

Д. Т. Н. А. И. Нижегородов<sup>1</sup> (✉), к. т. н. А. Н. Гаврилин<sup>2</sup>, к. т. н. Б. Б. Мойзес<sup>2</sup>,  
к. т. н. Г. М. Исмаилов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Томский национальный исследовательский политехнический университет», г. Томск, Россия

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Томский государственный педагогический университет», г. Томск, Россия

УДК 666.7:66.041.3-65

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЕННОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ С НАГРЕВАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, РАЗМЕЩЕННЫМИ ПОД ПОДОВОЙ ПЛИТОЙ

Проведен сравнительный анализ энергоэффективности платформенных электрических печей с подвижной подовой плитой и различными нагревательными системами: с верхним нагревательным узлом, расположенным над подом, и с нижним — размещенным под подом. В экспериментальных исследованиях на опытной установке электрической печи с нагревательной системой, расположенной под подовой плитой платформы, использовали вермикулитовый концентрат (производства Китая) с низкой степенью природной гидратированности. Полученный показатель удельной энергоемкости обжига, равный  $168 \text{ мДж}/\text{м}^3$ , может быть улучшен путем приближения нагревателей к нижней поверхности подовой плиты на 4–5 мм, существенного уменьшения рабочего пространства под подом и сокращения тепловых потерь. Кроме того, применение проволочных нагревателей вместо полосовых за счет меньшего отношения площади поверхности к площади сечения позволяет снизить потребление электроэнергии и энергоемкость обжига на 44 %, т. е. довести удельную энергоемкость до  $95 \text{ мДж}/\text{м}^3$ . Размещение проволочных нагревателей под подовой плитой позволяет устраниć застrevание крупных зерен вспучивающегося вермикулита в пространстве обжига и полностью устраниć перегорание нагревателей — это важнейший фактор повышения надежности таких печных агрегатов.

**Ключевые слова:** платформенная печь, подвижная подовая плита, термообработка сыпучих материалов, верхняя нагревательная система, нагревательная система, размещенная под подовой плитой, удельная энергоемкость обжига.

## ВВЕДЕНИЕ

**Т**ехнология обжига вермикулита, сунгулита-вермикулитовых конгломератов и иных сыпучих материалов, способных радикально изменять свои свойства в процессе их термоактивации [1], отработаны в уже известных электрических модульно-спусковых печах [2, 3]. Эта технология может быть реализована и в платформенных печах с подвижной подовой плитой [4], энергоэффективность которых выше.

Экспериментально опробованы две разновидности нагревательных систем — с верхним расположением нагревательных элементов (над подовой плитой) и нижним расположением (под подовой плитой), что позволило выявить все их

недостатки и достоинства. Применение нагревательной системы с расположением электронагревателей под подом является новой разработкой [5].

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование основных показателей эффективности работы платформенной печи с подвижной подовой плитой с нижним расположением нагревателей (под подом) и сравнительной оценкой энергоэффективности двух видов нагревательных систем.

## ПЛАТФОРМЕННЫЕ ПЕЧИ С НИЖНИМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

На рис. 1 показан фрагмент модуля обжига платформенной печи с верхним расположением электронагревателей. Особенность конструкции таких печей состоит в размещении нагревательных элементов, выполненных из полосового (ленточного) никрома, над поверхностью подовой плиты, закрепленной на подвижной платформе.



А. И. Нижегородов  
E-mail: nastromo\_irkutsk@mail.ru

По направляющей раме 1, установленной под углом 17–20° к горизонту, совершая гармонические колебания, перемещается платформа 2 на роликах 3. С платформой жестко связана подовая плита 4, по поверхности которой движется вспучивающийся вермикулит, поступающий в виде слюдяных пластинок из подающего лотка 5. Над плитой в зазоре  $z$  между ней и термокрышкой 6 расположены электрические нагревательные элементы 7, закрепленные на специальных головках 8 и установленные на ребро. Благодаря такой установке консоли нагревателей практически не провисают даже при 750–800 °C, поэтому зазор между ними и подовой плитой сохраняется. Однако такая нагревательная система требует существенно большего зазора  $z$ , определяющего объем пространства обжига, образованного подовой плитой, термокрышкой и боковыми стенками слева и справа. Рама 9 неподвижна и составляет остав печи. Чтобы минимизировать потери тепла в нижнем направлении, подовая плита 4 утеплена листовым термоизоляционным материалом 10, зафиксированным на ней креплениями 11.

