



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-59-67>
УДК 669.054.8

Поступила 14.03.2022
Received 14.03.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СТРУЖКО-ПОРОШКОВЫХ ДИСПЕРСИЙ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОХОДНОЙ МУФЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ГОРЯЧЕГО БРИКЕТИРОВАНИЯ. СООБЩЕНИЕ 1

О. М. ДЬЯКОНОВ, А. А. ЛИТВИНКО, В. Ю. СЕРЕДА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: guinness1993@mail.ru

Приведено описание устройства и принципа действия проходной муфельной печи горячего брикетирования стружко-порошковых дисперсий черных металлов. Отличительной особенностью данного устройства является наличие двух систем газопламенного и индукционного нагрева, в результате которого гарантированно обеспечивается достижение заданной температуры нагрева шихты при полном удалении жидкой фазы. Масляная компонента СОЖ используется для создания защитной углеводородной атмосферы, обеспечивающей безокислительный нагрев металла, а также получение углеродного покрытия, которое помимо защитных функций выполняет роль смазки в процессе горячего брикетирования. Последующее сжигание паров масла в топке печи приводит к значительной экономии природного газа. Печь, построенная по такому принципу, обладает наименьшими габаритами и наивысшими технико-экономическими характеристиками.

Выполнено моделирование процесса нагрева стружки в зоне загрузки в печь. Получены зависимости температуры стружки на выходе из шнекового питателя от температуры дымовых газов на входе для массовой доли СОЖ в стружке 10% и различных долей масла. Установлено, что в процессе нагрева стружки в зоне загрузки фазовые превращения СОЖ не происходят, температура нагрева шихты не превышает 100 °С.

Ключевые слова. Устройство, печь, стружка, процесс, нагрев, газопламенный, индукционный, характеристики, моделирование, зона, загрузка, фазовые превращения, температура, тепло, масса, перенос.

Для цитирования. Дьяконов, О. М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 1 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Середа // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 59–67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-59-67>.

MODELING OF THE PROCESS OF HEATING OF CHIP-POWDER DISPERSIONS OF FERROUS METALS IN THE PASS-THROUGH MUFFLE FURNACE OF HOT BRIQUETTING. MESSAGE 1

O. M. DYAKONOV, A. A. LITVINKO, V. YU. SEREDA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: guinness1993@mail.ru

The description of the device and principle of operation of the continuous muffle furnace for hot briquetting of chip-powder dispersions of ferrous metals is given. A distinctive feature of this device is the presence of two systems of gas-flame and induction heating, as a result of which the achievement of the specified charge heating temperature is guaranteed with the complete removal of the liquid phase. The oil component of the coolant is used to create a protective hydrocarbon atmosphere that provides non-oxidizing heating of the metal, as well as to obtain a carbon coating, which, in addition to protective functions, acts as a lubricant in the hot briquetting process. Subsequent combustion of oil vapors in the furnace leads to significant savings in natural gas. A furnace built according to this principle has the smallest dimensions and the highest technical and economic characteristics.

The simulation of the chip heating process in the zone of loading into the furnace is carried out. The dependences of the temperature of the chips at the outlet of the screw feeder on the temperature of the flue gases at the inlet for the mass fraction of coolant in the chips of 10% and various fractions of oil are obtained. It has been established that during the heating of the chips in the loading zone, phase transformations of the coolant do not occur, the charge heating temperature does not exceed 100 °С.

Keywords. Device, furnace, chips, process, heating, flame, induction, characteristics, modeling, zone, loading, phase, transformations, temperature, heat, mass, transfer.

For citation. Dyakonov O. M., Litvinko A. A., Sereda V. Yu. Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 1. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 2, pp. 59–67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-59-67>.

Введение

В работах [1–3] было показано, что нагрев металлической стружки с включением тонкодисперсных порошков шламов и СОЖ сопровождается сложными теплофизическими и термохимическими процессами, исследование которых позволяет решить две важнейшие проблемы: 1 – определить способ безокислительного нагрева стружки до температуры неполной горячей деформации (750–850 °С) при условии полного удаления воды и масла с последующей экологически безопасной утилизацией газообразных продуктов; 2 – добиться высокой плотности (порядка 7 кг/м³), при которой металлургические брикеты становятся полноценными заменителями габаритного кускового лома.

