Д. т. н. **А. И. Нижегородов** (✉)

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)», г. Иркутск, Россия

УДК 66.041.3-65:691.034.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ НА СЫПУЧУЮ СРЕДУ В ЭЛЕКТРОПЕЧАХ С ВЕРХНИМ ПОЛОЖЕНИЕМ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрена новая конструкция подвесных излучающих элементов, которая была разработана для нагревательных систем электрических печей с подвижными подовыми платформами и модульно-спусковых печей. Смоделирован перенос лучистой энергии на поверхности модулей обжига и на поток вспучивающегося вермикулита, получены аналитические зависимости для расчета температур излучающих элементов, огнеупорного основания и теплоизоляционной крышки, а также зерен самого материала. Показана возможность значительного увеличения производительности модульно-спусковых печей за счет того, что в зонах пересыпания модулей обжига скученность вермикулита не будет приводить к перегоранию излучающих элементов, как это наблюдалось в системах из ленточного нихрома.

Ключевые слова: *электрическая печь, нагревательная система, излучающие элементы, перенос лучистой энергии, метод сальдо-потоков, угловой коэффициент.*

ВВЕДЕНИЕ

Анализ электрических модулей печей обжига вермикулита выявил недостатки использования ленточного нихрома в качестве излучающих лучистую энергию элементов, установленных на ребро и создающих стесненные условия для движения материала. Вспучивающийся вермикулит при движении контактирует с нагретыми до высокой температуры стенками излучателей, что приводит к образованию нагара и перегоранию нихрома. В зонах пересыпания материала с одного модуля на другой образуется скученность частиц, они перекрывают стенки излучающих элементов по высоте, что приводит к такому же результату [1]. Стесненные условия создают возможность образования заторов и возникновения вермикулитовых пробок между соседними стенками, что время от времени приводит к локальному перегреву и плавлению излучающих элементов [1].

Отказы печей из-за плавления нихрома приводили к необходимости проведения трудоемких ремонтных работ и длительному простою печей. В этой связи следовало пересмотреть конструкцию модулей обжига и создать новую нагревательную систему с верхним положением излучающих элементов, закрепленных на специальных подвесках под термокрышками [2]. Такая конструкция радикально изменила бы условия передачи тепловой энергии в обрабатываемую среду. Поэтому были поставлены две задачи: моделирование переноса лучистой энергии на поверхности модулей обжига и на поток вермикулита, а также получение аналитических зависимостей для расчета температур излучающих элементов и вспучивающихся зерен.

✉
А. И. Нижегородов
E-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

КОНСТРУКЦИЯ ВЕРХНЕЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОДУЛЯ ОБЖИГА

Новая система подвесных излучающих элементов была разработана для электрических печей с подвижными подовыми платформами [2], устанавливаемыми под углом 19–20°. На рис. 1 показан фрагмент печи, который поясняет ее устройство и возможности.

Излучающие элементы *1* расположены между платформой *2* и термокрышкой *3*, выполненной из керамовермикулитовой плиты [3], окантованной металлическим уголком *4*, зафиксированы

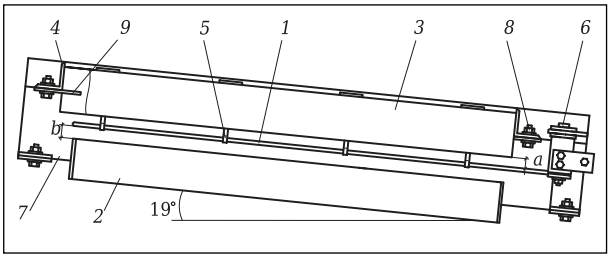

Рис. 1. Конструкция верхней нагревательной системы излучающих элементов

на подвесках *5* и соединены в последовательную цепь с помощью крепежных головок *6*. Уголки *4* соединены с рамной конструкцией *7* с помощью резьбовых соединений *8*, пластины *9* которых по периметру вставлены в пазы термокрышки *3*.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ ВНУТРИ МОДУЛЕЙ ОБЖИГА

Вспучивание вермикулита происходит при теплоусвоении его зернами потоков лучистой энергии, исходящей от электрических излучающих элементов, при поглощении отраженного излучения от поверхностей, образующих пространство обжига внутри модулей, и частично при поглощении теплоты, испускаемой более нагретыми мелкими зернами. Для упрощения аналитической модели процесса теплообмен между крупными и мелкими зернами вермикулита учитываться не будет.

