

Д. т. н. А. И. Нижегородов¹ (✉), к. т. н. А. Н. Гаврилин², к. т. н. Б. Б. Мойзес²,
к. т. н. Г. М. Исмаилов³

¹ ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия

³ ФГБОУ ВО «Томский государственный педагогический университет», г. Томск, Россия

УДК 62-868; 67-05; 66-041

МОДУЛЬНО-СПУСКОВАЯ ПЕЧЬ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СКОРОСТЕЙ ЛОКАЛЬНЫХ ПОТОКОВ СЫПУЧИХ СРЕД ПО ТЕПЛОВЫМ ЗОНАМ

Приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований температурных зон в рабочем пространстве модулей электрической спусковой печи. Выполнено распределение локальных потоков сыпучей среды по этим зонам в зависимости от их нагрева для повышения производительности и уменьшения энергоемкости рабочего процесса. Модернизирована модульно-спусковая печь с пластинчатыми ускорителями локальных потоков сыпучей среды, размещенными в ее модулях, к ней адаптирован барабанный дозатор с продольными ступенчато-переменными по глубине пазами на барабане. На основе анализа падающих, эффективных и результирующих потоков в рабочих пространствах модулей методами алгебры лучистых потоков установлены причины формирования неоднородного теплового поля на огнеупорных поверхностях модулей обжига. Проведен анализ экспериментальных данных, подтверждающий выводы аналитического исследования, определена ширина каждой тепловой зоны. На примере вермикулита путем сопоставления поглощаемых им тепловых мощностей определены минимально достаточное время движения его частиц в каждой тепловой зоне и средние локальные скорости движения частиц в указанных зонах. Показан нелинейный характер распределения средних локальных скоростей потоков вермикулита по температурным зонам. Определены локальные производительности и полная производительность печи, равная 0,95 м³/с, которая на 27 % превышает производительность опытно-промышленной печи-аналога при равном потреблении электроэнергии.

Ключевые слова: модульно-спусковая электропечь, температурные зоны, пластинчатый ускоритель, тепловая мощность, средние локальные скорости, локальная производительность.

ВВЕДЕНИЕ

Электрические модульно-спусковые печи характеризуются тем, что движение термообрабатываемых сыпучих сред в них происходит под действием сил тяжести частиц. Поэтому с механической точки зрения они подобны гравитационным спускам, в которых скорость движения компонентов среды определяется углом наклона модулей, силами трения и некоторым незначительным встречным сопротивлением воздуха.

Движение потока сыпучей среды в таких печных агрегатах (вермикулита, сунгулит-вермикулитовых конгломератов, поросиликатов и др.) можно регулировать только управлением подачи сырья дозатором [1], что является

серьезным недостатком. Однако они лишены подвижных узлов и деталей, например подовых платформ [2], колебания которых в условиях высоких температур, запыленности и других неблагоприятных факторов нестабильны, что сказывается на режиме вибротранспортирования частиц среды в тепловом поле нагревателей, производительности, качестве вспучивания (вермикулита), расходе электроэнергии и других характеристиках рабочего процесса.

В самых первых модульно-спусковых электропечах в начале их освоения (2003–2006 гг.) было замечено, что распределение температур на нагревательных элементах и на огнеупорной поверхности модулей из шамотного кирпича, по которой и происходит движение частиц термообрабатываемой среды, является существенно неоднородным. Измерения температур термомпарами в работающих печах на разных участках показали, что в их центральных зонах температура огнеупорного основания достигала 700 °С и



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

выше, а в боковых 430–480 °С. Если термообработке подвергался вермикулит, то на выходе из печи в центральной зоне нижнего модуля готовый продукт был полностью вспученным и имел наименьшую плотность, но был перегретым и частично пережженным, особенно мелкие частицы, а в краевых зонах он недовспучивался, из-за чего приходилось увеличивать температуру нагревателей. Та же закономерность наблюдалась и в печах с подвижным подом [2], и управлять ею до сих пор не представлялось возможным.

Цель работы — исследование температурных зон в рабочем пространстве модульно-спусковых печей для распределения по зонам локальных разноскоростных потоков сыпучих сред и повышения таким путем производительности печей.

ОСНОВНЫЕ ИННОВАЦИИ

Устранение описанного недостатка и исправление связанных с ним характеристик рабочего процесса печного агрегата базируется на двух технических решениях, принципиально не изменяющих конструктивную структуру печи и практически не усложняющих ее.

Первое — это использование пластинчатых ускорителей движения сыпучей среды в рабочем пространстве модулей по зонам распределения температур: в зонах с повышенными температурами нагревателей и огнеупорного основания средние скорости потоков больше, чем в зонах с относительно низкими температурами. Средние локальные скорости определяют время прохождения частиц среды по модулям печи или время их термообработки. Поэтому частицы, например, вермикулита, движущиеся в более горячих зонах за меньшее время получают и поглощают ту же необходимую для полноценного вспучивания тепловую энергию и не подвергнутся пережогу. Теплота в центральных горячих зонах не будет избыточной, а это значит, что энергоэффективность печи возрастет. При переходе от центральных горячих зон к краевым зонам модулей, где температуры ниже, средние скорости локальных потоков частиц также должны быть ниже, а время на теплопоглощение должно быть несколько большим и достаточным для качественного вспучивания.

