

УДК 666.7;66.041.3-65

НЕЛИНЕЙНАЯ НАГРЕВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА МОДУЛЬНО-СПУСКОВЫХ И ПЛАТФОРМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОБЖИГА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена конструкция подвесной нелинейной нагревательной системы модульно-спусковых и платформенных печей для обжига вермикулита и других сыпучих материалов. Ранее конструкция линейных нагревательных систем не обеспечивала однородного нагрева термообрабатываемых материалов, материал в пристеночных зонах недополучал достаточной тепловой энергии. Кроме того, перегрев центральной зоны увеличивал частоту перегорания самих нагревателей, что сказывалось на надежности печи. Применение нелинейной нагревательной системы изменило это распределение на противоположное. Мощность пристеночного нагревателя превысила мощность центрального в 1,2–1,36 раза в зависимости от соотношения диаметров тонких и толстых (диаметром 4 мм) нагревателей. При этом не только выросла их электрическая мощность, но увеличились и потоки теплового излучения, падающие на поверхность пода, что привело к увеличению температуры обрабатываемого материала. Полученные значения температуры зерен вермикулита в пристеночных зонах модуля обжига превышают температуру вермикулита в центральной зоне на 26 %, при этом она достаточна для качественного вспучивания материала. Благодаря использованию нелинейной нагревательной системы произошло перераспределение температур на нагреваемых поверхностях в пользу относительно холодных пристеночных зон: тепловая картина изменилась на противоположную, т. е. холодные пристеночные зоны стали относительно горячими.

Ключевые слова: нелинейная нагревательная система, модульно-спусковая печь, платформенная печь, вермикулит, неоднородное распределение температур, относительная электрическая мощность, относительная температура.

ВВЕДЕНИЕ

В 2015 г. была построена и испытана первая опытная электрическая платформенная печь с качающимся подом, реализовавшая новую концепцию печных агрегатов для обжига вермикулита и других термоактивируемых сыпучих материалов [1], которая показала возможность доведения удельной энергоемкости его обжига до 65–80 мДж/м³ в зависимости от вида и размерности исходного сырья.

Печи предшествовавшей концепции — модульно-спусковые — в силу конструктивных особенностей (использование наклонных модулей с разгонным движением обжигаемого материала и др.) не позволяли достигнуть таких показателей до тех пор, пока не были разработаны новые оригинальные конструкции, позволившие практически удвоить производительность

при неизменном потреблении электроэнергии [2, 3]. Новая нелинейная нагревательная система, пригодная для использования в обоих типах печных агрегатов, обеспечит качество обжига и дополнительное повышение их энергоэффективности.

Основными особенностями платформенных печей являются минимизированное рабочее пространство модулей обжига, а также новое устройство быстросъемных подвесных нагревательных систем и транспортирование обжигаемого сырья в тепловом поле с постоянной скоростью при непрерывном потоке частиц вермикулитового концентрата или другого материала. За счет этого достигается не только высокая энергоэффективность, но и максимальная надежность.

Однако один из недостатков электрических модульно-спусковых печей есть и у печей новой конструкции — неравномерное тепловое поле в пространстве обжига, что требует некоторого завышения тепловой мощности для обеспечения качественной термообработки сырья.

Первые печи имели нагревательную систему в виде набора одиночных нагревателей из



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

ленточного нихрома, соединенных в последовательную электрическую цепь и расположенных на основании модулей обжига. От этой схемы пришлось отойти при использовании подвесных нагревательных систем [1–3].

Цель данной работы — усовершенствование модульно-спусковых печей и печей с подвижным подом путем использования новой конструкции быстросъемных подвесных нелинейных нагревательных систем в модулях обжига.

АНАЛИЗ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЬНО-СПУСКОВЫХ ПЕЧЕЙ

На рис. 1 показаны нагревательные системы модулей обжига двух типов печей — электрической модульно-спусковой, выполненной из ленточного нихрома (см. рис. 1, а), и платформенной, выполненной из проволоочного нихрома (см. рис. 1, б). Первая система устанавливается в печи под углом 45° к горизонту, как и сам модуль, сопряженный с двумя другими для перекачки термообрабатываемого материала под действием тяжести частиц — так работают гравитационные спуски [4]. Вторая система может устанавливаться как горизонтально, так и полого наклонно, над колеблющимся подом платформенной печи в зависимости от ее конструкции. Обе относятся к линейным нагревательным системам, в которых и шаг расстановки электронагревателей и их сечение постоянны.

Модульно-спусковая опытно-промышленная печь, на которой проводили измерения температур (см. рис. 1, а), включала три модуля обжига с двенадцатью нагревателями в каждом. По сечению А–А показаны выборочно температуры на поверхности обжига между нагревателями, а по сечению Б–Б — температуры самих нагревателей. Изменение температуры по продольному сечению А–А связано с наклонным положением модулей, которое вызывает тепловую воздушную тягу в пространстве обжига и охлаждение их огнеупорного основания в нижней и верхней частях. Этот недостаток полностью устраняется в платформенных печах с подвижным подом. Платформа с подом в такой печи совершает низкочастотные асимметричные колебания, при которых создается вибротранспортный эффект, хорошо изученный и широко применяющийся в технике [5].