На рис. 2 показана фотография экспериментальной установки (вид со стороны крепежных головок 1) с нагревательным узлом в виде комплекта полосовых нагревателей 4, размещенным над поверхностью подовой плиты 3, где хорошо видно, что подовая плита расположена под нагревательными элементами.

Не только большой зазор  $z$ , определяющий объем пространства обжига, а следовательно, и большие потери лучистой энергии нагревателей, является недостатком данной конструкции. При проведении экспериментов на данной установке было замечено, что крупные зерна вспучивающегося вермикулита своими щелевидными порами регулярно насаживались на тонкие полоски нагревателей (сечение полосового никрома H20X80 — 1×8 мм), застревали и, несмотря на колебания платформы, образовывали заторы. Так как вермикулит в платформенных печах движется сплошным потоком без зазоров между зернами [6], то происходил локальный перегрев нагревателя в месте насадки зерна, он перегорал, а это приводило к отказу в работе.

Кроме того, изоляция подовой плиты сплошным слоем вермикулита, который сам является термоизолирующим материалом, не позволяла ей нагреваться настолько, чтобы отраженное плитой излучение снизу поддерживало процессы дегидратации и структурообразования в обжигаемом материале. Подовая плита постепенно остывала, и процесс насыщения вермикулита тепловой энергией в основном обеспечивался лучистыми потоками от нагревателей.

Тем не менее в экспериментальном исследовании были достигнуты хорошие значения энергоемкости процесса вспучивания — примерно 81,6 мДж/м<sup>3</sup> [6].

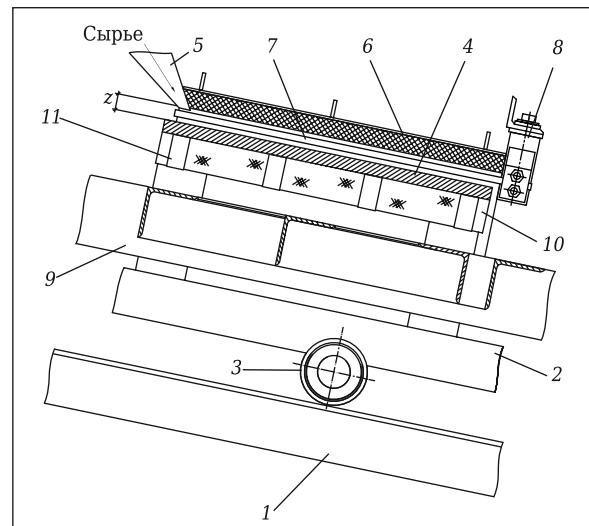


Рис. 1. Модуль обжига электропечи с верхним расположением полосовых нагревателей

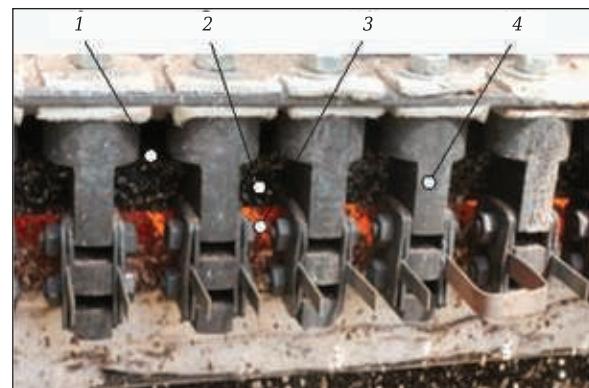
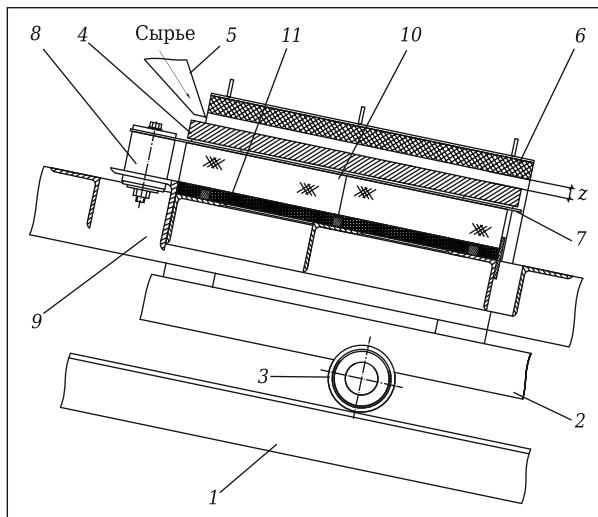