Второе техническое решение — это измененная конструкция барабана дозатора. Для обеспечения повышенной локальной (по зонам нагрева) производительности барабан выполнен с продольными ступенчато-переменными по глубине пазами на его поверхности, причем наибольшую глубину имеют пазы, находящиеся над центральной пластиной верхнего ускорителя верхнего модуля, то есть над зоной, где частицы среды движутся с максимальной средней локальной скоростью и где подача исходного сырья максимальна.

Чем дальше от центральной зоны расположены пазы барабана дозатора, тем меньше их глубина. Самые крайние пазы имеют такую глубину, которая в барабанах дозаторов печей, не снабженных ускорителями, выдержана по всей поверхности барабана.

УСТРОЙСТВО И РАБОТА МОДУЛЬНО-СПУСКОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Печь содержит барабанный дозатор, по лотку 1 которого материал поступает на пластинчатый ускоритель частиц, закрепленный в верхней части модуля 2. Такие же ускорители установлены и на других модулях 3 и 4. Модули размещены в корпусе 5 под углом 45° к горизонту и содержат нагреватели 6 с крышками из керамовермикулитовых плит 7 (рис. 1–3), окантованными металлом 8. Стержневой нагреватель 6 выполнен в виде змеевика из нихрома и закреплен под крышкой зацепами 9 на серьгах и крепежных головках 10 (см. рис. 1 и 2) на расстоянии a от поверхности крышки. Сами серьги удерживаются в отверстиях 11 плит 7 за счет плоских зацепов 12. Крепежные головки обеспечивают контакт с нагревателем за счет резьбовых соединений 13 (см. рис. 2). Между нагревателями и огнеупорными основаниями модулей имеется зазор z (см. рис. 2), одинаковый по всей длине l . В верхней части каждого модуля установлен

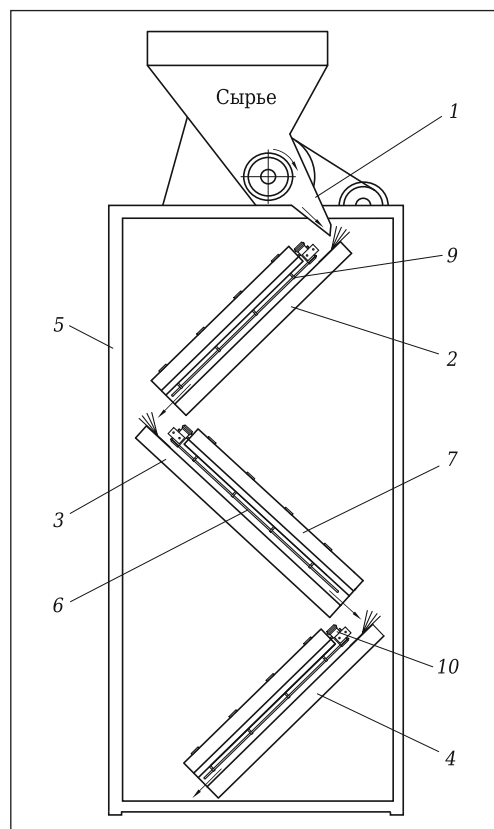


Рис. 1. Модульно-спусковая печь с пластинчатыми ускорителями сыпучей среды

пластинчатый ускоритель (см. рис. 1–3), состоящий из базовой пластины 14 (см. рис. 2), упора 15 с боковыми стенками 16 и набора жестко закрепленных пластин 17, 18 и 19 (см. рис. 2 и 3) с разными углами наклона α_2 , α_3 и α_4 .

Барабан дозатора выполнен с продольными ступенчато-переменными по глубине пазами 20, 21, 22 и 23 (см. рис. 3 и 4), при этом наиболь-

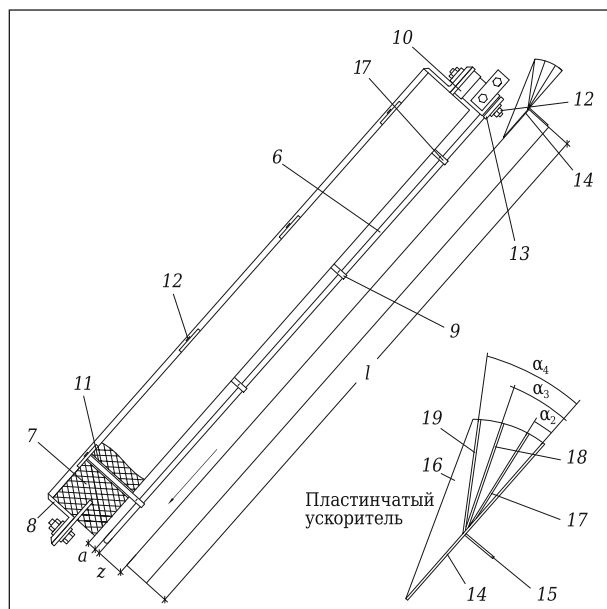


Рис. 2. Модуль (вид сбоку) и пластинчатый ускоритель (увеличено)