На рис. 2, а показан график зависимости температуры по сечению А–А (см. рис. 1) от положения точки измерения по всей длине огнеупорной поверхности модуля обжига, построенный по экспериментальным данным.

Видно, что при наклонном положении модулей обжига температура их поверхности, по которой скатываются вспучивающиеся зерна вермикулита или другого термообрабатываемого материала, изменяется незначительно, достигая наивысшего значения примерно в центре модуля. Такая картина имеет место не толь-

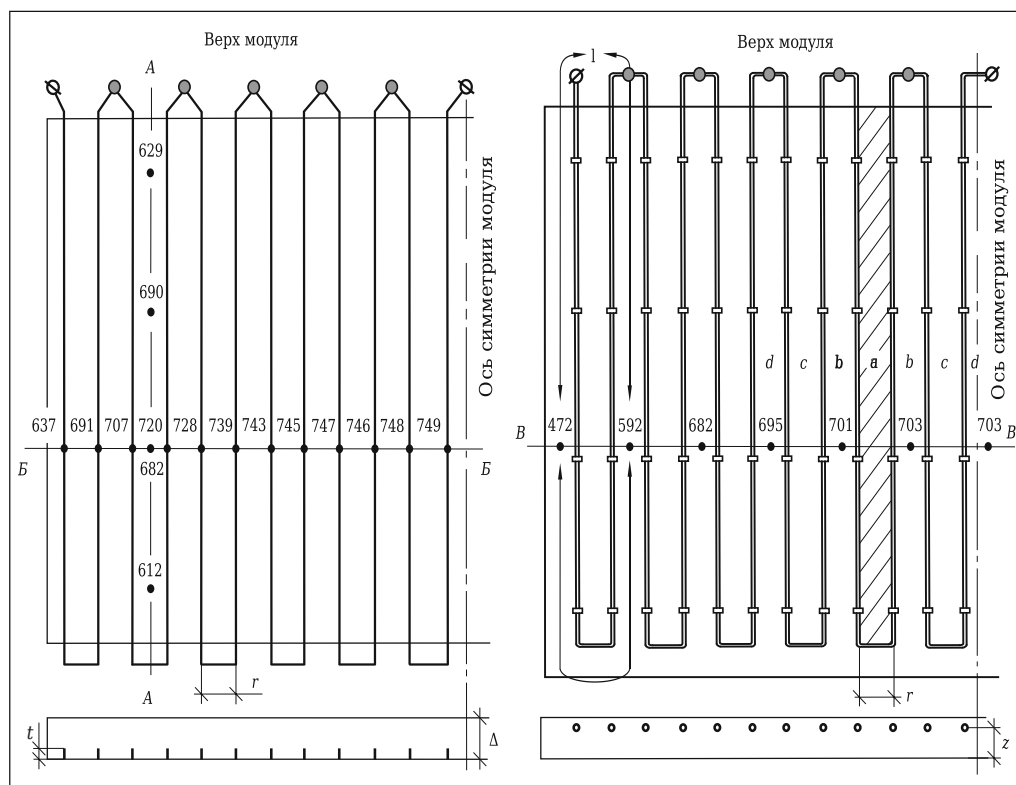


Рис. 1. Линейные нагревательные системы модульно-спусковой (а) и платформенной печей (б)

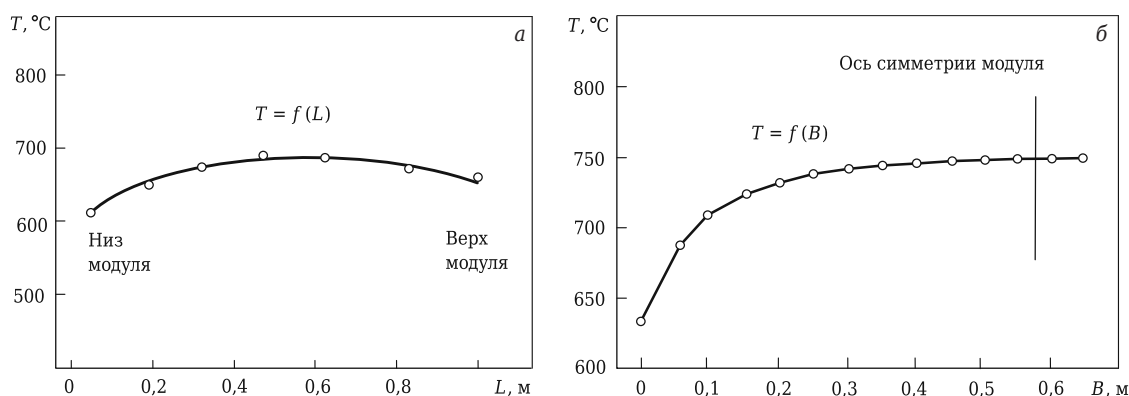


Рис. 2. Изменение температуры поверхности модуля по продольному сечению А–А (а) и распределение температуры нагревателей из ленточного нихрома по сечению Б–Б (б)

ко в сечении А–А, но и в любом из продольных сечений. При этом в пристеночных зонах модулей абсолютные значения температур несколько ниже, чем в сечении А–А. Чтобы устранить продольный градиент температур, достаточно обеспечить движение термообрабатываемому материалу с постоянной скоростью при горизонтальном положении поверхности обжига, что полностью исключает воздушную тягу [4], которая и приводит к данной неоднородности.