На рис. 2 показан фрагмент поперечного сечения модуля обжига для моделирования переноса лучистой энергии на поверхности пространства обжига внутри модуля методом сальдо-потоков [4]. Поверхности излучателей *1* и *2*, огнеупорного основания *3* и термокрышки *4* являются изотермическими. Поверхности *5* и *6* условны, а вещественные поверхности непрозрачны и изотропны [4], их поглощающие (α) и излучающие (ε) свойства одинаковы. Условные поверхности прозрачны, для них пропускающая способность τ = 1, отражающая ρ = 0. Вещественные поверхности не поглощают и не отражают свое собственное излучение.

Мощность падающих и эффективных потоков соответствующих поверхностей определяют по формулам [4]:

$$Q_{\text{п}i} = \sum_{k=1}^{j} Q_{\text{э}k}\varphi_{ki},\ Q_{\text{э}i} = \rho_i \sum_{k=1}^{j} Q_{\text{э}k}\varphi_{ki} + Q_{\text{с}i}, \qquad (1)$$

где ρ_i — отражающая способность *i*-той поверхности; φ_{ki} — угловой коэффициент, отражающий часть эффективного излучения других поверхностей, попадающего на данную; $Q_{\text{э}k}$ — мощность эффективного потока поверхности *k*, падающего на *i*-тую; $Q_{\text{с}k}$ — мощность собственного излучения.

Тепловые мощности падающих на тела *1* и *2* и поверхности *3* и *4* лучистых потоков (см. рис. 2) равны:

$$\left.\begin{aligned} Q_{\text{п}1} &= Q_{\text{п}2} = Q_{\text{э}1}\varphi_{12} + Q_{\text{э}3}\varphi_{31} + Q_{\text{э}4}\varphi_{41},\\ Q_{\text{п}3} &= Q_{\text{э}1}\varphi_{13} + Q_{\text{э}2}\varphi_{23} + Q_{\text{э}4}\varphi_{43},\\ Q_{\text{п}4} &= Q_{\text{э}1}\varphi_{14} + Q_{\text{э}2}\varphi_{24} + Q_{\text{э}3}\varphi_{34}. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Мощности эффективных потоков поверхностей *1–4* определяют с учетом их отражающих способностей:

$$Q_{\text{э}1} = Q_{\text{э}2} = Q_{\text{с}1} + \rho_1 Q_{\text{п}1} = Q_{\text{с}1} + \rho_1 Q_{\text{э}2}\varphi_{21} + \rho_1 Q_{\text{э}3}\varphi_{31} + \rho_1 Q_{\text{э}4}\varphi_{41}, \qquad (3)$$

$$Q_{\text{э}3} = \rho_3 Q_{\text{п}3} = \rho_3 Q_{\text{э}1}\varphi_{13} + \rho_3 Q_{\text{э}2}\varphi_{23} + \rho_3 Q_{\text{э}4}\varphi_{43}, \qquad (4)$$

$$Q_{\text{э}4} = \rho_4 Q_{\text{п}4} = \rho_4 Q_{\text{э}1}\varphi_{14} + \rho_4 Q_{\text{э}2}\varphi_{24} + \rho_4 Q_{\text{э}3}\varphi_{34}. \qquad (5)$$

Симметрия излучателей уравнивает мощность эффективных потоков условных поверхностей: $Q_{\text{э}5} = Q_{\text{э}6}$. Следовательно, результирующее излучение на них отсутствует, что указывает на тепловое равновесие между излучателями, рассматриваемыми и соседними.