Установлено [3], что процесс безокислительного нагрева стружки в ограниченном пространстве муфеля при ограниченном доступе окислителя происходит в два этапа: этап обезвоживания и обезмасливания стружки (100–650 °С) и этап нагрева сухого металла (650–850 °С). В связи с необходимостью удаления жидкой фазы, включающей значительное количество углеводородов, процесс нагрева целесообразно проводить двумя способами: на первом этапе – предварительный нагрев в пламене газовой горелки с выходом газов из муфеля в пламя горелки; на втором – индукционный нагрев практически сухого металла в стальном жаропрочном муфеле медного водоохлаждаемого индуктора. При указанных значениях температуры требуемая плотность чугуновых и стальных брикетов достигается при давлении прессования 470–500 МПа.

Цель работы – математическое моделирование, численный расчет и оптимизация параметров процессов тепло- и массопереноса при нагреве стружки черных металлов в вертикальной проходной муфельной печи с газопламенным и индукционным нагревателями. В соответствии с производительностью печи и заданными параметрами нагрева требуется определить мощность газовой горелки, электрические параметры индуктора, параметры теплоизоляции и габариты печи.

Устройство и принцип действия проходной муфельной печи

Печь состоит (рис. 1) из трех составных частей: загрузочного устройства H_1 , газопламенного H_g и индукционного H_{in} нагревателей. Загрузочное устройство изготовлено в виде головки 1 и шнекового питателя 2. Газопламенный нагреватель включает шахту 3, муфель 4, шнек 5, узел газа с двухпроводной газовой горелкой 6. Индукционный нагреватель состоит из низкочастотного медного водоохлаждаемого индуктора 7 и муфеля 8. Щетки 9 предназначены для предотвращения просыпания шихты по периметру муфеля при выгрузке из печи и при загрузке в пресс-форму горячего брикетирования.

Шахта 3 имеет прямоугольную форму, выложена шамотным кирпичом, изолирована листовым асбестом и облицована стальным листом. Муфель 4 выполнен в виде трубы прямоугольной формы из жаропрочной стали с внутренними размерами на просвет 150×450 мм. В боковой стенке муфеля имеются щелевые отверстия *a* для выхода газов в пламя горелки 6. Для удаления газов из печи в систему «мокрой» очистки, обезвреживания и утилизации 10 служат боковые дымоходы *b*, вертикальный дымоход *c* и отверстие в шахте печи *d*. Стальной жаропрочный муфель 8 выполнен как продолжение муфеля 4 с той же площадью проходного сечения.

Стружка загружается в головку 1 печи и муфель 4 шнеком 2 и далее перемещается сверху вниз под действием силы тяжести и с помощью шнека 5. Нагрев стружки происходит в стационарном тепловом поле, создаваемом за счет сгорания природного газа и масляной компоненты СОЖ в топке газопламенного нагревателя и далее – в индукторе индукционного нагревателя. При этом стружка, согласно схеме перемещения газового потока, обогревается равномерно со всех сторон как в зоне действия газовой горелки, так и в зоне индукционного нагрева. Равномерному нагреву стружки способствуют высокая теплопроводность стального муфеля и небольшая толщина прогреваемого слоя стружки – 150 мм.

Муфель 4 ограничивает пространство, заполненное стружкой, через которую, как через фильтр, проходят газы (продукты термической возгонки СОЖ), выполняющие функцию теплопередающей среды вплоть до их выпуска в печь через щелевые отверстия *a* в стенках муфельной трубы. Как было показано в работах [1–3], ограниченность пространства в муфеле и высокая плотность стружки позволяют создать избыточное давление и высокую плотность защитной углеводородной атмосферы. На поверхности частиц стружки оседают частицы сажи. Пиролиз углеводородных соединений в присутствии катализатора