Второй недостаток — неравномерное распределение температуры самих нагревателей по ширине модулей. На рис. 2, б показан график зависимости температуры нагревателей по сечению Б–Б (см. рис. 1, а) от пристеночной зоны модуля слева до оси его симметрии, построенный по экспериментальным данным [4]. Распределение температур происходит не только на электронагревателях, но и на поверхности модулей в печах обоих типов. Для примера, на рис. 1, б показано экспериментально полученное распределение температур на поверхности подвижной подовой платформы горизонтальной платформенной печи, а на рис. 3 — график этого распределения по ширине модуля.

Термообрабатываемый материал в процессе обжига в боковых зонах модулей недополучает необходимую тепловую энергию, а это требует увеличения тепловой и электрической мощности печного агрегата и сопровождается их

неоправданными потерями. Печь, работающая в таком режиме, потребляет больше электроэнергии, чем это требовалось бы при отсутствии градиента температур.

УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С ПОДВЕСНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

Платформенная электропечь с подвижным подом и подвесной нагревательной системой для обжига вермикулитовых концентратов показана на рис. 4. Сырье дозатором подается на подовую поверхность 1 из жаростойкой стали, соединенную с платформой 2, установленной на роликах 3 в направляющих полозьях 4 рамы. При запуске регулируемого электродвигателя 5 его эксцентриковый вал 6 через плунжер 7 сжимает-разжимает пружину 8, которая вводит платформу с подом в режим околорезонансных колебаний x на частоте, примерно равной собственной частоте платформы 8–9 Гц.

В такой динамической системе ключевую роль играет специальный нелинейный упругий элемент 9 [6], создающий асимметричные колебания, при которых частицы подвергаемого термообработке материала перемещаются пульсирующими однонаправленными движениями с постоянной средней скоростью, определяемой частотой и амплитудой колебаний платформы [5].

Перемещение потока частиц материала происходит в неоднородном тепловом поле, создаваемом электронагревателями 10, закрепленными фиксаторами 11 и креплениями 12 в виде хомутиков 13 под термокрышкой печи 14.

Процесс обжига вермикулита отличается скоротечностью и в зависимости от размерной группы концентрата занимает от 2,5 до 3,2 с [1].

Линейная нагревательная система рассматриваемой печи состоит из проволочных нагревателей с одинаковыми диаметром и площадью сечения, поэтому отмеченный выше второй не-

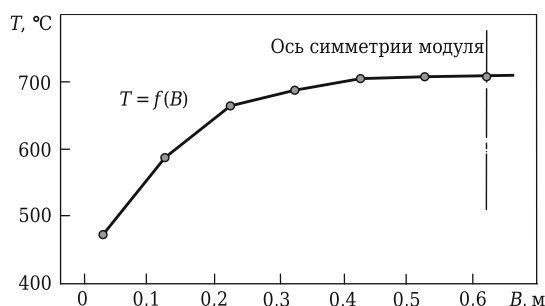


Рис. 3. Экспериментальное распределение температур на поверхности подвижного пода платформенной печи

достаток сохраняется, так как эти нагреватели не обеспечивают равные температуры нагрева вспучиваемого вермикулита или иного термообрабатываемого материала по всей ширине модуля. В центральной части сыпучий материал на любом выделенном фрагменте противня получает значительно больше тепловой энергии от нагревателей, расположенных над ним, и от соседних нагревателей справа и слева от него.

Материал на фрагменте, выделенном в пристеночных зонах, получит меньше теплоты — только от нагревателей, расположенных над ним, и от соседних нагревателей, расположенных только с одной стороны.

Если учесть, что нагреватели, закрепленные по краям термодомышки над пристеночными зонами противня подвижного пода, менее нагреты, чем нагреватели в центральной зоне, то очевидно, что и сыпучему материалу, движущемуся в этих зонах, тепловой энергии достается меньше. Поэтому сыпучий материал (например, вермикулит) в центральной зоне модуля вспучивается качественно и имеет наименьшую насыпную плотность, а вермикулит, выходящий из печи, по его краям остается недовспученным и имеет сравнительно большую плотность. Эту разность насыпных плотностей проверяли в процессе работы опытной платформенной печи, и это доказывает, что в целом вермикулитовый концентрат вспучивается некачественно, т. е. не в полной мере, как он мог бы вспучиваться, если бы температура нагревателей, расположенных по краям противня, была больше, чем температура нагревателей в его центре, а температура всех зон противня была бы одинаковой.

Из-за перегрева перегорание нагревательных элементов в центральной зоне модуля происходит значительно чаще, чем в пристеночных зонах, что снижает надежность печного агрегата. Это является еще одним недостатком линейных подвесных систем и требует перераспределения тепловой мощности.

Влияние соседних электронагревателей на зону нагрева под выбранной парой нагревателей огнеупорной поверхности (заштрихованная зона *a* на рис. 1, б) изучали аналитически и проверяли экспериментально на одной из опытно-промышленных печей [4].