Рис. 2. Вид на торцовую часть пространства обжига со стороны крепежных головок: 1 — крепежная головка; 2 — торец подовой плиты; 3 — поверхность подовой плиты; 4 — нагревательный элемент

## ПЛАТФОРМЕННЫЕ ПЕЧИ С РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ПОД ПОДОВОЙ ПЛИТОЙ

Во-первых, установка нагревательных элементов под подовой плитой платформы позволяет значительно снизить объем пространства обжига за счет уменьшения зазора  $z$  (рис. 3), чтобы сократить потери тепловой энергии. Во-вторых, здесь вспучивающиеся вермикулитовые зерна не контактируют с нагревателями, как в рассмотренном выше печном агрегате, и движутся по поверхности нагретой подовой плиты, поглощая тепловую энергию от самой плиты в виде падающих потоков лучистой энергии, кондукции теплоты и конвекции от горячего воздуха, поднимающегося с поверхности плиты.

Измененный модуль обжига конструктивно мало отличается (см. рис. 3): его элементы 1–9



**Рис. 3.** Модуль обжига электропечи с нижним расположением проволочных нагревателей под подовой плитой

те же, что и на рис. 1, но проволочные нагреватели 7 уложены под подовой плитой 4 на поверхности огнеупорного кирпича 10, размещенного над слоем теплоизолирующего материала 11. За счет переноса нагревателей зазор  $z$  был уменьшен от 28–30 до 12–15 мм так, чтобы могли свободно проходить только наиболее крупные вспученные зерна.

На рис. 4 показана фотография экспериментальной установки с измененной нагревательной системой.

В экспериментальной установке под подом были установлены нагреватели из полосового никрома, чтобы иметь возможность использовать уже имеющиеся крепежные головки.

Управление электрической мощностью и мощностью теплового излучения осуществляли с помощью тиристорного регулятора ТРМ-3-125. Регулятором устанавливали ток уставки,  $A$ , а действующее значения силы тока  $I$ ,  $A$ , и линей-

ного напряжения  $U$ ,  $V$ , в цепи нагревательной системы, определяли специальным прибором Sonel PQM-701. Так как установку подключали к одной фазе (две другие для исключения перекоса соединения с балластными сопротивлениями) и для сети она являлась активной нагрузкой, то электрическую (потребляемую) мощность рассчитывали по формуле

$$N = I \cdot U. \quad (1)$$

При испытаниях первого варианта с верхним расположением нагревательного узла использовали вермикулитовый концентрат Medium (Кокшаровское месторождение Приморского края) с крупностью основной фракции  $(5,0 \pm 2,0)$  мм [7]. В экспериментах на установке с измененной конструкцией и нижним расположением нагревателей под подом использовали вермикулитовый концентрат китайского производства с крупностью основной фракции  $(4,0 \pm 1,0)$  мм, но с меньшей способностью к вспучиванию. Характеристики данного сырья приведены ниже:

Основная фракция, мм.....	$4,0 \pm 1,0$
Массовая доля основной фракции, %.....	98–96
Содержание вермикулита, %, не менее.....	90
Объемный вес концентрата до обжига, кг/м <sup>3</sup>	1100–1000
Влажность, %, не более.....	5–4
Насыпная плотность вермикулита после обжига, кг/м <sup>3</sup> .....	140–130