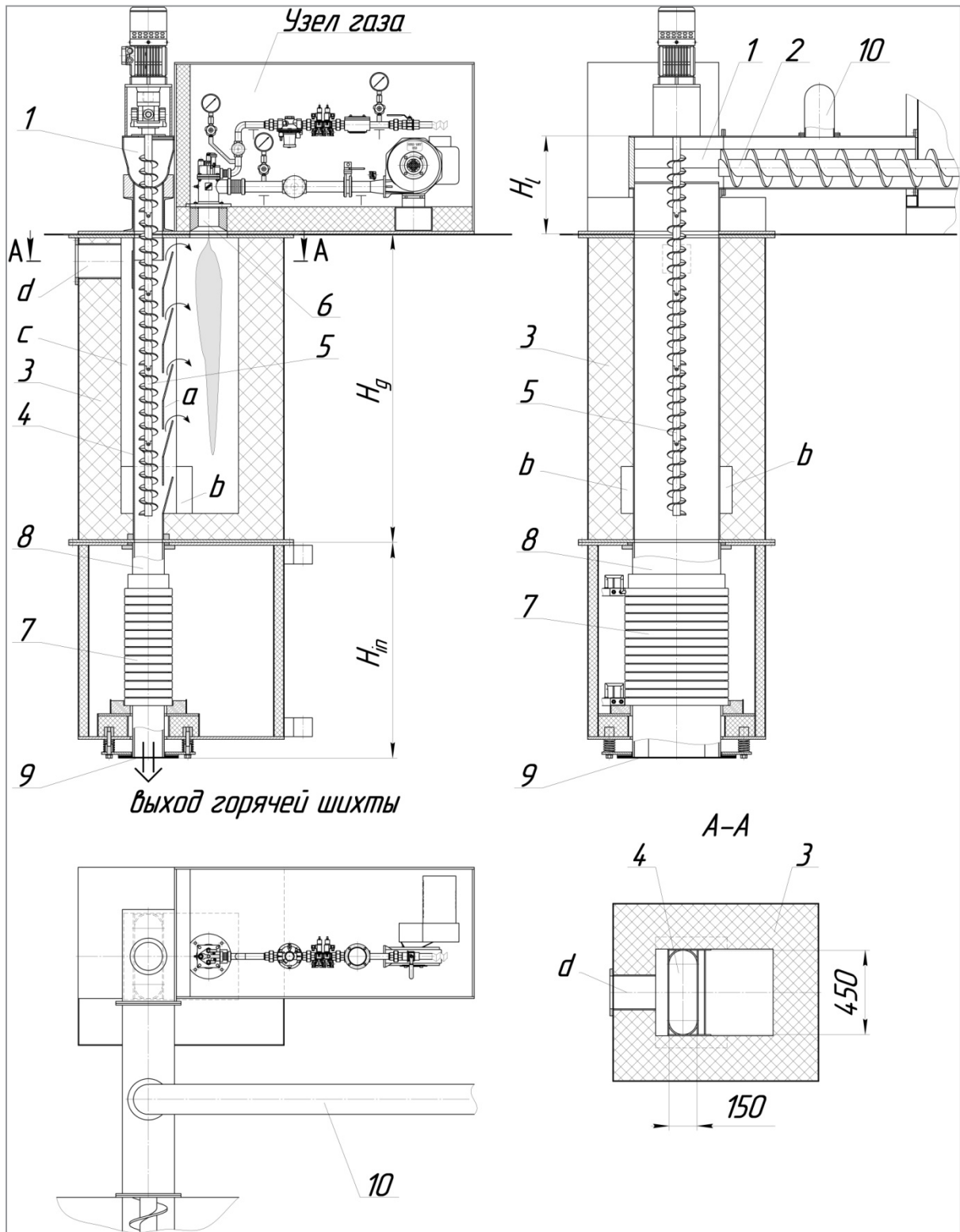


Рис. 1. Схематическое изображение проходной муфельной печи с разделением на зоны нагрева:
 H_l – зона загрузки шихты в печь; H_g – зона газопламенного нагрева; H_{in} – зона индукционного нагрева

(стальной стружки) и ограниченного доступа окислителя приводит к образованию пироуглеродного покрытия, которое помимо защиты стружки от окисления выполняет роль смазки в процессе горячего брикетирования. Сжигание паров масла в топке печи приводит к значительной экономии природного газа (до 30%) и повышению КПД печи.