На рис. 5 показано распределение угловых коэффициентов φ , показывающих долю идущих

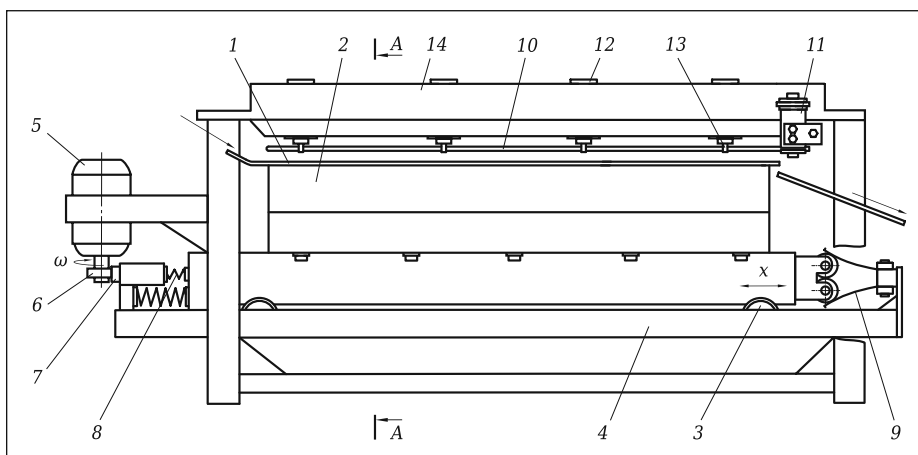


Рис. 4. Устройство однофазной электропечи с подвесной нагревательной системой

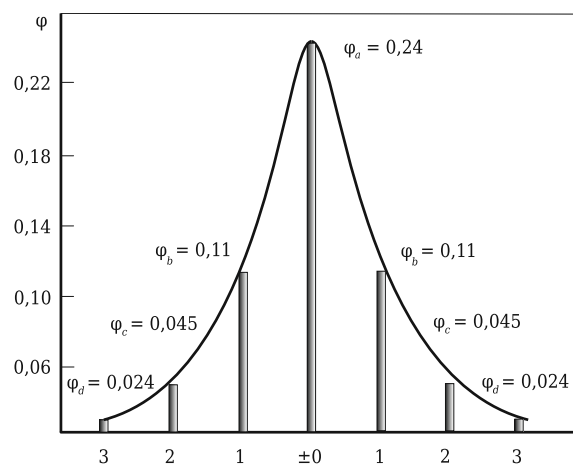


Рис. 5. Распределение угловых коэффициентов

от соседних пар нагревателей потоков тепловых мощностей [7] из зон *b*, *c* и *d* (см. рис. 1, б) в общей сумме тепловой мощности, падающей на поверхность выбранной зоны *a*. Уже в зоне *c* угловой коэффициент равен $0,045$, а отношение угловых коэффициентов $0,24/0,045$ равно $5,3$. В третьей из выбранных зон *d* угловой коэффициент φ_d в десять раз меньше, чем в основной зоне *a* с коэффициентом $\varphi_a = 0,24$. Следовательно, влияние третьей соседней зоны вообще можно не учитывать.

Линейная система должна быть модернизирована путем определения сечений электронагревателей в зависимости от их расположения в модуле печи.

НЕЛИНЕЙНАЯ ПОДВЕСНАЯ НАГРЕВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Чтобы обеспечить максимально однородное распределение температур на поверхности модуля платформенной или модульно-спусковой печи, разработана и запатентована нелинейная нагревательная система [8].

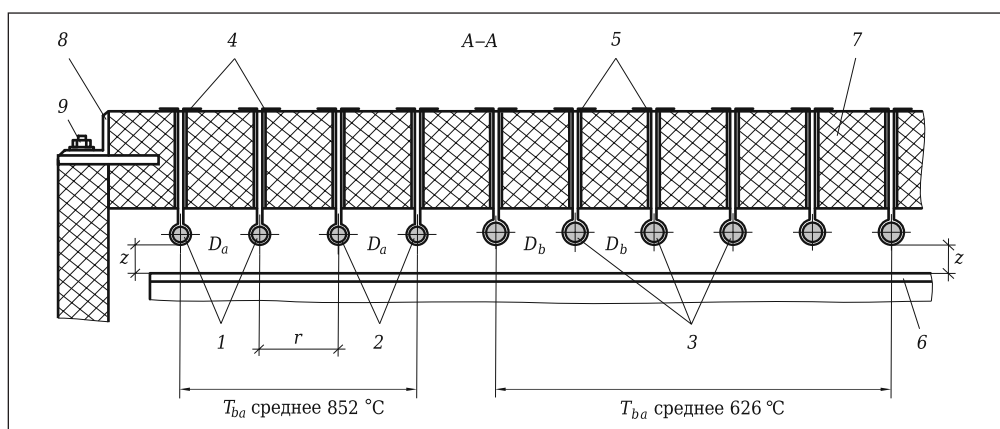


Рис. 6. Подвесная нелинейная нагревательная система (сечение термокрышки A-A по рис. 4)

На рис. 6 показана самая простая подвесная нелинейная нагревательная система (сечение A-A на рис. 4) со ступенчатым переходом нагревателей от одного диаметра к другому. Она содержит нагреватели малого диаметра D_a 1, 2, расположенные в пристеночной зоне, и нагреватели 3 с большим диаметром D_b . При этом крепления 4 и 5 у них имеют разную длину с тем, чтобы зазор z относительно поверхности противня 6 был одинаковым (см. рис. 6). Все нагреватели с помощью своих креплений удерживаются под термокрышкой 7, выполненной из керамовермикулитовой плиты, окантованной уголком 8 и закрепленной резьбовым соединением 9 на термоизолирующей боковой стенке модуля обжига.