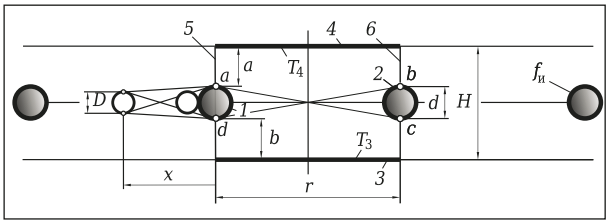

Рис. 2. Фрагмент поперечного сечения модуля к моделированию переноса лучистой энергии: *r* — шаг закрепления излучателей на подвесках; *d* — их диаметр; *a* и *b* — соответствующие зазоры; *H* — высота пространства обжига

Для определения средних угловых коэффициентов используют правило натянутых нитей [4]. В соответствии с ним найдем угловые коэффициенты:

$$\varphi_{12} = \varphi_{21} = \frac{2}{\pi d}\left(\sqrt{d^2 + r^2} - r\right),\ \varphi_{34} = \varphi_{43} = \frac{1}{r}\left(\sqrt{r^2 + H^2} - H\right), \qquad (6)$$

$$\varphi_{14} = \varphi_{41} = \frac{1}{\pi d}\left(\sqrt{a^2 + r^2} + d - \sqrt{(a+d)^2 + r^2}\right),$$

$$\varphi_{13} = \varphi_{31} = \frac{1}{\pi d}\left(\sqrt{b^2 + r^2} + d - \sqrt{(b+d)^2 + r^2}\right). \qquad (7)$$

На основе метода сальдо-потоков по аналогии получим следующие равенства угловых коэффициентов: $\varphi_{13} = \varphi_{31} = \varphi_{23} = \varphi_{32}$, $\varphi_{14} = \varphi_{41} = \varphi_{24} = \varphi_{42}$, $\varphi_{34} = \varphi_{43}$, $\varphi_{31} = \varphi_{32}$ и $\varphi_{41} = \varphi_{42}$.

Чтобы решить системы уравнений мощностей падающих (2) и эффективных потоков (3), (4) и (5) уравнение (3) запишем в приближенном виде:

$$Q_{\text{э}1} = Q_{\text{э}2} \approx Q_{\text{с}1} \approx Q_{\text{с}2} = \varepsilon_{\text{и}}\sigma T_{\text{и}}^4 f_{\text{и}} = Q_{\text{э}}, \qquad (8)$$

где σ — постоянная Стефана – Больцмана, σ = = 5,67·10^{-8} Вт/(м^2·К^4) [5]; $T_{\text{и}}$ — температура проволочных (с круглым сечением) излучателей; $f_{\text{и}}$ — суммарная поверхность излучающих элементов печи.

Приближенное равенство в уравнении (8) почти не влияет на точность дальнейшего решения, так как отражающая способность нихромовых излучателей $\rho_{\text{и}}$ (или ρ_1) составляет примерно 0,04, а степень черноты $\varepsilon_{\text{и}}$ равна 0,96 [6]. Еще меньше влияют угловые коэффициенты φ_{21}, φ_{31} и φ_{41}, снижающие мощность отраженных потоков, на $Q_{\text{э}}$ в уравнении (8), см. формулу (3). Формулы для мощности потоков $Q_{\text{э}3}$ и $Q_{\text{э}4}$ после преобразований примут вид, Вт:

$$Q_{\text{э}3} = 2\rho_{\text{ш}}\varepsilon_{\text{и}}\sigma T_{\text{и}}^4 f_{\text{и}}(\varphi_{13} + \varphi_{34}\varphi_{14}\rho_{\text{ш}})/(1 - \rho_{\text{ш}}^2\varphi_{34}^2), \qquad (9)$$

$$Q_{\text{э}4} = 2\rho_{\text{м}}\varepsilon_{\text{и}}\sigma T_{\text{и}}^4 f_{\text{и}}(\varphi_{14} + \varphi_{34}\varphi_{13}\rho_{\text{м}})/(1 - \rho_{\text{м}}^2\varphi_{34}^2). \qquad (10)$$