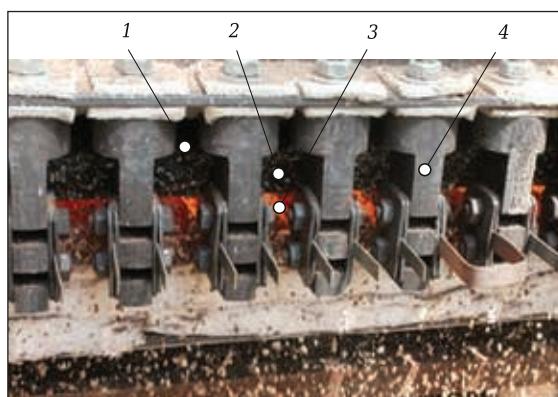
Производительность определяли измерением выходящего за 60 с объема вспученного вермикулита с помощью мерного сосуда. Использовали электронные лабораторные весы CAS MWP-600.

Измерение температуры на поверхностях подовой плиты проводили термопарой пирометра DT-8835 с точностью  $\pm 1,5\%$ .

Из-за конструктивных изменений подовой платформы экспериментальной установки немного изменились параметры ее колебаний, что привело к незначительному увеличению среднего времени движения частиц вспучивающегося вермикулита (равного времени обжига  $t_o$ ) до 3,7 с (в первом варианте  $t_o = 3,31$  с). Длина пути частицы по платформе оставалась прежней (0,38 м).

Задачи эксперимента состояли в установлении зависимостей:

- изменения температур поверхностей подовой плиты сверху и снизу в ее центральной части с течением времени;
- изменения температур нагрева вспученного вермикулита на выходе из центральной части подовой плиты во времени;
- изменения плотности вспученного вермикулита в течение прогрева экспериментального модуля обжига для установления ее предельно минимального значения для данного концентрата.



**Рис. 4.** Вид на торцевую часть пространства обжига модуля с расположением нагревателей под подовой плитой: 1 — поверхность подовой плиты; 2 — торец подовой плиты; 3 — нагревательный элемент; 4 — крепежная головка

Кроме того, в процессе экспериментов определяли производительность экспериментальной установки. В таблице приведены значения температур поверхностей подовой плиты и вермикулита, его насыпной плотности, времени измерений и других параметров.

Потребляемая электрическая мощность установки 27,61 кВт рассчитана по формуле (1) и дана с учетом мощности привода дозатора (0,75 кВт).

В процессе эксперимента уставка по току (113 А) не изменялась, управление процессом обжига не проводилось. При этом действующие значения тока и напряжения, определяемые прибором Sonel PQM-701, оставались на всем протяжении эксперимента неизменными.

Разность температур  $\Delta T$  на поверхностях подовой плиты снизу и сверху в процессе разогрева все время возрастает от 48 °C через 11 мин после запуска до 143 °C при 57 мин работы экспериментальной установки. Это непостоянство указывает на то, что, несмотря на очень низкое термическое сопротивление стали, подводимая от нагревателей к нижней поверхности пода тепловая мощность не сбалансирована с мощностью теплоусвоения потоком вспучивающегося вермикулита, движущимся по верхней поверхности плиты. Чтобы сбалансировать их, надо повысить поступление концентрата. Но если значительно увеличить подачу сырья, то образуется двухслойный вермикулитовый поток, мощность теплоусвоения заметно возрастет и  $\Delta T$  уменьшится. Однако зерна верхнего слоя из-за их изоляции зернами нижнего слоя останутся недовспученными, а это недопустимо. Нарастание  $\Delta T$  будет приводить к усилению механических напряжений в подовой плите и ее прогибу: горячий (нижний) слой вытянется больше, чем относительно холодный верхний слой.

Разность температуры верхней поверхности пода и температуры вермикулита на выходе также возрастает от 14 °C на 26-й мин до 85

°C на 57-й, вермикулит к этому моменту насыщен тепловой энергией и больше ее не усваивает. Это подтверждается тем, что на 57-й мин изменение насыпной плотности вермикулита прекращается, достигнув предельно минимального для данного концентрата значения в 131 кг/м<sup>3</sup>.