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Уравнение баланса электрической мощности для нелинейной нагревательной системы, показанной на рис. 6, можно записать в виде

$$IU = 2nIU_1 + mIU_2, \quad (1)$$

где I — сила тока в цепи нагревателей, А; U — фазное напряжение на краях нагревательной системы, В; U_1 — напряжение на концах проволоочных нагревателей диаметром D_a , В; U_2 — напряжение на концах проволоочных нагревателей диаметром D_b , В; n — количество нагревателей диаметром D_a у одной из пристеночных (краевых) зон; m — общее количество нагревателей диаметром D_b .

Выразим напряжения U_1 и U_2 через удельное сопротивление нихрома ρ , длины l_a и l_b и диаметры проволоочных нагревателей:

$$U_1 = I\rho \frac{4l_a}{\pi D_a^2}, \quad (2)$$

$$U_2 = I\rho \frac{4l_b}{\pi D_b^2}, \quad (3)$$

При подстановке полученных выражений в формулу (1) и ее преобразовании с учетом равенства длин всех нагревателей $l_a = l_b = l$ получим

$$U = \frac{4I\rho l}{\pi} \left(\frac{2n}{D_a^2} + \frac{m}{D_b^2} \right). \quad (4)$$

Решим уравнение (4) относительно силы тока в цепи, А:

$$I = \frac{U\pi}{4\rho l \left(\frac{2n}{D_a^2} + \frac{m}{D_b^2} \right)}. \quad (5)$$

При $n = 2$ и $m = 8$, задавая значение D_b , равное 4 мм (const), и ряд значений D_a , можно построить график зависимости силы тока I в цепи нагревателей от диаметра D_a пристеночных нагревателей малого диаметра (рис. 7). Расчет по формуле (5) производили при $D_b = 0,004$ мм, $l = 0,8$ м и плотности нихрома $\rho = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м [9].

Задавая значения диаметров D_a , например 2,8, 3,0, 3,2 и 3,5 мм при соответствующих значениях I 194, 204, 220 и 237 А, получаем поте-

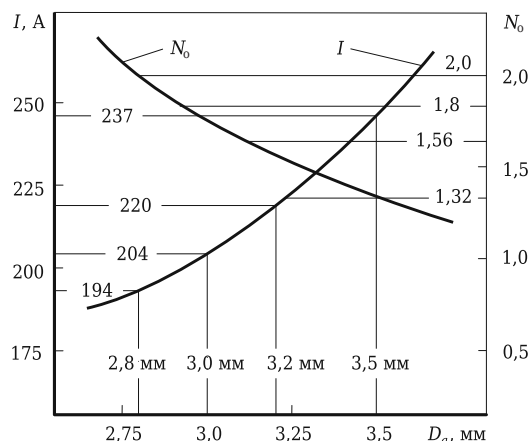


Рис. 7. Изменение силы тока I и относительной мощности N_0 одиночных нагревателей от диаметра D_a

рю напряжения и электрическую мощность на одном нагревателе и на четырех:

– при $D_a = 2,8$ мм на одном $U_1 = 27,7$ В и $N_1 = 5,4$ кВт, на четырех — 110,8 В и 21,4 кВт соответственно;

– при $D_a = 3,0$ мм на одном $U_1 = 25,5$ В и $N_1 = 5,2$ кВт, на четырех — 102,0 В и 20,9 кВт соответственно;

– при $D_a = 3,2$ мм на одном $U_1 = 24,1$ В и $N_1 = 5,3$ кВт, на четырех — 96,4 В и 21,2 кВт соответственно;

– при $D_a = 3,5$ мм на одном $U_1 = 21,7$ В и $N_1 = 5,2$ кВт, на четырех — 86,8 В и 20,8 кВт соответственно.

При разных значениях силы тока I падение напряжения на нагревателях с диаметром $D_b = 0,004$ мм падение напряжения тоже изменится, при этом электрическая мощность на одном и на восьми нагревателях будет равна:

– при $I = 194$ А на одном $U_2 = 13,59$ В и $N_2 = 2,64$ кВт, на восьми — 108,7 В и 21,1 кВт соответственно;

– при $I = 204$ А на одном $U_2 = 14,35$ В и $N_2 = 2,94$ кВт, на восьми — 114,8 В и 23,5 кВт соответственно;

– при $I = 220$ А на одном $U_2 = 15,44$ В и $N_2 = 3,41$ кВт, на восьми — 123,5 В и 27,2 кВт соответственно;

– при $I = 237$ А на одном $U_2 = 16,60$ В и $N_2 = 3,95$ кВт, на восьми — 133,0 В и 31,6 кВт соответственно.