Газы удаляются из газовой камеры через боковые дымоходы b у ее основания, вертикальный дымоход c и отверстие d в шахте 3 печи. Нижнее расположение отверстий b выравнивает профиль температур по высоте зоны газопламенного нагрева, так как газы принудительно опускаются вниз, отдавая свое

тепло муфелю и стенкам печи. Дымовые газы нагревают пространство между стенками печи и муфеля (печное или рабочее пространство) посредством радиационного и конвективного механизмов теплопередачи. Расположение горелки и дымоходов обеспечивает всесторонний и равномерный нагрев муфеля. От стенок муфеля тепловой поток передается стружке. Процесс нагрева шихты сопровождается также процессом массопереноса – удалением воды и масла. Таким образом, в индукционный нагреватель шихта поступает практически в сухом виде, нагретой до температуры 600–650 °С.

Нагрев шихты в низкочастотном индукторе 7 также характеризуется рядом особенностей. Прежде всего нагревается стальной муфель 8. Температура муфеля доводится до 850–900 °С. Нагрев шихты осуществляется за счет прямого контактного теплообмена со стенками муфеля и конвективного в пространстве муфеля, что особенно эффективно при нагреве парамагнитных и немагнитных материалов, входящих в состав металлургических композитов. Металлические частицы помимо прямого контакта с нагретым телом подвержены также электромагнитному воздействию.

Известно, что стружка, содержащая значительное количество СОЖ (до 12% по массе), в индукционной печи плавится в течение продолжительного времени с большим перерасходом электроэнергии, однако в сухом виде она плавится гораздо быстрее вследствие увеличения плотности сухого горячего металла, снижения пористости и повышения его магнитной восприимчивости. Применение индукционного нагрева в сочетании с предварительным газопламенным гарантированно обеспечивает достижение заданной температуры нагрева шихты при полном удалении жидкой фазы. Печь, построенная по такому принципу, обладает наименьшими габаритами и наивысшей производительностью.

В связи с разделением расчетной схемы печи на три зоны поставленную задачу следует разбить на три части (рис. 1): 1 – нагрев стружки в зоне загрузки в печь H_1 ; 2 – нагрев стружки в зоне газопламенного нагрева H_g ; 3 – нагрев стружки в зоне индукционного нагрева H_{in} . Нами проведена первая часть работы, связанная с моделированием процесса нагрева стружки в зоне загрузки в печь.

Моделирование процесса нагрева стружки в зоне загрузки в печь

Цель данной задачи состоит в определении средней температуры стружки на выходе из зоны загрузки (очерчена красной линией) $T_{s,out}$ в зависимости от температуры входящих в эту зону дымовых газов $T_{g,in}$ (рис. 2, таблица).

