моделировали режим II, при котором  $U_2 = 7$  В.

Пространственную разбивку сетки выбирали с учетом основных особенностей структуры исследуемого объекта, что отразилось на степени измельчения сетки в отдельных участках шахтного пространства.

На рис. 3, 4 показаны полное поле распределения температур в печи и его участок для режима II (разность потенциалов между электродами  $U = 7$  В) в моделях с дросселем и без него.

Отметим качественный характер приведенных полей температур и тепловых потоков, обусловленный отсутствием точных данных о реальной мощности печи, при которой снимались экспериментальные температуры на различных горизонтах межэлектродного пространства и на наружном кожухе установки. По этой причине рассчитанные значения температур на трех горизонтах несколько превышают опытные данные (рис. 2), однако ход их изменения такой же.

Из поля температур, видно, что уголь сильно перегрет в межэлектродной области. Более интенсивный нагрев у верхнего электрода подтверждает факт его более интенсивного вырабатывания, по сравнению с нижним электродом.

В модель введена анизотропия теплопроводности (вдоль оси шахты печи примерно в 30 раз больше, чем в радиальном направлении). Численные опыты показали большую чувствительность модели к значению коэффициента теплопроводности вдоль оси печи. Это связано с существованием в реальных условиях продольного движения массы антрацита, которое мы учитывали только эффективно.

Относительно большая теплопроводность вдоль оси печи обусловлена наличием, кроме кондуктивного, внутреннего лучистого теплообмена между частицами антрацита. Без введения анизотропии тепловых и электрических свойств не удавалось согласовать эксперимент с результатами моделирования.

В отсутствие дросселя в горизонтальных сечениях между электродами значения температуры распределены в более широком интервале, чем с его наличием. Поэтому при условии, что термоантрацит достигает требуемого значения удельного электрического сопротивления в определенном диапазоне температур, то в случае отсутствия дросселя их более широкий диапазон приводит к тому, что среднее по горизонту удельное электрическое сопротив-