Благодаря симметрии излучателей (см. рис. 2) эффективные потоки мощности с их поверхностей одинаковы и выражаются общей зависимостью

$$Q_{\text{э}} = \left[\varepsilon_{\text{и}}\sigma T_{\text{и}}^4 f_{\text{и}}(1 + \rho_{\text{и}}\varphi_{12}) + \rho_{\text{и}} Q_{\text{э}3}(\rho_{\text{и}}\varphi_{12}\varphi_{32} + \varphi_{31}) + \right.$$
$$\left. + \rho_{\text{и}} Q_{\text{э}4}(\rho_{\text{и}}\varphi_{12}\varphi_{42} + \varphi_{41})\right]/(1 - \rho_{\text{и}}^2\varphi_{12}^2). \qquad (11)$$

Для огнеупорного основания *3* из шамота (Ш) и муллитокремнеземистого (МК) войлока, которым целесообразно покрывать нижнюю часть термокрышки *4*, параметры $\rho_ш$ (или ρ_3) и $\rho_м$ (или ρ_4) примерно равны 0,35 и 0,65 [6]. Так как $\rho_и$ = 0,04 и коэффициент φ_{12} = 0,032, при малом влиянии второго и третьего членов в квадратных скобках и знаменателя $1 - \rho_и^2\varphi_{12}^2$ = 0,9999 зависимость (11) может быть существенно упрощена:

$$Q_э = \varepsilon_и \sigma T_и^4 f_и (1 + \rho_и \varphi_{12}). \quad (12)$$

Поэтому формулы (9) и (10) примут следующий вид:

$$Q_{э3} = 2\rho_ш \varepsilon_и \sigma T_и^4 f_и (1 + \rho_и \varphi_{12})(\varphi_{13} + \varphi_{34}\varphi_{14}\rho_ш)/(1 - \rho_ш^2\varphi_{34}^2), \quad (13)$$

$$Q_{э4} = 2\rho_м \varepsilon_и \sigma T_и^4 f_и (1 + \rho_и \varphi_{12})(\varphi_{14} + \varphi_{34}\varphi_{13}\rho_м)/(1 - \rho_м^2\varphi_{34}^2). \quad (14)$$

С учетом влияния теплового излучения полученные зависимости (12)–(14) должны быть подкорректированы. Для этого определим угловые коэффициенты падающих потоков мощности от излучателей *С*, *Б* и *А*, расположенных с шагом *r* слева и справа на поверхностях *4* и *3* (на рис. 2 не показаны). По аналогии с формулами (6) и (7), ориентируясь на алгоритм, приведенный в публикации [5], получим угловые коэффициенты для потоков от соседних излучателей:

$$\varphi_{A3} = \frac{1}{\pi d}\left[\sqrt{r^2 + (b+d)^2} + \sqrt{4r^2 + b^2} - \sqrt{4r^2 + (b+d)^2} - \sqrt{r^2 + b^2}\right],$$

$$\varphi_{B3} = \frac{1}{\pi d}\left[\sqrt{4r^2 + (b+d)^2} + \sqrt{9r^2 + b^2} - \sqrt{9r^2 + (b+d)^2} - \sqrt{4r^2 + b^2}\right],$$

$$\varphi_{C3} = \frac{1}{\pi d}\left[\sqrt{(3r - 0{,}5d)^2 + (b+d)^2} + \sqrt{16r^2 + b^2} - \sqrt{(4r - 0{,}5d)^2 + (b+d)^2} - \sqrt{9r^2 + b^2}\right],$$

$$\varphi_{A4} = \frac{1}{\pi d}\left[\sqrt{r^2 + (a+d)^2} + \sqrt{4r^2 + a^2} - \sqrt{4r^2 + (a+d)^2} - \sqrt{r^2 + a^2}\right],$$

$$\varphi_{B4} = \frac{1}{\pi d}\left[\sqrt{4r^2 + (a+d)^2} + \sqrt{9r^2 + a^2} - \sqrt{9r^2 + (a+d)^2} - \sqrt{4r^2 + a^2}\right],$$

$$\varphi_{C4} = \frac{1}{\pi d}\left[\sqrt{(3r - 0{,}5d)^2 + (a+d)^2} + \sqrt{16r^2 + a^2} - \sqrt{(4r - 0{,}5d)^2 + (a+d)^2} - \sqrt{9r^2 + a^2}\right].$$