К моменту достижения предельно минимальной плотности вермикулита 131 кг/м<sup>3</sup> разность между средней температурой подовой плиты и температурой вермикулита становится постоянной (рис. 5, кривые 1 и 2). Это означает, что дальнейший нагрев подовой плиты уже не приведет к усилению дегидратации материала и получению более легкого продукта. При этой плотности была достигнута максимальная производительность экспериментальной установки: за 60 с выход вспученного вермикулита составил 9,8 л, что соответствует производительности 0,59 м<sup>3</sup>/ч.

Производительность  $P_V$ , м<sup>3</sup>/ч, определяли по формуле:

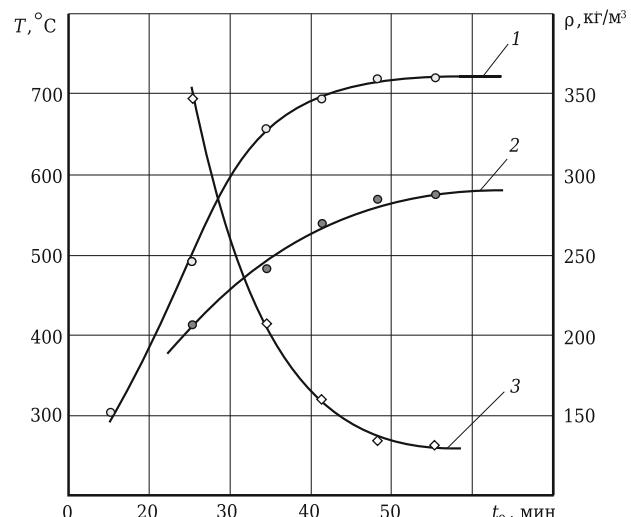


Рис. 5. Изменение средней температуры подовой плиты (1), температуры вермикулита (2) и его насыпной плотности (3) во времени

#### Основные параметры процесса обжига

Параметр*	Время с момента начала нагрева модуля обжига, с						
	11	15	26	34	41	48	57
Средняя по трем измерениям температура плиты, °C:							
сверху	178	286	437	621	640	656	659
снизу	226	324	553	691	753	773	802
Средняя температура плиты, °C	202	305	495	656	697	716	729
Средняя по трем измерениям температура вермикулита, °C	-	-	423	480	545	542	574
Насыпная плотность вспученного вермикулита, кг/м <sup>3</sup>	-	-	356	211	159	134	131
Выход вспученного вермикулита за 1 мин, л	-	-	4,2	6,0	8,2	9,5	9,8
Производительность установки, м <sup>3</sup> /ч	-	-	0,25	0,36	0,49	0,57	0,59

\* Ток «уставки» по тиристорному регулятору 113 А, сила тока 119 А (действующее значение), линейное напряжение 232 В (действующее значение), потребляемая модулем мощность 27,61 кВт.

$$\Pi_V = \frac{V}{1000} \cdot 60, \quad (2)$$

где  $V$  — выход всученного вермикулита за одну минуту, л/мин.

При наступлении предельно низкой для данного концентрата плотности, рост производительности прекращается (рис. 6).

Удельную энергоемкость обжига  $e_{уд}$ , Дж, рассчитывали по формуле

$$e_{уд} = \frac{N}{\Pi_V} 3600 = \frac{27610}{0,59} 3600 = 168467796, \quad (3)$$

что составляет 168 мДж/м<sup>3</sup> и в 2,06 раза больше, чем при обжиге кокшаровского вермикулита в экспериментальной установке с верхним расположением нагревательной системы.

Прямое сравнение результатов некорректно, так как сырье, подвергавшееся обжигу, значительно отличается по своим природным качествам: степени гидратированности, крупности и способности всучиваться. Кроме того, в экспериментальной установке под подом были размещены не проволочные нагреватели (см. рис. 3), а нагреватели из того же полосового никрома, установленные на ребро, чтобы использовать имеющиеся крепежные головки. А это ухудшало условия переноса теплового излучения на плиту из-за большей удаленности. Учитывая эти обстоятельства, полученный результат (168 мДж/м<sup>3</sup>) можно считать удовлетворительным.