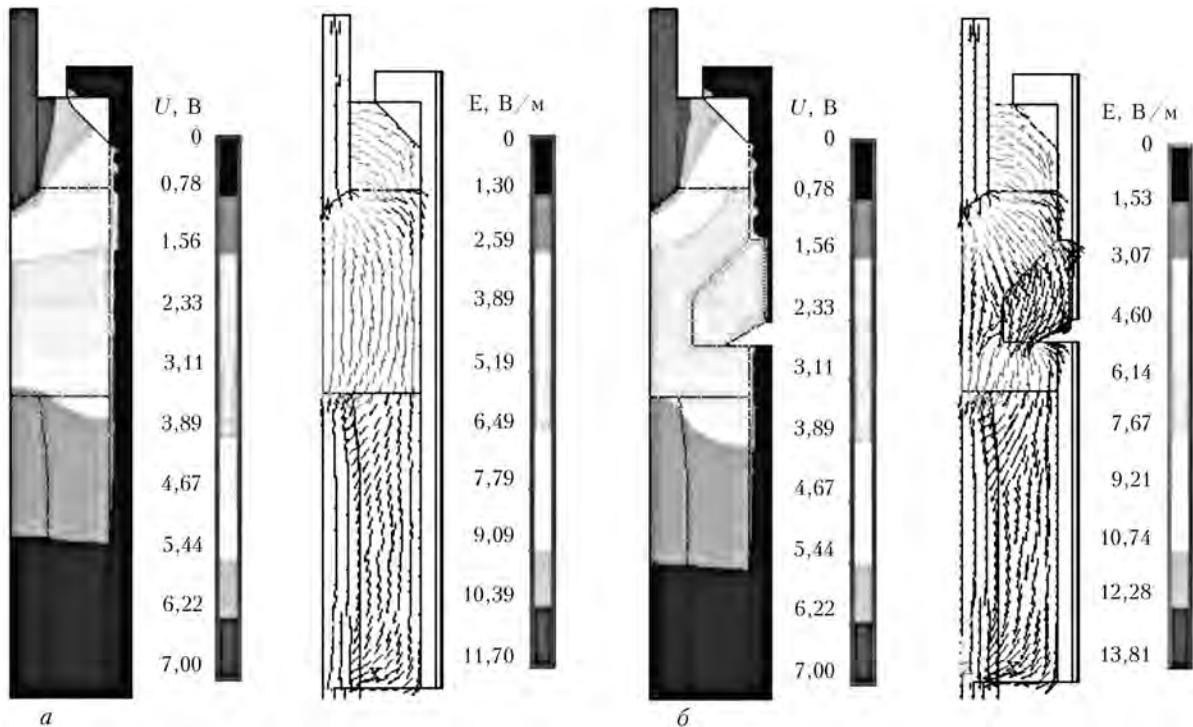


Рис. 6. Распределение электрического потенциала и напряженности электрического поля в печи при режиме II: *a* — без дросселя; *б* — с ним

ление угля на выходе печи без дросселя гораздо выше, чем при его наличии.

В модели с дросселем диапазон температур в горизонтальном сечении массы термоантрацита уже, чем без него, поэтому он равномернее обрабатывается при более высокой средней по горизонту температуре.

Диапазон температур в межэлектродном промежутке (режим I) без дросселя составляет 1233... 2593 К, а при таком же режиме в модели с дросселем — 1993... 2263 К. Прокаливаемый антрацит имеет указанные значения температуры в радиальном сечении шахты печи на уровне середины межэлектродного промежутка. Этот диапазон может быть уменьшен путем изменения конструктивных параметров дросселя и относительного расположения дросселя и электродов.

Перейдем к анализу распределения тепловых потоков. На рис. 5 приведены поле направлений вектора теплового потока в пространстве печи и участок электрода вместе с прилегающей областью при режиме II.

Сравнение полей для двух различных режимов показывает наличие значительного увеличения тепловых потерь через боковой кожух печи, а также через электроды в модели с дросселем, где эти потери возрастают примерно на 10 %. Наиболее высокие значения тепловые потоки имеют в области торца верхнего электрода (без дросселя — 82, с ним — 90 кВт/м<sup>2</sup>). Среднее значение потока, уходящего с поверхности кожуха печи, не превосходит в режиме I с дросселем — 9,8, без него — 9,2 кВт/м<sup>2</sup>, в режиме II с дросселем — 4,5, без него — 4,3 кВт/м<sup>2</sup>.

Уровень тепловых потоков верхнего электрода является важным и доступным для наблюдения параметром при автоматизации процесса. Особенно высокие значения тепловых потоков реализуются в области верхнего электрода, что способствует его более интенсивному выработыванию.

Основные изменения электрического потенциала (рис. 6), происходят в верхних участках шахты, вблизи электрода. Наличие дросселя слабо влияет на их распределение, что связано с его низким удельным электрическим сопротивлением. Вместе с тем наиболее опасная (с точки зрения электрического пробоя) область находится в верхней части печи. Предполагали, что отдельные области печи (кожух, дроссель и др.) идеально контактируют. В действительности сопротивления переходов (электрические и термические) имеют конечные значения, что вносит существенные коррективы в распределение потенциалов. Опасные места можно смоделировать при условии, что наружный кожух имеет нулевой потенциал.

На рис. 6 приведено полное распределение напряженности электрического поля. Участок этого поля (электрод с прилегающей к нему областью печи) представлен на рис. 7. На рисунках показано распределение вектора электрической напряженности, поскольку характер этого поля аналогичен полю вектора плотности тока. Соответствующие характеристики связаны зависимостью  $E = \rho(T)j$ , где  $E$  — напряженность электрического поля;  $\rho(T)$  — зависимость удельного электрического сопротивления от температуры;  $j$  — плотность тока.

Стрелки на рис. 7 показывают направление прохождения тока, а их длина соответствует уровню

напряженности электрического поля (а, значит, и плотности тока). Наибольшие значения напряженности поля имеются у торцов электродов, особенно верхнего.