С учетом полученных коэффициентов, опуская промежуточные преобразования, и согласно методу сальдо-потоков [4] определим мощность результирующих потоков на соответствующих поверхностях:

$$Q_{р3} = (1 - \rho_ш)(2Q_э\varphi_{13} + Q_{э4}\varphi_{43} + 2Q_{эС}\varphi_{C3} + 2Q_{эВ}\varphi_{B3} + 2Q_{эА}\varphi_{A3}), \quad (15)$$

$$Q_{р4} = (1 - \rho_м)(2Q_э\varphi_{14} + Q_{э3}\varphi_{34} + 2Q_{эС}\varphi_{C4} + 2Q_{эВ}\varphi_{B4} + 2Q_{эА}\varphi_{A4}), \quad (16)$$

$$Q_{р12} = Q_{р21} = Q_р = Q_э\varphi_{12} + Q_{э3}\varphi_{31} + Q_{э4}\varphi_{41} - Q_э.$$

Подставляя зависимость (12) в уравнение (16), получим мощность результирующего потока излучателей:

$$Q_р = \varepsilon_и \sigma T_и^4 f_и (1 + \rho_и \varphi_{12})(\varphi_{12} - 1)\varphi_{12} + Q_{э3}\varphi_{31} + Q_{э4}\varphi_{41}. \quad (17)$$

Располагая мощностями результирующих потоков на термокрышке (МК) и огнеупорном основании модуля (о.о), рассчитаем их температуры:

$$T_{мк} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma f_4} \cdot \left[Q_{э4} - Q_{р4}\left(\frac{1 - \varepsilon_м}{\varepsilon_м}\right)\right]}, \quad (18)$$

$$T_{о.о} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma f_3} \cdot \left[Q_{э3} - Q_{р3}\left(\frac{1 - \varepsilon_ш}{\varepsilon_ш}\right)\right]}, \quad (19)$$

а также температуру излучающих элементов:

$$T_и = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma f_и} \cdot \left[Q_э - Q_р\left(\frac{1 - \varepsilon_и}{\varepsilon_и}\right)\right]}. \quad (20)$$

Сравним степень нагрева поверхностей *3* и *4* модулей обжига с верхним расположением излучателей (см. рис. 2) и нижним, т. е. с прежней конструкцией излучателей из ленточного нихрома.

В работе [7] рассчитаны $T_{о.о}$ и $T_{мк}$ (539,7 и 568,1 °С соответственно) при ширине модуля 0,95 м, числе излучателей *10* сечением 0,01×0,002 м², рабочей длине модуля, находящейся под излучением, 0,95 м, высоте пространства обжига 0,042 м. Для расчета $T_{мк}$, $T_{о.о}$ и $T_и$ по новым формулам (18), (19) и (20) воспользуемся балансом плотности мощности лучистого потока *e* суммарно для трех модулей и электрической удельной мощности [5]:

$$e = \sigma T_и^4 = 3IU / f_и, \quad (21)$$

где *I* и *U* — сила тока, А, и линейное напряжение, В, в цепи излучателей; $f_и$ — суммарная площадь поверхности всех проволочных излучателей печного агрегата.

Формулы для расчета мощности эффективных и результирующих потоков с поверхностей излучателей примут вид:

$$Q_э = Q_{эС} = Q_{эВ} = Q_{эА} = 3\varepsilon_и UI(1 + \rho_и\varphi_{12}), \quad (22)$$

$$Q_р = 3\varepsilon_и UI(1 + \rho_и\varphi_{12})(\varphi_{12} - 1)\varphi_{12} + Q_{э3}\varphi_{31} + Q_{э4}\varphi_{41}, \quad (23)$$

а формулы (13) и (14) можно записать в виде:

$$Q_{э3} = 6\rho_ш \varepsilon_и IU(1 + \rho_и\varphi_{12})(\varphi_{13} + \varphi_{34}\varphi_{14}\rho_ш)/(1 - \rho_ш^2\varphi_{34}^2), \quad (24)$$

$$Q_{э4} = 6\rho_м \varepsilon_и IU(1 + \rho_и\varphi_{12})(\varphi_{14} + \varphi_{34}\varphi_{13}\rho_м)/(1 - \rho_м^2\varphi_{34}^2). \quad (25)$$