Измененная конструкция платформенной электропечи с нагревателями под подовой плитой полностью устраняет недостатки предшествующей конструкции, а именно: образование заторов при движении всучивающегося вермикулита в пространстве обжига, отказы, вызванные перегоранием нагревателей из-за указанных заторов и их перегрева, и термоизоляцию подовой плиты самим вермикулитом.

Для оптимизации нагревательной системы печи с нагревателями под подовой плитой

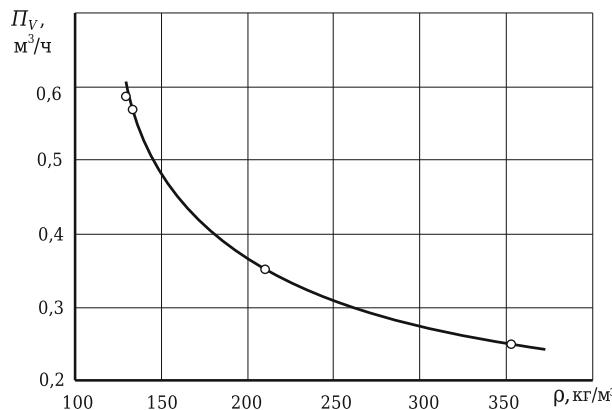


Рис. 6. Зависимость часовой производительности экспериментальной установки от насыпной плотности всучиваемого вермикулита

внесены изменения в конструкцию нагревательной системы. Кроме того, что при переносе нагревателей зазор  $z$  (см. рис. 1 и 3) уменьшается от 28–30 до 12–15 мм, мы можем заменить полосовые нагреватели на проволочные и тем самым уменьшить зазор между нижней частью подовой плиты 4 и огнеупорным кирпичом 10 (см. рис. 3). Уменьшение пространства обжига и рабочего пространства под подовой плитой — это два главных фактора в измененной конструкции, обеспечивающие значительное повышение плотности тепловой мощности в единице объема. Например, при силе тока  $I = 119$  А и напряжении  $U = 232$  В, если пренебречь потерями энергии, плотность мощности в первом варианте печи с нагревателями над подом будет определяться отношением  $N_1 / V_1 = 119 \cdot 232 / (0,03 \cdot 0,38) = 2,4 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup>. При той же мощности 27,608 кВт, плотность мощности в измененной конструкции печи будет в 2,5 раза больше и равна  $N_2 / V_2 = 119 \cdot 232 / (0,012 \cdot 0,38) = 6,01 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup>.

Но замена полосовых нагревателей на проволочные (см. рис. 3) дает и другие преимущества. Если провести эту замену при сохранении той же площади сечения никрома 8 мм<sup>2</sup>, то диаметр  $D$  сечения проволочных нагревателей будет равен 3,2 мм.

Периметр сечения полосового нагревателя при площади сечения 8 мм<sup>2</sup> равен 18 мм, а у проволочного с той же площадью он равен  $\pi D$ , в данном случае 10,048 мм, а это почти в два раза меньше. Сила тока и, следовательно, электрическая мощность будут равными при одинаковых площадях сечений, а вот температура излучающей поверхности на проволочных нагревателях значительно возрастет. Учитывая, что сами нагреватели теперь можно будет приблизить к нижней поверхности подовой плиты на 4–5 мм, можно ожидать синергетического эффекта.

Рассмотрим формулу, определяющую температуру  $T$ , К, поверхности нагревательных элементов любого сечения:

$$T = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma f} \cdot \left[ Q_3 - Q_p \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \right]}, \quad (4)$$

где  $f$  — суммарная площадь поверхности всех нагревателей системы, м<sup>2</sup>;  $\sigma$  — постоянная Стефана – Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $Q_3$  и  $Q_p$  — эффективный и результирующий потоки излучения, Вт, определяемые с учетом угловых коэффициентов, определяющих взаимное положение (в том числе расстояние) излучающих, отражающих и поглощающих поверхностей;  $\varepsilon$  — степень черноты поверхностей излучающих тел [8].