Максимальные значения плотности тока у торца верхнего электрода на режиме I достигают  $16,7 \text{ [В/м]} / 0,008 \text{ [Ом·м]} = 0,208 \text{ [А/см}^2\text{]}$ . В модели с дросселем плотность тока составляет  $0,245 \text{ А/см}^2$ . Отметим, что реальные плотности тока примерно в шесть раз выше, что связано с особенностями предложенной модели (реальное падение напряжения, как показано выше, занижено примерно в шесть раз). Таким образом, действительные максимальные значения плотности тока должны достигать без дросселя  $1,25$ , с ним —  $1,47 \text{ А/см}^2$ . Эти значения могут уточняться по мере привлечения достоверных экспериментальных данных о параметрах режимов и электрических свойствах элементов печи и обрабатываемого термоантрацита.

### Выводы

1. Установлено, что электротепловые модели печи электрокальцинатора, несмотря на небольшое количество экспериментальных данных, отражают важные особенности процесса, подтверждаемые на опыте. Модель позволяет указать на наиболее напряженные в тепловом и электрическом отношении участки элементов печи.

2. Показано, что в рамках стационарной модели нельзя получить выходные значения электрического сопротивления термоантрацита. Это связано с гистерезисным характером тепловых свойств термоантрацита, которые нельзя моделировать в стационарной модели. В более строгой постановке требуется нестационарная модель.

3. Температурные поля модели с дросселем объясняют повышенную однородность электрических свойств термоантрацита. Связано это с существованием узкого температурного диапазона в проходном поперечном (горизонтальном) сечении печи в области дросселя.

4. Процесс отбора готового термоантрацита в нижней части шахты печи изучали с использованием экспериментальных данных. Более точное описание возможно с учетом фазового перехода в области выхода термоантрацита или путем изучения реальной динамики его перемещения в шахте печи. Решение нестационарной задачи может позволить изучать процесс выхода электрокальцинатора на

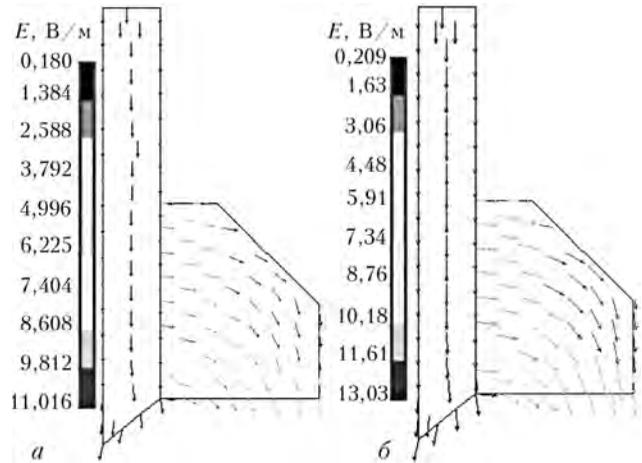


Рис. 7. Распределение вектора напряженности электрического поля в области электрода и прилегающего к нему участка при режиме II без дросселя (а) и с ним (б)

рабочий режим (разогрев печи) с целью минимизации общих затрат электроэнергии.

5. Представляет интерес задача оптимизации геометрических параметров печи (размеры и геометрия верхнего и нижнего электродов, а также дросселя) и электрических параметров режима с целью минимизации удельного расхода энергии. Однако для эффективного численного моделирования следует иметь больше опытных данных.

Одним из достоинств численного моделирования является сокращение количества дорогостоящих натуральных экспериментов, требуемых для отработки оптимальных режимов работы установки.

1. Пальти А. М., Юрченко Д. Д. Компьютерное моделирование электрошлаковой наплавки в водоохлаждаемом кристаллизаторе // Свароч. пр-во. — 2006. — № 9. — С. 12–15.
2. Пат. 89263 Украина, МПК В 21к. Піч електрокальцинації шпичучого вуглецевого матеріалу / Б. Є. Патон, В. Й. Лакомський, С. В. Кутузов та ін. — Опубл. 31.03.2008; Бюл. № 3.
3. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных электроугольных предприятий. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
4. Агроскин А. А. Тепловые и электрические свойства углей. — М.: Металлургия, 1959. — 266 с.
5. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 366 с.
6. Лакомский В. И. Контактная теплопроводность дробленого термоантрацита // Доп. НАН України. — 2004. — № 9. — С. 94–98.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
КТУУ «Киевский политехнический институт»  
ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-ЭС», Киев  
Поступила 04.04.2011