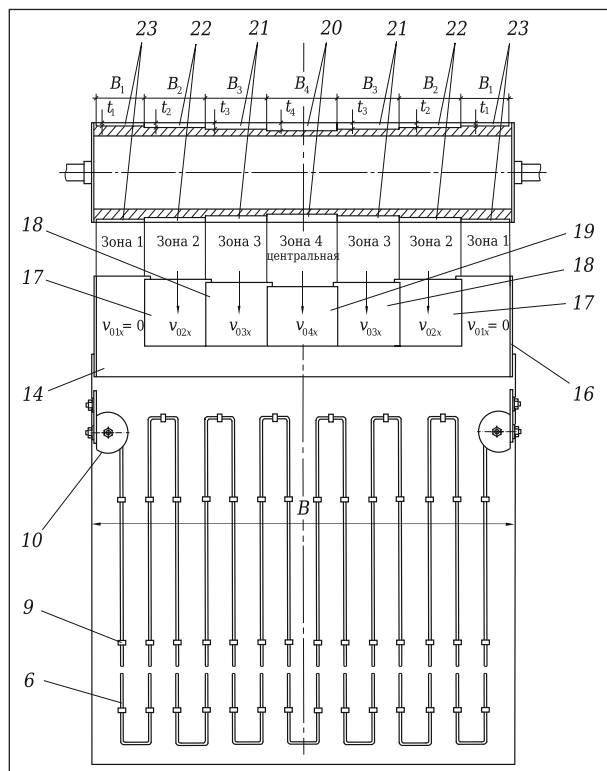


Рис. 3. Электрический нагреватель, огнеупорное основание модуля, пластинчатый ускоритель частиц сыпучей среды и продольный разрез барабана-дозатора

шая глубина t_4 у пазов 20, находящихся над центральной пластиной 19 пластинчатого ускорителя. Соседние пазы барабана 21, находящиеся над пластинами 18, имеют меньшую глубину t_3 . Соседние с ними пазы 22, находящиеся над пластинами 17, имеют еще меньшую глубину t_2 , а самые крайние пазы 23 характеризуются минимальной глубиной t_1 (см. рис. 3 и 4).

Число пластин ускорителя частиц сыпучей среды и соответствующее им количество пазов на барабане может быть другим, в зависимости от общей ширины модуля B . Кроме того, ширина пазов барабана B_1 , B_2 , B_3 , B_4 и соответствующая им ширина пластин также может быть разной в зависимости от общей ширины B и в зависимости от распределения температур по зонам № 1, 2, 3 и т. д.

В разогретой печи сырье, например вермикулитовый концентрат, по лотку дозатора поступает на ускоритель верхнего модуля и далее на его поверхность, по которой движется в тепловом поле нагревателя 6. Частично вспученный в нем вермикулит пересыпается на ускоритель ниже расположенного модуля 3, где также подвергается тепловому воздействию, а затем пересыпается на ускоритель нижнего модуля 4, из которого выходит уже готовый продукт. Продолжительность всего процесса в такой печи при длине модулей 950 мм, как показали измерения на опытно-промышленной печи, составляет примерно 3 с [3].

Частицы, попадающие на пластины 19 (см. рис. 2 и 3), находящиеся в центральной зоне № 4, должны получать наибольшую начальную скорость вдоль огнеупорных поверхностей v_{04x} из-за большего угла наклона α_4 , поэтому средняя локальная в этих зонах модулей скорость их движения должна быть больше, чем была бы, если бы пластинчатые ускорители отсутствовали. Из-за увеличения средней скорости частиц будет увеличена и локальная производительность в центральных зонах № 4, а время прохождения частиц по ним сократится.

В зонах № 3 модулей печи температура ниже, чем в самых нагретых зонах № 4, но суще-

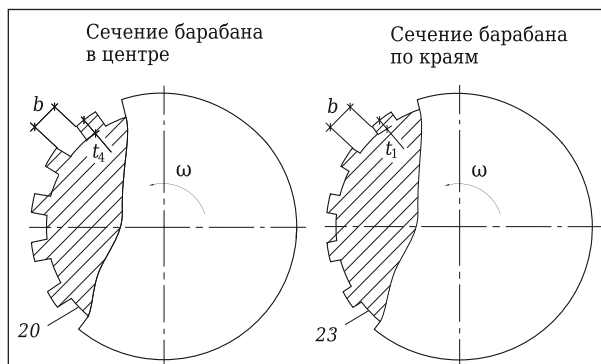


Рис. 4. Сечения барабана-дозатора в центральной части и по краям

ственно больше, чем в зонах № 2 и № 1. Поэтому здесь частицы, попадающие на пластины 18 (см. рис. 3 и 4) должны получать относительно меньшую начальную скорость v_{03x} из-за несколько меньшего угла наклона α_3 . Средняя локальная скорость движения частиц вермикулита по зонам № 3 ниже, чем в зонах № 4, но больше, чем была бы, если бы печь не была оснащена ускорителями. Из-за увеличения средней скорости частиц в зонах № 3 локальная производительность в этих зонах будет пропорциональна средней скорости движения, а время прохождения частиц по ним сократится. И так далее: средние локальные скорости от центра к периферии огнеупорных поверхностей модулей должны становиться все меньше.