После расчета угловых коэффициентов и мощностей потоков (22)–(25) с учетом параметров сети (*I* = 185 А и *U* = 220 В) и печи-аналога (*b* = 15 мм, *a* = 5 мм, см. рис. 1 и 2) и той же площади сечения излучателей произведем расчет температур с переводом в градусы Цельсия. Температура проволочных излучателей $T_и$ достигает 907,5 °С, тогда как в прежней конструкции она составляет 769,3 °С [7], рост температуры составляет 17,7 %; $T_{о.о}$ равна 551,3 °С, что на 2,2 % выше, чем в модуле прежней печи (539,6 °С) [7]; $T_{мк}$ составляет 673,8 °С, а в прежней конструкции на ленточных нагревателях печи-аналога 568,1 °С, рост 18,6 %. Рост температур при той же электрической мощности объясняется уменьшением высоты пространства обжига от 42 до 25,5 мм, что снижает его объем на 40 %, и уменьшением площади излучающей поверхности проволочных излучателей на 34 % (периметр сечения излучателей: ленточных 24 мм, проволочных 15,7 мм при диаметре 5 мм).

Таким образом, верхняя нагревательная система энергетически более эффективна и дает воз-

можность снизить температуру всех ее элементов, сохраняя качественный обжиг вермикулита при меньшем потреблении электроэнергии.

ПЕРЕНОС ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ НА СЫПУЧУЮ СРЕДУ

Определим мощность проволочных излучающих элементов, которой будет хватать для полной дегидратации, теплоусвоения и вспучивания вермикулита. Воспользуемся данными статьи [9], в которой указаны примерные средневзвешенные значения отражающей ($\rho_в$ = 0,31) и поглощающей способности ($\alpha_в = \varepsilon_в$ = 0,69) вермикулитовых зерен ($\varepsilon_в$ — степень черноты).

Наблюдение за вспучивающимися зернами в электрических модульно-спусковых печах показывает, что все зерна катятся в режиме постоянных подскоков из-за их собственной анизотропии формы и шероховатости огнеупорной поверхности модулей обжига. Поэтому на рис. 2 зерно показано на уровне излучателя в двух положениях: при $x = 0{,}5r$ и в непосредственной близости к нему. Представим видимое на рис. 2 зерно как сечение сплошной «вермикулитовой нити» диаметром D, длиной 0,95 м (зона падающего теплового излучения) и рассмотрим изменение температуры на его поверхности.

Влияние отраженных от термокрышки и основания энергий, как показано в публикации [7], на температуру вермикулита не превышает 8–10 %, поэтому в дальнейших расчетах будем учитывать собственные потоки мощности излучателей. Формула, указанная в публикации [7], позволяет найти температуру, К, на поверхности зерна вермикулита при его центральном и сближенном с излучателем положении:

$$T_{вер} = \sqrt[4]{\alpha_в \frac{6IU\varepsilon_и}{\sigma f_в}(1+\rho_и\varphi_{12})\,\frac{2\varphi_1+\varphi_2}{3}}, \qquad (26)$$

где φ_1 — угловой коэффициент для потоков мощности от излучателей слева и справа до зерна, расположенного на удалении $x = 0{,}5r$; цифра 6 в формулах (24) и (25) показывает, что зерно подвергается тепловому излучению с двух сторон. В соответствии с алгоритмом вычисления угловых коэффициентов получим:

$$\varphi_1 = \frac{1}{d}\left[d^2 + \left(\frac{1}{2}d + \frac{1}{2}D\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2}(d+D) = 0{,}064.$$

При положении зерна $x = 0{,}5d + 0{,}5D$ (см. рис. 2) φ_2 определится из выражения

$$\varphi_2 = \frac{2}{\pi d}\left[\left(d^2 + (r-D)^2\right)^{\frac{1}{2}} - r - D\right] = 0{,}42.$$

Такое же значение φ_2 будет иметь и для зерна, движущегося под излучающим элементом.