При проверке сумм падения напряжения во всей нагревательной системе ($U_1 + U_2$) получены значения от 217,2–219,9 В (≈ 220 В).

При суммировании мощностей N_1 и N_2 отмечается рост полной электрической мощности, получаемой нагревательной системой печи: 42,7, 45,1, 48,5 и 52,2 кВт.

Возьмем относительные мощности, равные на одиночных нагревателях:

$$N_o = N_1 / N_2, \quad (6)$$

– при $D_a = 2,8$ мм $N_o = N_1 / N_2 = 5,4/2,64 = 2,0$;

– при $D_a = 3,0$ мм $N_o = N_1 / N_2 = 5,2/2,94 = 1,8$;

– при $D_a = 3,2$ мм $N_o = N_1 / N_2 = 5,3/3,41 = 1,56$;

– при $D_a = 3,5$ мм $N_o = N_1 / N_2 = 5,2/3,95 = 1,32$.

Очевидно, что электрическая мощность пристеночных нагревателей с диаметром D_a возрастает при его уменьшении относительно мощности на каждом из восьми центральных нагревателей с диаметром D_b (см. рис. 7). Следовательно, потоки тепловой мощности, излучаемой нагревателями в пристеночных зонах, падающие на поверхность пода печи, теперь будут больше, чем в центральной части модуля, как это было в прототипе, показанном на рис. 4 [1].

Определим температуры накала нагревателей по их электрической мощности, используя формулу [9]:

$$\frac{I \cdot U}{f} = \sigma T^4, \quad (7)$$

где IU — электрическая мощность одного нагревателя малого диаметра N_1 или большого нагревателя N_2 ; f — общая площадь поверхности излучающего тепло нагревателя длиной l , м²; σ — постоянная Стефана – Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) [10]; T — температура на поверхности соответствующих нагревателей, К.

Для дальнейшего анализа и расчетов сделаны допущения:

– фазное напряжение поддерживается постоянным и равным 220 В, кабели и электроаппараты не являются составными частями печи, и потери в них не учитываются;

– активное сопротивление нихрома [9] на три порядка больше индуктивного, и им можно пренебречь так же, как и влиянием электромагнитного поля нагревателей на формирование индуктивного сопротивления соседних нагревателей;

– в диапазоне рабочих температур печи (750–850 °С) доля лучистой энергии нагревателей в видимой части спектра (с длиной волны $\lambda = 0,4$ – $0,76$ мкм) составляет не более 0,04 % [10], поэтому потери лучистой энергии тоже не учитываются;

– нагрузка на сеть от работающей печи является активной, поэтому почти вся электрическая мощность с ошибкой не более 1–1,5 % преобразуется в тепловое излучение;

– скин-эффект, ведущий к протеканию тока в основном в поверхностном слое проводника и некоторому увеличению активного сопротивления, не нарушает примерный баланс, отраженный в формуле (7).

Из формулы (7) выразим температуру нагревателей T_a и T_b , К:

$$T_a = \sqrt[4]{\frac{I \cdot U_1}{\sigma f_a}}, \quad (8)$$

$$T_b = \sqrt[4]{\frac{I \cdot U_2}{\sigma f_b}}, \quad (9)$$

По формуле (8) рассчитаем среднюю температуру T_a по четырем значениям мощности на одном малом нагревателе N_1 (5,4, 5,2, 5,3 и 5,2 кВт), $T_a = 1195$ °С.

Затем по формуле (9) определим температуры T_b на большом нагревателе при разных значениях D_a при соответствующих мощностях N_2 и относительные температуры T_a / T_b :

– при $N_2 = 2,64$ кВт $T_b = 914$ °С, $T_o = 1244/914 = 1,36$;

– при $N_2 = 2,94$ кВт $T_b = 942$ °С, $T_o = 1244/942 = 1,32$;

– при $N_2 = 3,41$ кВт $T_b = 987$ °С, $T_o = 1244/987 = 1,26$;

– при $N_2 = 3,95$ кВт $T_b = 1036$ °С, $T_o = 1244/1036 = 1,2$.

Значение T_o при уменьшении малого диаметра изменяется в меньшей степени, чем относитель-

ная электрическая мощность N_o (см. рис. 7) — от 1,2 до 1,36 (рис. 8). Уменьшение диаметров D_a пристеночных нагревателей относительно нагревателей центральной зоны модуля обжига с диаметром D_b приводит к существенному перераспределению температур на нагревательных поверхностях в пользу относительно холодных пристеночных зон. Таким образом, недостаток прототипа (см. рис. 4) с подвесной системой из одинаковых нагревательных элементов устраняется.