Благодаря разному наклону пластин ускорителей можно обеспечить такое распределение средних локальных скоростей по температурным зонам модулей печи, что в более нагретых зонах вермикулит поглотит достаточное количество теплоты за меньшее время, но выйдет из печи качественно вспученным. Если рационально распределить средние локальные скорости движения частиц по зонам, локальная производительность печи должна возрасти, что приведет к повышению ее производительности в целом и уменьшит удельную энергоемкость термообработки материала.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗОН

Потоки падающих и эффективных излучений соответствующих поверхностей определяются по формулам алгебры лучистых потоков [4], Вт:

$$Q_{ni} = \sum_{k=1}^j Q_{\varepsilon k} \varphi_{ki}, \quad (1)$$

$$Q_{\varepsilon i} = \rho_i \sum_{k=1}^j Q_{\varepsilon k} \varphi_{ki} + Q_{ci}, \quad (2)$$

где ρ_i — отражательная способность i -той поверхности; φ_{ki} — средний угловой коэффициент излучения, учитывающий долю эффективного излучения других поверхностей, достигающего

данной поверхности; $Q_{\varepsilon k}$ — эффективный поток с поверхности k , падающий на поверхность i ; Q_{ci} — поток собственного излучения.

Мощность падающего от нагревателей на огнеупорное основание теплового излучения для условной рабочей камеры, расположенной в центральной зоне (камера 0, рис. 5), определяется по выражению, Вт:

$$Q_{п3} = Q_3 \varphi_{13} + Q_{34} \varphi_{43} + 2Q_{\varepsilon 3} \varphi_{с3} + 2Q_{\varepsilon 3B} \varphi_{B3} + 2Q_{\varepsilon 3A} \varphi_{A3}, \quad (3)$$

при этом двойки, входящие в члены равенства означают, что три соседние рабочие камеры с двух сторон (слева и справа) добавляют свою тепловую мощность. Влияние четвертых, пятых и остальных камер не учитывается, так как уже 4-я камера имеет угловой коэффициент почти на два порядка меньше углового коэффициента φ_{A3} .

Для крайней пристеночной камеры 3, расположенной в зоне № 1 (см. рис. 3, 5 и 6), выражение мощности падающего теплового потока (3) изменится, так как в нее тепловое излучение приходит от трех соседних камер только с одной стороны:



Рис. 6. Экспериментальные значения температур на огнеупорной поверхности и стержнях нагревателя среднего модуля опытной печи

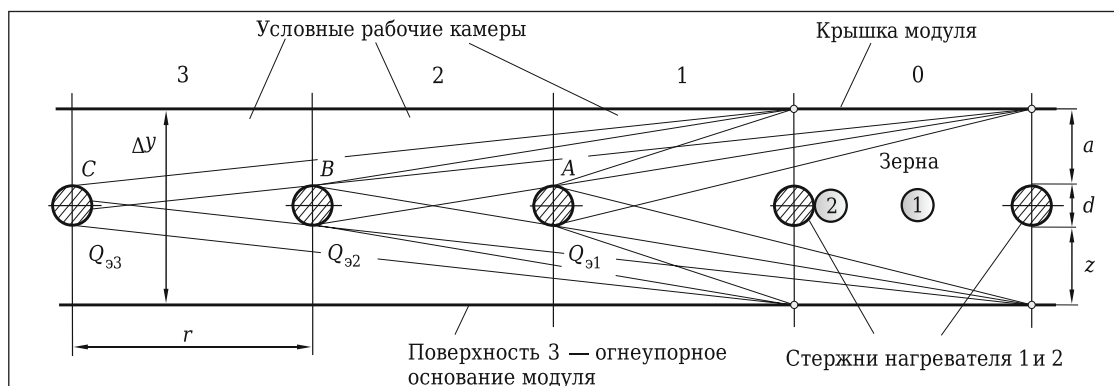


Рис. 5. Схема к расчету угловых коэффициентов лучистых потоков, тепловых мощностей и температур

$$Q_{п3} = Q_{э\phi_{13}} + Q_{э\phi_{43}} + Q_{э\phi_{C3}} + Q_{э\phi_{B3}} + Q_{э\phi_{A3}}. \quad (4)$$

Тогда формулы мощности эффективных потоков с огнеупорных поверхностей 3 (см. рис. 5) будут иметь вид:

– для нулевой камеры, расположенной в центральной зоне модуля:

$$Q_{э3} = 2\rho_3 Q_{э\phi_{13}} + \rho_3 Q_{э\phi_{43}} + 2\rho_3 Q_{э\phi_{C3}} + 2\rho_3 Q_{э\phi_{B3}} + 2\rho_3 Q_{э\phi_{A3}}, \quad (5)$$

где ρ_3 — отражательная способность шамотного кирпича, образующего огнеупорную поверхность модулей печи;

– для пристеночной камеры в зоне № 1:

$$Q_{э3} = \rho_3 Q_{э\phi_{13}} + \rho_3 Q_{э\phi_{43}} + \rho_3 Q_{э\phi_{C3}} + \rho_3 Q_{э\phi_{B3}} + \rho_3 Q_{э\phi_{A3}}. \quad (6)$$