Полную площадь поверхности условной «вермикулитовой нити» $f_в$, находящейся под излучением (аналогом является печь с конструктивными размерами нагревательной системы и модуля второй опытно-промышленной печи [7]), можно рассчитать по формуле

$$f_в = 3\pi d(2n_н + 1)l_р,$$

где $(2n_н + 1)$ — количество условных «вермикулитовых нитей» в каждом из модулей печи, при $n_н = 10$ $(2n_н + 1) = 21$; $l_р$ — длина рабочего участка огнеупорной поверхности (0,95 м).

Расчет $f_в$ дает значение 0,92 м^2. При полученных значениях и параметрах электрической сети (I = 185 А и U = 220 В) расчет по формуле (26) дает температуру вспученного зерна 574,1 °С.

Чтобы установить зависимость температуры вермикулита на стадии завершения вспучивания, сделаем ряд преобразований. Формулу (26) приведем к виду

$$T_{вер}^4 \sigma f_в = 6IU\alpha_в\varepsilon_и(1+\rho_и\varphi_{12})\frac{1}{3}(2\varphi_1+\varphi_2) \qquad (27)$$

и введем обозначение:

$$Q_т = T_{вер}^4 \sigma f_в,$$

где $Q_т$ — мощность процесса теплоусвоения зернами вермикулита тепловой энергии по мере их прохождения по модулям печи за время переходного процесса, равное времени обжига. В дальнейшем мощность теплоусвоения будет использоваться при исследовании энергетического баланса системы печь – среда.

Представим баланс (21) в более подходящем виде:

$$3IU = \sigma T_и^4 f_и. \qquad (28)$$

Заменяя в формуле (27) произведение $3IU$ с учетом баланса (28) и сокращая на σ, получим следующее уравнение:

$$T_{вер}^4 f_в = 2T_и^4 f_и \alpha_в\varepsilon_и(1+\rho_и\varphi_{12})\frac{1}{3}(2\varphi_1+\varphi_2). \qquad (29)$$

Выразим температуру вспученного вермикулита на выходе из печи с новой нагревательной системой с подвесными излучателями, преобразуя уравнение (29):

$$\frac{T_{вер}^4}{T_и^4} = 2\frac{f_и}{f_в}\alpha_в\varepsilon_и(1+\rho_и\varphi_{12})\frac{1}{3}(2\varphi_1+\varphi_2).$$

Извлекая корень четвертой степени из обеих частей уравнения, окончательно получим зависимость для определения температуры вспученного вермикулита, К:

$$T_{вер} = T_и \sqrt[4]{\frac{f_и}{f_в}\alpha_в\varepsilon_и(1+\rho_и\varphi_{12})\frac{2}{3}(2\varphi_1+\varphi_2)}. \qquad (30)$$

По выражению (30) построен график зависимости $T_{вер}$ от $T_и$ с учетом вышеприведенных исходных данных (рис. 3).

Экспериментально доказано [9], что полноценное вспучивание вермикулита со средним условным диаметром зерен 5 мм за время 2,7–3 с, примерно соответствующее продолжительности обжига в печи-аналоге [7], происходит при темпе-

ратуре нагрева зерен до 510–512 °С. Полученное расчетное значение 574,1 °С оказывается более чем достаточным, поэтому $T_и$ можно несколько снизить, чтобы уменьшить электрическую мощность печи.

График, показанный на рис. 2, может использоваться в качестве регулировочной характеристики, с помощью которой можно настраивать печь на заданную температуру нагрева термообрабатываемого материала. В зависимости (30) при переходе