Для оценки энергоэффективности проволочных нагревателей нужно сравнить температуру их нагрева с температурой полосовых нагревателей с одинаковой площадью сечения. Исходные

данные: количество нагревателей в системе одного модуля  $n = 12$  шт., высота и толщина плоского нагревателя  $t = 0,008$  м и  $s = 0,001$  м соответственно, длина половины нагревателя  $l = 0,38$  м, участок половины нагревателя в зоне его крепления к головке  $l_0 = 0,02$  м, консольный участок нагревателя  $r = 0,038$  м, шаг установки нагревательных полос  $r = 0,038$  м (данные по параметрам и размерам экспериментальной установки).

Площади поверхностей полосовых и проволочных нагревателей определяли по формулам соответственно:

$$f_{\pi} = n(2l + 2l_0 + r) \cdot 2(t + s). \quad (5)$$

$$f_{\text{пр}} = \pi D \cdot n(2l + 2l_0 + r), \quad (6)$$

где  $D$  — диаметр сечения, равный 3,2 мм.

Вернемся к формуле (4). Эффективное излучение  $Q_{\text{э}}$  определяется суммой собственного и отраженного излучений [8], а результирующее  $Q_{\text{р}}$  — разностью между собственным и поглощенным. Изменение положения нагревателей относительно потока вспучивающегося вермикулита не изменит отражательной и поглощательной способностей никрома, поэтому тепловые потоки  $Q_{\text{э}}$  и  $Q_{\text{р}}$  могут незначительно измениться лишь за счет изменения угловых коэффициентов [8]. Если сделать допущение о их неизменности

$$\left[ Q_{\text{э}} - Q_{\text{р}} \left( \frac{1 - \varepsilon_{\text{н}}}{\varepsilon_{\text{н}}} \right) \right] = \text{const}, \quad (7)$$

то только из-за уменьшения суммарной площади поверхности проволочных нагревателей их температура должна возрасти. Подставляя в формулу (4) выражение (6), а затем выражение (5) и соотнося их с учетом выше приведенных исходных данных, получим  $T_{\text{н}}/T_{\text{пр}} = 1,158$ .

Следовательно, можно ожидать, что переход к нагревательной системе из проволочных электронагревателей при той же потребляемой мощности приведет к увеличению температуры на их поверхностях на 15,8 %. Но повышение температуры нагревателей не требуется, поэтому рассчитаем возможное снижение потребляемой мощности.

Используем закон теплового излучения [9], приведенный к форме [10] для однофазного потребителя электроэнергии:

$$\frac{IU}{f} = \sigma T^4, \quad (8)$$

где  $I$  и  $U$  — действующие значения силы тока и линейного напряжения в нагревательной системе. Обозначим выражением  $IU = N$  потребляемую электрическую мощность. Тогда выражение (8) можно записать в виде

$$\sqrt[4]{\frac{N_{\text{пр}}}{f_{\text{пр}}}} = T = \sqrt[4]{\frac{N_{\pi}}{f_{\pi}}}, \quad (9)$$

что после преобразований и подстановки исходных данных позволяет определить ожидаемое снижение потребляемой мощности:

$$N_{\text{пр}} = \frac{f_{\text{пр}} N_{\pi}}{f_{\pi}} = 0,56. \quad (10)$$

Полученный результат показывает перспективу экономии электроэнергии до 44 %. На 44 % снизится и удельная энергоемкость процесса обжига. Так, при обжиге кокшаровского вермикулита ( $e_{\text{уд}} \sim 81,6$  мДж/м<sup>3</sup>) в печи с расположением нагревательной системы из проволочного никрома под подовой плитой можно достигнуть значения  $e_{\text{уд}} 46$  мДж/м<sup>3</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструкторская и экспериментальная работа по совершенствованию платформенной печи с подвижным подом позволила выявить ее недостатки и выработать наиболее рациональный вариант.