Так как все стержни-нагреватели модулей имеют диаметр d , то и мощности лучистых потоков от них равны:

$$Q_{э} = Q_{эC} = Q_{эB} = Q_{эA} = \varepsilon_n \sigma T^4 f (1 + \rho_n \phi_{12}), \quad (7)$$

где σT^4 можно выразить через параметры трехфазной электрической сети — силу тока I и напряжение U :

$$\sigma T^4 = 3 \frac{I \cdot U}{f}, \quad (8)$$

где f — суммарная площадь поверхностей всех проволочных нагревателей печи, определяемая по выражению, m^2 , $f = 3\pi d n (2l + 2l_0 + r)$; 3 — количество модулей в печи; d — диаметр нихромовых стержней нагревателей (5,05 мм); πd — периметр сечения стержня; n — количество пар стержней в одном нагревателе (10 шт.); l — длина огнеупорной поверхности (0,95 м); l_0 — длина консолей нагревателей (0,02 м); r — расстояние между осями стержней (0,05 м). Все размеры даны для опытной электропечи с верхней нагревательной системой. При этих значениях площадь равна 0,966 m^2 .

Формулу (7) теперь можно представить в виде:

$$Q_{э} = Q_{эC} = Q_{эB} = Q_{эA} = 3IU\varepsilon_n(1 + \rho_n\phi_{12}),$$

где ε_n — степень черноты нихрома, равная 0,96; ρ_n — отражательная способность нихрома (0,04) [5]; ϕ_{12} — угловой коэффициент от одного нагревателя к другому (соседнему), равный 0,032. При $I = 185$ (85) А, напряжения $U = 220$ В.

Результирующие потоки определяются разностью [4] $Q_{p3} = Q_{п3} - Q_{э3}$ и формулы результирующих потоков с поверхности 3 (см. рис. 5), примут вид:

– для нулевой камеры, расположенной в центральной зоне модуля:

$$Q_{p3} = (1 - \rho_3)(2Q_{э\phi_{13}} + Q_{э\phi_{43}} + 2Q_{э\phi_{C3}} + 2Q_{э\phi_{B3}} + 2Q_{э\phi_{A3}}), \quad (9)$$

– для пристеночной камеры в зоне № 1:

$$Q_{p3} = (1 - \rho_3)(Q_{э\phi_{13}} + Q_{э\phi_{43}} + Q_{э\phi_{C3}} + Q_{э\phi_{B3}} + Q_{э\phi_{A3}}). \quad (10)$$

Если учесть, что член $Q_{э\phi_{43}}$ — это отраженное поверхностью крышки модуля тепловое излучение и оно несущественно влияет на температуры всех зон огнеупорных оснований, то им в дальнейших расчетах можно пренебречь, так как основные потоки тепловой мощности создают электрические нагреватели.

Соотнеся выражения (9) и (10), то есть мощности результирующих потоков на поверхностях 3 центральной и пристеночной камер (см. рис. 5) при $\rho_3 = 0,35$ [5], размерах $z = 5$ мм, $a = 24,95$ мм и $\Delta y = 35$ мм и угловых коэффициентах, определенных по правилу натянутых нитей [6] и равных $\phi_{13} = 0,271$, $\phi_{A3} = 0,024$, $\phi_{B3} = 0,0077$ и $\phi_{C3} = 0,0031$, получим отношение 2,0004, а сами мощности Q_{p3} равны соответственно в камере 0 — 21436 Вт и в камере 1 — 10716 Вт.

Тенденцию к снижению мощности результирующих потоков в камерах 2 и 1 относительно нулевой камеры покажут соответствующие отношения выражений (9) и (10). Это значит, что мощности результирующих лучистых потоков при переходе от центральной зоны модулей к периферии неизменно снижаются, а следовательно, снижаются и температуры.

Аналитическое исследование мощностей падающих, эффективных и результирующих лучистых потоков и сама схема (см. рис. 5) объясняют причину неоднородного распределения температур на огнеупорных поверхностях модулей.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 6 показана схема распределения температур на огнеупорной поверхности модуля и температур стержней нагревателя среднего модуля опытной печи с верхней нагревательной системой, полученных экспериментальным путем. Здесь же выделены зоны примерно равных температур стержней нагревателя.

Температура на поверхности огнеупорного основания изменяется не только по ширине модуля по зонам, но также и по его длине l . Например, по осевой линии температура изменяется снизу вверх от 695 до 697 °С, проходя через максимум 712 °С. Это связано с тем, что на температуру огнеупорной поверхности из шамотного кирпича влияет встречная к движению вермикулита воздушная тяга, вызванная разностью плотностей воздуха в верхней и нижней частях модулей. Но в работе [7] показано, что доля отраженных от поверхностей основания и крышки модуля потоков в общей мощности теплового излучения, падающего на термообрабатываемую среду с учетом излучения нагревательных элементов, составляет менее 10 %. Поэтому изменение температуры на огнеупорных поверхностях модулей малосущественно, и при выделении

температурных зон следует ориентироваться на нагрев стержней нагревателя, которые хотя и в меньшей степени, но тоже имеют тенденцию к уменьшению от центра к краям (см. рис. 6).