Рассмотрим распределение температур на сплошной поверхности вспученного вермикулита, распределенного без зазоров между частицами по поверхности пода печи. По методике расчета подвесной нагревательной системы [11] определим температуру под малым (D_a) и большим (D_b) нагревателями:

$$T_b = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma f_n} \cdot \left[Q_{э.п} - Q_{р.п} \left(\frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) \right]}, \quad (10)$$

где T_b — температура вермикулита под нагревателем (в одной рабочей камере [11]); f_n — площадь поверхности части пода под одним нагревателем; $Q_{э.п}$ и $Q_{р.п}$ — эффективный и результирующий потоки тепловой мощности на поверхности части пода под нагревателем, определяемые по формулам [11]:

$$Q_{э.п} = 6\varepsilon_n U(1 + \rho_n \varphi_{12})(\varphi_{13} + \varphi_{34} \rho_b)/(1 - \rho_b^2 \varphi_{34}^2), \quad (11)$$

$$Q_{р.п} = \varepsilon_n \sigma T_n^4 f(1 + \rho_n \varphi_{12})(\varphi_{12} - 1) \varphi_{12} + Q_{э.к} \varphi_{31} + Q_{э.п} \varphi_{41}, \quad (12)$$

где ε_n — степень черноты нихрома, $\varepsilon_n \approx 0,96$ [9]; ρ_n — отражательная поверхность нихрома, $\rho_n \approx 0,04$ [9]; ρ_b — отражательная способность вспученного вермикулита, $\rho_b \approx 0,232$ [12]; T_n — температура нагревателя; $\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{31}, \varphi_{34}, \varphi_{41}$ — средние угловые коэффициенты, определяемые по методу натянутых нитей и отражающие часть эффективного излучения одних поверхностей, попадающего на другие [13].

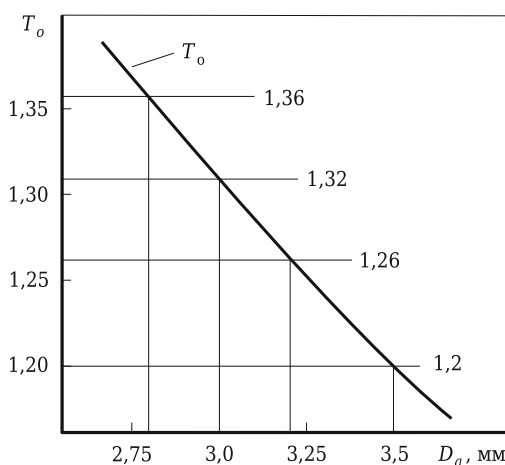


Рис. 8. Зависимость T_o от диаметра малого нагревателя D_a

Средние значения температур вермикулита под малым и большим нагревателями получим с помощью формул (10), (11) и (12) по методике [11] при следующих исходных данных: $D_b = 4$ мм, $l = 0,8$ м, $z = 35$ мм, $r = 42$ мм, при высоте пространства обжига (между подом и термокрышкой) 44 мм, числе малых нагревателей 4 и больших 8, полученных ранее значения напряжений U_1 и U_2 и силы тока $I = 194$ А (при малом диаметре $D_a = 2,8$ мм): под малыми нагревателями с диаметром $D_a = 2,8$ мм $T_{вд} = 852$ °С, под большими нагревателем с диаметром $D_b = 4,0$ мм $T_{вб} = 626$ °С.

Полученные значения температуры вермикулита достаточны для его полноценного вспучивания [11] и распределены так (см. рис. 6), как и требовалось: в центральной части модуля обжига в среднем температуры ниже (≈ 626 °С), чем в пристеночных зонах (≈ 852 °С) примерно на 26 %.

В прототипе (см. рис. 1, б) средние температуры в зонах пристеночной $T_{пр} = (472 + 592)/2 = 532$ и центральной $T_{ц} = (682 + 695 + 701 + 703)/2 = 695$, а их отношение $T_{пр} / T_{ц} = 532/695 = 0,765$ указывает на то, что нагрев вермикулита в прототипе на 23,5 % в пристеночной зоне ниже. Именно это и следовало изменить. При использовании нелинейной нагревательной системы картина меняется на противоположную — холодные пристеночные зоны стали относительно горячими.

Речь идет о средних температурах, так как их рассчитывали без учета влияния соседних нагревателей (см. рис. 5), но это влияние не превышает 10–12 % [14], а следовательно, существенно не изменяет их распределение.

Полученное распределение температур в вермикулитовых зернах, лежащих на поде печи, — это зональная температурная модель, так как тепловая энергия не может распределяться дискретно. Фактически получена сглаженная картина.

Так как электрическая система печного агрегата является управляемой, то при обжиге других сыпучих материалов или вермикулита других размерных групп потребуются изменение электрической мощности и температурного режима.

Главный недостаток электрических модульно-спусковых и платформенных печей с подвесными нагревательными системами — неравномерное тепловое поле в пространстве обжига — устранен, что позволит избежать завышения потребляемой мощности для обеспечения качественной термообработки сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усовершенствована конструкция быстротемпературных подвесных нагревательных систем для модульно-спусковых и платформенных печей для обжига различных сыпучих материалов.

В печах с линейными нагревательными системами, собранными из проволочных нагревателей с равными диаметрами, материал в процессе об-

жиг в пристеночных зонах модулей недополучал достаточную тепловую энергию, что требовало увеличения электрической мощности печи и сопровождалось заметными ее потерями. Печь в таком режиме потребляла больше электроэнергии, чем это требовалось бы при отсутствии распределения температур по ширине модуля. При этом в центральной зоне обжигаемый материал получал больше тепла от своих нагревателей, а материал в пристеночных зонах — меньше. Вермикулит в центральной зоне модуля вспучивался качественно с наименьшей плотностью, а вермикулит, выходящий из печи из пристеночных зон, оставался недоиспеченным и имел сравнительно большую плотность. Кроме того, перегрев центральной зоны увеличивал частоту перегорания нагревателей, что сказывалось на надежности печи.