При испытаниях опытного образца печи с верхним расположением полосовых нагревателей на кокшаровском вермикулите была достигнута удельная энергоемкость  $\sim 81,6$  мДж/м<sup>3</sup>. Но такие недостатки, как большой зазор, определяющий объем пространства обжига под термокрышкой, и эффект насаживания вспученных крупных зерен на полосы нагревателей, подтолкнули к опробованию другой нагревательной системы из проволочного никрома, размещенного под подовой плитой. Это изменение позволило не только устранить контакт нагревателей со средой, но и дополнительно снизить энергоемкость.

Размещение проволочных нагревателей под подовой плитой позволяет устраниć застравление крупных зерен, приблизить нагреватели к самой плите и уменьшить объем пространства обжига. А за счет уменьшения отношения площади поверхности к площади сечения (по сравнению с полосовыми нагревателями) оказалось возможным снижение потребления электроэнергии и энергоемкости обжига примерно на 44 % ( $e_{\text{уд}}$  от 81,6 до 46 мДж/м<sup>3</sup>).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кременецкая, И. П. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентино содержащих вскрытых пород / И. П. Кременецкая, О. П. Корытная, Т. Н. Васильева // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2008. — № 4. — С. 33–40.
2. Нижегородов, А. И. Теоретическое обоснование использования новых модификаций электрических печей для обжига вермикулита / А. И. Нижегородов // Строительные материалы. — 2009. — № 5. — С. 94–96.
3. Nizhegorodov, A. I. Electric modular-trigger kiln with an energy recuperation system for firing vermiculite concentrates / A. I. Nizhegorodov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 470–475. doi 10.1007/s11148-016-9871-3.

- Нижегородов, А. И.** Электрические модульно-спусковые печи с системой рекуперации энергии для обжига вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов // Новые огнеупоры. — 2015. — № 10. — С. 22–27.
4. **Пат. 166554 Российская Федерация. МПК F 27 B 9/06.** Электрическая печь с вибрационной подовой платформой / Нижегородов А. И. ; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск. — № 2025155496 ; заявл. 23.12.2015 ; опубл. 27.11.2016, Бюл. № 22.
5. **Пат. 179059 Российская Федерация. МПК F 27 B 9/06.** Электрическая печь для получения вспученного вермикулита из вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И. ; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск. — № 2017118594 ; заявл. 29.05.2017 ; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 12.
6. **Нижегородов, А. И.** Показатели эффективности электрической печи с вибрационной подовой платформой и технологический комплекс на ее основе /
- A. И. Нижегородов, Д. В. Кокоуров // Вестник машиностроения. — 2019. — № 5. — С. 8–13.
7. **Нижегородов, А. И.** Испытания новой альтернативной электрической печи для обжига вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, Т. Б. Брянских, А. Н. Гаврилин [и др.] // Изв. Томского политехн. ун-та. — 2018. — № 4. — С. 142–153.
8. **Телегин, А. С.** Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. — М. : ИКЦ Академкнига, 2002. — 455 с.
9. **Кошкин, Н. И.** Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. — М. : Физматгиз, 1972. — 256 с.
10. **Нижегородов, А. И.** Энергетехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин. — Иркутск : изд-во ИРНИТУ, 2015. — 250 с. ■

Получено 12.06.21

© А. И. Нижегородов, А. Н Гаврилин, Б. Б. Мойзес, Г. М. Исмаилов, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



## CERAMICS IN EUROPE 2022

Kraków 10<sup>th</sup>–14<sup>th</sup> July 2022

ICC9

XVII  
ECerS  
CONFERENCE  
2022

ELECTRO  
CERAMICS  
XVIII CONFERENCE

## KERAMIKA W EUROPĘ 2022

XVII конференция и выставка ECerS (ECerS XVII),

9-я Международная керамическая конференция (ICC9)

и конференция Electroceramics XVIII

запланированы как совместная конференция  
в г. Кракове, Польша, с 10 по 14 июля 2022 г.

Для получения дополнительной информации  
посетите веб-сайт конференции:

[www.ceramicsineurope2022.org](http://www.ceramicsineurope2022.org)