Центральная зона № 4 самая широкая, так как охватывает шесть стержней с равной температурой (746 °С). Зона № 3 уже зоны № 4 и охватывает четыре стержня с относительно близкой температурой, но таких зон две, так как вторая находится справа от оси симметрии модуля (на рис. 6 не показана). Зоны № 2 и № 1 почти одинаковы по ширине, и их тоже по две. Тенденция распределения температуры стержней нагревателя соответствует распределению температуры на огнеупорной поверхности, но перепад здесь менее значительный.

Исходя их пропорций на рис. 6 с учетом ширины модулей опытно-промышленной печи, принятой в качестве аналога ($B = 0,95$ м), определим ширину каждой зоны (см. рис. 3): $B_4 = 0,21$ м, $B_3 = 0,15$ м, $B_2 = 0,12$ м и $B_1 = 0,10$ м.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ

Чтобы установить, как должна распределяться средняя скорость движения частиц термообрабатываемых сыпучих сред по зонам модулей, нужно знать количество поглощенной ими тепловой энергии для завершения химико-минералогических процессов, которые делают конечный продукт кондиционным. Для каждого материала эта скорость и поглощенная энергия будут иметь свои значения. Проведем расчет для наиболее изученного минерала вермикулита.

В работе [8] рассматривали перенос теплоты на поток вермикулита и поглощение им тепловой энергии Q_n с учетом степени черноты ε_n (0,768) и отражательной способности вспучивающегося минерала, и было получено выражение, Вт:

$$Q_n = 0,67\alpha_n\sigma T^4 f\varepsilon_n(1 + \rho_n\varphi_{12})(2\varphi_{1B} + \varphi_{2B}),$$

где α_n — поглощательная способность вермикулита или степень черноты ε_n ; σ — постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м²·К); T — температура на поверхности стержней нагревателей печи, К; f — суммарная площадь поверхностей всех стержней нагревателей, м²; ε_n — степень черноты нихрома (0,96); ρ_n — его отражательная способность (0,04) [5]; φ_{12} — угловой коэффициент для лучистых потоков от одного стержня нагревателя к другому (см. рис. 5); φ_{1B} — угловой коэффициент стержней нагревателей слева и справа относительно вермикулитового зерна 1, расположенного между ними (см. рис. 5); φ_{2B} — угловой коэффициент нагревателей слева и справа относительно вермикулитового зерна 2, расположенного в контакте со стержнем.

Приведенная формула отражает зависимость тепловой мощности, поглощенной вермикулитом, минимально достаточной для полноценного вспучивания за время его движения по модулям печи, соответствует выражению, полученному в работе [8], и не учитывает влияние отраженных от огнеупорного основания и крышки лучистых потоков.

Поглощенная тепловая энергия, достаточная для качественного вспучивания вермикулита, должна быть одинакова для любой из зон и равна, Дж:

$$E_n = Q_{n1}t = Q_{n2}t_2 = Q_{n3}t_3 = Q_{n4}t_4, \quad (11)$$

где t — среднее локальное время движения вермикулита в первой зоне, равное времени обжига в печи, не снабженной пластинчатыми ускорителями; t_2 , t_3 и t_4 — среднее локальное время движения вермикулита в зонах с пластинчатыми ускорителями 2, 3 и 4 (см. рис. 3).

Значение энергии E_n в данном случае вычислять не нужно, так как необходимое среднее локальное время движения в зонах можно найти из пропорций, взятых из равенства (11):

$$t_2 = Q_{n1}t / Q_{n2},$$

$$t_3 = Q_{n1}t / Q_{n3},$$

$$t_4 = Q_{n1}t / Q_{n4}.$$

Определим средние значения температур стержней нагревателей по зонам (см. рис. 6). В зоне № 4 $T = 746 + 273 = 1029$ К, в зоне № 3 $T = (728 + 739 + 743 + 746)/4 + 273 = 1019$ К, в зоне № 2 $T = (707 + 720)/2 + 273 = 986$ К и в зоне № 1 $T = (637 + 691)/2 + 273 = 937$ К.

Подставив полученные значения температуры в формулу (11) и вычисляя отношения Q_{n1} / Q_{n2} , Q_{n1} / Q_{n3} , Q_{n1} / Q_{n4} , получим:

$$t_2 = tQ_{n1} / Q_{n2} = 0,81t, \quad (12)$$

$$t_3 = tQ_{n1} / Q_{n3} = 0,74t, \quad (13)$$

$$t_4 = tQ_{n1} / Q_{n4} = 0,71t. \quad (14)$$

Из соотношений (12)–(14) следует, что время прохождения частиц потока по зонам 2, 3 и 4 в модулях должно быть меньше на 19, 26 и 29 %, чем в первой зоне соответственно.