Применение подвесной нагревательной системы, у которой в пристеночных зонах модуля обжига размещены нагреватели с меньшим диаметром, чем в центральной зоне, изменило это распределение на противоположное. Электриче-

ская мощность одного пристеночного нагревателя превысила мощность центрального в 1,2–1,36 раза в зависимости от соотношения диаметров тонких (диаметром 2,8–3,5 мм) и толстых (диаметром 4 мм) нагревателей. Очевидно, что при этом выросли не только электрическая мощность пристеночных нагревателей, но и потоки тепловой мощности, излучаемой ими, падающие на поверхность пода печи, а это привело к увеличению температуры обрабатываемого материала (в рассмотренном случае — вермикулита). Полученные значения температуры зерен вермикулита в пристеночных зонах модуля обжига превысили температуры вермикулита в центральной зоне на 26 %, при этом они достаточны для качественного вспучивания материала.

Благодаря использованию нелинейной нагревательной системы произошло перераспределение температур на нагреваемых поверхностях в пользу относительно холодных ранее пристеночных зон: тепловая картина изменилась на противоположную — холодные пристеночные зоны стали относительно горячими.

Библиографический список

1. **Нижегородов, А. И.** Испытания новой альтернативной электрической печи для обжига вермикуловых концентратов / А. И. Нижегородов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329, № 4. — С. 142–153.
2. **Nizhegorodov, A. I.** Technological and energy capabilities of electric two-module pouring furnaces with upper heating system / A. I. Nizhegorodov // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 3. — P. 260–266.
3. **Нижегородов, А. И.** Технологические и энергетические возможности электрических двухмодульных спусковых печей с верхней нагревательной системой / А. И. Нижегородов // Новые огнеупоры. — 2020. — № 6. — С. 13–19.
4. **Nizhegorodov, A. I.** Modular-pouring furnace with the local granular media flow rates distributed between thermal zones / A. I. Nizhegorodov, A. N. Gavrilin, B. B. Moyses, G. M. Ismailov // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 6. — P. 631–638.
5. **Нижегородов, А. И.** Модульно-спусковая печь с распределением скоростей локальных потоков сыпучих сред по тепловым зонам / А. И. Нижегородов, А. Н. Гаврилин, Б. Б. Мойзес, Г. М. Исмаилов // Новые огнеупоры. — 2020. — № 12. — С. 16–23.
6. **Нижегородов, А. И.** Технологии и оборудование для переработки вермикулита: оптимальное фракционирование, электрический обжиг, дообогащение / А. И. Нижегородов. — Иркутск: изд. ИрГТУ, 2011. — 172 с.
7. **Бауман, В. А.** Вибрационные машины и процессы в строительстве / В. А. Бауман, И. И. Быховский. — М.: Высшая школа, 1977. — 255 с.
8. **Нижегородов, А. И.** Исследование нелинейной модели подвижной подовой платформы электрической печи для обжига сыпучих минералов / А. И. Нижегородов // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2019. — Т. 330, № 9. — С. 172–183.
9. **Крейт, Ф.** Основы теплопереноса: пер. с англ. / Ф. Крейт, У. Блэк. — М.: Мир, 1983. — 512 с.
10. **Пат. 196953 Российская Федерация.** МПК F 27 В 9/06. Электрическая печь для получения вспученного вермикулита / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель — Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск. — № 2020100364; заявл. 13.01.20; опубл. 23.03.2020, Бюл. № 9.
11. **Кутателадзе, С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие / С. С. Кутателадзе. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 367 с.
12. **Кошкин, Н. И.** Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. — М.: Изд-во физико-математической литературы, 1972. — 256 с.
13. **Nizhegorodov, A. I.** Modeling the transfer of radiant energy to a bulk medium in electric furnaces with the upper position of radiating element / A. I. Nizhegorodov // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 1. — P. 25–30.
14. **Нижегородов, А. И.** Моделирование переноса лучистой энергии на сыпучую среду в электропечах с верхним положением излучающих элементов / А. И. Нижегородов // Новые огнеупоры. — 2020. — № 2. — С. 10–14.
15. **Zvezdin, A. V.** Analytical model of absorption-reflection properties of vermiculite under thermal radiation conditions / A. V. Zvezdin, T. B. Bryanskikh, A. I. Nizhegorodov // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 19–24.
16. **Звездин, А. В.** Аналитическая модель поглощательно-отражательной способности вермикулита в условиях теплового излучения / А. В. Звездин, Т. Б. Брянских, А. И. Нижегородов // Новые огнеупоры. — 2017. — № 1. — С. 15–20.
17. **Телегин, А. С.** Теплоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. — 455 с.
18. **Nizhegorodov, A. I.** New factors of reliability of electric furnaces for vermiculite firing with mobile base plates / A. I. Nizhegorodov // Studies in Systems, Decision and Control. — 2021. — Vol. 351. — P. 125–138. ■

Получено 28.05.21

© А. И. Нижегородов, 2021 г.