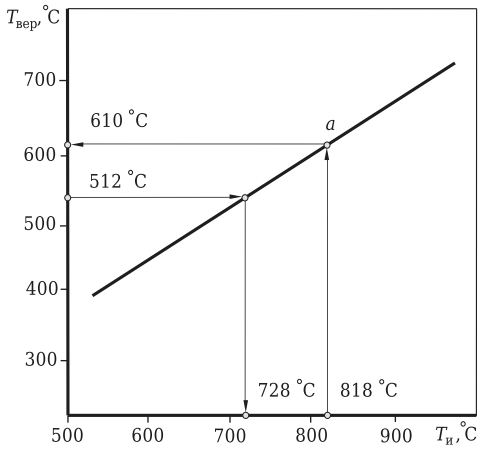

Рис. 3. Зависимость $T_{вер}$ в конце процесса обжига от $T_и$

от одного вида сырья на другое будет изменяться только значение поглощающей способности материала $\alpha_в$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена новая конструкция нагревательной системы с термокрышкой из керамовермикулитовой плиты с верхним расположением излучательных элементов для печей с подвижными подовыми платформами и модульно-спусковых печей. Новое техническое решение устраняет постоянные контакты зерен вспучивающегося вермикулита с раскаленными поверхностями излучателей, образование на них нагара, локальный перегрев, перегорание и отказы печи, а верхнее расположение излучателей — образование заторов вермикулита между ленточными нагревательными элементами, что также уменьшает частоту отказов печей.

Новая нагревательная система с верхним расположением излучающих элементов обеспечивает значительное повышение температур на всех поверхностях пространства обжига и на самих излучателях. Рост температур при той же потребляемой электрической мощности обусловлен уменьшением расстояния между термокрышкой и огнеупорным основанием модуля от 42 до 25,5 мм, что снижает объем этого пространства на 40 %. Кроме того, на рост температур существенно влияет уменьшение площади излучающей поверхности проволочных излучателей по сравнению с ленточными излучателями из того же нихрома на 34 %. Таким образом, верхняя нагревательная система энергетически более эффективна и позволяет при более низких температурах и меньшем потреблении энергии обеспечить качественный обжиг вермикулита.

Еще одна важная перспектива новой системы — возможность увеличить подачу сырьевого материала на обжиг в печь. Теперь в зонах пересыпания электрических модульно-спусковых печей образование второго и даже третьего слоя вермикулита не будет приводить к локальному перегреву и перегоранию ленточного нихрома, потому что его в этих зонах просто нет. Однако возможность, например, удвоения производительности печи требует энергетического анализа и расчета достаточности мощности поглощаемого вермикулитом тепла, излучаемого новой нагревательной системой, что еще предстоит сделать.

Библиографический список

1. ***Нижегородов, А. И.*** Опыт эксплуатации электрических модульно-спусковых печей различных модификаций для обжига вермикулитовых концентратов / *А. И. Нижегородов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 9. — С. 27–34.

2. **Пат. 192841, Российская Федерация, МПК F 27 B 9/06.** Электрическая печь для получения вспученного вермикулита / Нижегородов А. И. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ, г. Иркутск. — № 2019121160 ; заявл. 08.07.2019 ; опубл. 02.10.2019, Бюл. № 28.

3. ***Ахтямов, Р. Я.*** Вермикулит — сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов / *Р. Я. Ахтямов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2009. — № 1/2. — С. 59–64.

4. ***Телегин, А. С.*** Тепломассоперенос / *А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко.* — М. : ИКЦ «Академкнига», 2002. — 455 с.

5. Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. — М. : Изд-во физ-мат. лит-ры, 1972. — 256 с.

6. ***Кутателадзе, С. С.*** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справочное пособие / *С. С. Кутателадзе.* — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 367 с.

7. ***Нижегородов, А. И.*** Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / *А. И. Нижегородов, А. В. Звездин.* — Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2015. — 250 с.

8. ***Нижегородов, А. И.*** Аналитическая модель поглощательно-отражательной способности вермикулита в условиях теплового излучения / *А. И. Нижегородов, А. В. Звездин, Т. Б. Брянских* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 1. — С. 15–20.

Nizhegorodov, A. I. Analytical model of absorption-reflection properties of vermiculite under thermal radiation conditions / *A. I. Nizhegorodov, A. V. Zvezdin, T. B. Bryanskikh* // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 2. — P. 19–24.

9. ***Нижегородов, А. И.*** Уточненная модель теплоусвоения вермикулита при обжиге в электрических печах с учетом новых экспериментальных данных / *А. И. Нижегородов, А. В. Звездин, Т. Б. Брянских* // Строительные материалы. — 2017. — № 3. — С. 96–99. ■

Получено 26.11.19
© А. И. Нижегородов, 2020 г.