Полное время прохождения вермикулита по модулям опытно-промышленной печи равно 2,74 с [3]. Если угол $\alpha = 0$ (см. рис. 2), то среднее время движения по одному модулю будет равно 0,913 с, а при длине l огнеупорной поверхности модуля 0,95 м средняя скорость будет равна 1,04 м/с. Указанные значения $t = 0,913$ с и $v_{cp} = 1,04$ м/с соответствуют зонам № 1 (см. рис. 3) для печи с пластинчатыми ускорителями.

Следовательно, для зон № 1, № 2, № 3 и № 4 среднее время движения локальных потоков должно составлять $t_1 = 0,913$ с, $t_2 = 0,74$ с, $t_3 = 0,68$ с и $t_4 = 0,64$ с соответственно. Отношение l/t дает значения средних локальных скоростей

потоков частиц сыпучей среды в соответствующих зонах: $v_{ср1} = 1,04$ м/с, $v_{ср2} = 1,28$ м/с, $v_{ср3} = 1,40$ м/с и $v_{ср4} = 1,48$ м/с.

Так как частицы на границах зон взаимодействуют друг с другом, то эпюра распределения скоростей по ширине модулей имеет вид, подобный эпюре скоростей при течении жидкости в турбулентном режиме (рис. 7).

Достигнуть такого нелинейного распределения скоростей потоков сыпучей среды в рабочем пространстве модулей печи можно заданием углов наклона пластин ускорителей α_2 , α_3 и α_4 , так именно они влияют на начальные скорости частиц v_{02x} , v_{03x} и v_{04x} .

На рис. 8 показана векторная схема, иллюстрирующая изменение начальной скорости на пластинах ускорителя 17, 18 и 19 (см. рис. 2 и 3). Чем больше угол α , тем больше и начальная скорость v_{0x} их движения по огнеупорной поверхности в направлении x .

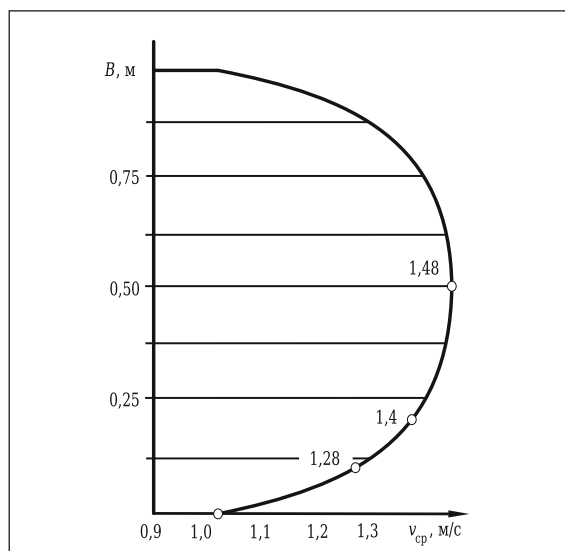


Рис. 7. Распределение локальных скоростей потоков частиц

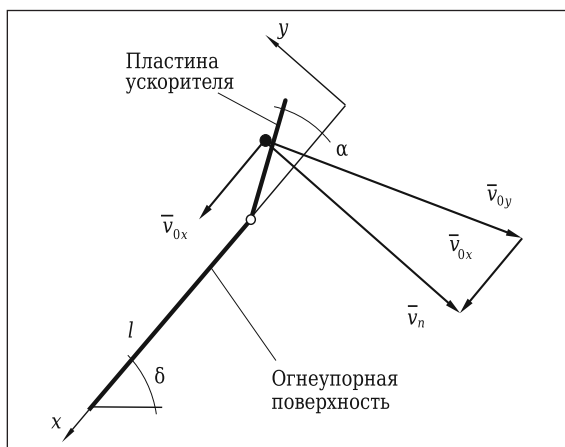


Рис. 8. Образование начальной скорости частицы на пластине ускорителя

Уравнение движения частицы по поверхности модуля без учета сопротивления движению частицы от воздуха:

$$m\ddot{x} = mg \cdot \sin \delta - mgf \cdot \cos \delta,$$

где m — масса частицы, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; δ — угол наклона модулей к горизонту; f — приведенный коэффициент трения скольжения-качения, определенный экспериментально и приведенный в работе [3], $f = 0,51$; $\ddot{x}$ — координата частицы на поверхности модуля, м.

Решение этого уравнения тривиально [9], поэтому выражение для описания скорости будет иметь вид, м/с:

$$v_x = g(\sin \delta - f \cdot \cos \delta)t + v_{0x}, \quad (15)$$

где v_x — локальная конечная скорость частицы в зоне, соответствующей своему времени движения, $t_1 = 0,913$ с, $t_2 = 0,74$ с, $t_3 = 0,68$ с и $t_4 = 0,64$ с; v_{0x} — начальная скорость на соответствующей пластине ускорителя с углом наклона α_1 , α_2 , α_3 или α_4 .

Средняя скорость в каждой зоне может быть найдена по формуле:

$$v_{ср} = (v_x + v_{0x}) / 2. \quad (16)$$

Совместное решение выражений (15) и (16) дает уравнение:

$$v_{0x} = v_{ср} - \frac{1}{2}gt(\sin \delta - f \cdot \cos \delta).$$

Так как значения t и $v_{ср}$ известны, определим начальные скорости при угле наклона модулей к горизонту $\delta = 45^\circ$: в зоне № 1 $v_{01x} = 0$, в зоне № 2 $v_{02x} = 0,024$ м/с, в зоне № 3 $v_{03x} = 0,246$ м/с, в зоне № 4 $v_{04x} = 0,4$ м/с.

Полученные значения начальных скоростей, обеспечиваются соответствующими углами наклона пластин ускорителя при настройке опытного образца печи.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ И ПОЛНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЕЙ ПЕЧИ

При ширине модулей $B = 95$ см (как у опытно-промышленной печи [3]) производительность без пластинчатых ускорителей на вермикуловом концентрате, например марки КВК-4 (4 — условное число, отражающее крупность концентрата), составляет $0,75$ м³/ч. Тогда приведенная к единице ширины часовая производительность $\Pi_{пр}$ будет равна $0,75/95 = 0,0079$ м³/(см·ч).

Так как локальные средние скорости по зонам № 2, № 3 и № 4 увеличиваются относительно первой зоны на 23, 35 и 42 % соответственно, то локальные производительности с учетом ширины зон ($B_4 = 21$ см, $B_3 = 15$ см, $B_2 = 12$ см и $B_1 = 10$ см), будут равны, м³/ч: в четвертой зоне $\Pi_4 = 0,0079 \cdot 21 \cdot 1,42 = 0,24$, в двух третьих зонах $\Pi_3 = 2 \cdot 0,0079 \cdot 15 \cdot 1,35 = 0,32$, в двух вторых зонах

$P_2 = 2 \cdot 0,0079 \cdot 12 \cdot 1,23 = 0,23$, в двух первых зонах
 $P_1 = 2 \cdot 0,0079 \cdot 10 \cdot 1,0 = 0,16$. Полная производительность печи P будет равна $0,24 + 0,32 + 0,23 + 0,16 = 0,95 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Увеличение производительности печи за счет более быстрого движения потоков вермикулита в наиболее раскаленных зонах модулей составляет $0,95 \text{ м}^3/\text{ч}$, а это на 27 % больше, чем у опытно-промышленной печи, взятой за аналог. При этом расход электроэнергии не возрастает, а следовательно, и удельная энергоемкость процесса вспучивания увеличится на те же 27 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизирована электрическая модульно-спусковая печь с повышенной производительностью и уменьшенной удельной энергоемкостью термообработки.

Аналитическое исследование падающих, эффективных и результирующих потоков нагревателей и огнеупорного основания модулей выявило причину неоднородности теплового поля на поверхностях модулей обжига, которая заключается в неравном распределении результирующих потоков по зонам — в центре и на периферии модулей. Проведенный анализ экспериментальных данных подтвердил выводы аналитического исследования и показал, как

можно определить ширину выделенных тепловых зон с примерно равными температурами.

Определены необходимое и достаточное время движения вермикулита в каждой тепловой зоне и средние локальные скорости его движения в указанных зонах. Получена эпюра распределения средних локальных скоростей потоков вермикулита, указывающая на его нелинейный характер.

Определены локальные (по зонам) производительности и полная производительность печи, равная $0,95 \text{ м}^3/\text{с}$, которая на 27 % превышает производительность опытно-промышленной печи-аналога при равном потреблении электроэнергии.

Незначительная модернизация печи, практически не усложняющая ее конструкцию, позволила за счет двух инновационных технических решений получить новый печной агрегат, отличающийся большей производительностью и энергоэффективностью.

Подход к распределению локальных средних скоростей потоков сыпучей среды, основанный на равенстве поглощаемой материалом тепловой энергии, может быть применен и для оптимизации конструкции еще более энергоэффективных электрических печей с подвижными подовыми платформами.

Библиографический список

1. **Nizhegorodov, A. I.** Theory and practical use of modular-pouring electric furnaces for firing vermiculite / A. I. Nizhegorodov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 361–365.
2. **Nizhegorodov, A. I.** Application and production technology of thermal activation products of serpentine minerals from industrial waste / A. I. Nizhegorodov, A. N. Gavrilin, B. B. Moyzes // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering.* — 2018. — Vol. 329, № 5. — P. 67–75.
3. **Нижегородов, А. И.** Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин. — Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2015. — 250 с.
4. **Телегин, А. С.** Теплоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2002. — 455 с.
5. **Кутателадзе, С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справочное пособие / С. С. Кутателадзе. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 367 с.
6. **Крейт, Ф.** Основы теплопереноса / Ф. Крейт, У. Блэк ; пер. с англ. — М. : Мир, 1983. — 512 с.
7. **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.
8. **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.
9. **Звездин, А. В.** Аналитическая модель поглотительно-отражательной способности вермикулита в условиях теплового излучения / А. В. Звездин, Т. Б. Брянских, А. И. Нижегородов // *Новые огнеупоры.* — 2017. — № 1. — С. 15–20.
9. **Лойцянский, Л. Г.** Курс теоретической механики. Т. 2 : Динамика / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. — М. : Наука, 1983. — 640 с. ■

Получено 31.10.20

© А. И. Нижегородов, А. Н. Гаврилин,
 Б. Б. Мойзес, Г. М. Исмаилов, 2020 г.