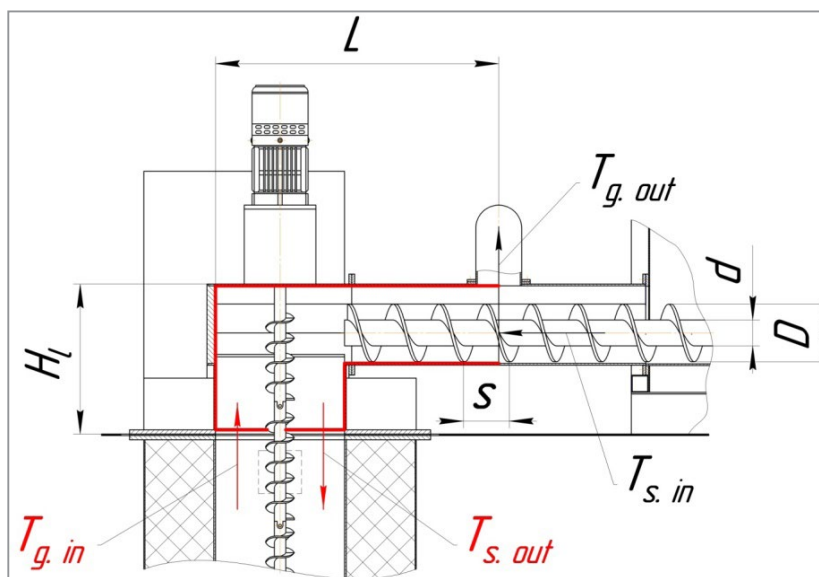


Рис. 2. Расчетная схема процесса нагрева стружки в зоне загрузки в печь

Исходные данные

T , °С	ρ_s , кг/м ³	$C_{p,s}$, Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ϵ_r
20	900	469	48.1	0.5
100	900	490	49	0.5
200	900	511	49	0.5
300	900	532	47	0.5
400	900	553	44	0.5

500	900	578	44	0.55
600	900	611	38	0.6
700	900	708	35	0.7
800	900	699	29	0.8
900	900	680	28	0.9

СОЖ (смазочно-охлаждающая жидкость)

$T_{b,W} = 373 \text{ К}$ – температура кипения воды;

$L_{EV,W} = 2260 \text{ кДж/кг}$ – теплота испарения воды;

$\Delta T_W = 3,0 \text{ К}$ – температурный диапазон испарения воды;

$\Phi_{\text{СОЖ}}$ – концентрация СОЖ в стружке, массовые доли;

$\Phi_W = \Phi_{\text{СОЖ}} - \Phi_0$ – концентрация воды в стружке, массовые доли;

$\lambda_{W,0} = 56,7 \text{ Вт/(м·К)}$ – теплопроводность воды при $0 \text{ }^\circ\text{C}$;

$\lambda_{W,100} = 68,5 \text{ Вт/(м·К)}$ – теплопроводность воды при $100 \text{ }^\circ\text{C}$;

$C_{P,WV} = 2100 \text{ Дж/(кг·К)}$ – теплоемкость паров воды;

$T_{b,0} = 673 \text{ К}$ – температура кипения масла;

$L_{ev,0} = 1260 \text{ кДж/кг}$ – теплота испарения масла;

$\Delta T_0 = 10 \text{ К}$ – температурный диапазон испарения масла;

$\Phi_0 = 0,05 - 0,07$ – концентрация масла в стружке, массовые доли;

$Q_{C,0} = 40000(42500) \text{ кДж/кг}$ – теплота сгорания масла;

$\rho_0 = 850 \text{ кг/м}^3$ – плотность масла;

$\lambda_0 = 50,0 \text{ Вт/(м·К)}$ – теплопроводность масла;

$C_{p,0v} = 1000 \text{ Дж/кг}$ – теплоемкость паров масла;

$E_{A,0} = 130000 \text{ Дж/моль}$ – энергия активации реакции горения паров масла;

$K_0 = 2,62E + 8 \text{ 1/с}$ – предэкспонента для скорости горения масла.

Задача нагрева стружки в шнековом питателе (винтовом конвейере) является сложной комплексной задачей, включающей в себя большое количество переменных параметров. Поскольку в данной работе эта часть задачи не является основной и не требует высокой точности, из рассмотрения был исключен нагрев винта шнека. Также предполагалось отсутствие тепловых потоков по радиусу засыпки, так как в процессе транспортировки стружка перемешивается и соответственно тепловые потоки в этом направлении существенного вклада вносить не будут. Не рассматриваются также тепловые потоки вдоль движения стружки, поскольку они достаточно малы по сравнению с тепловым потоком, приходящим от горячих дымовых газов. С учетом принятых допущений температура стружки в шнеке определялась по следующему уравнению:

$$\left(C_{p,s}\rho_s\right)_{\text{eff}} \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_{s,\text{ext}}, \quad (1)$$

где $C_{p,s}$ – теплоемкость стружки (с учетом наличия СОЖ), Дж/(кг·К); ρ_s – насыпная плотность стружки, кг/м³; T_s – температура стружки, К; $q_{s,\text{ext}}$ – плотность теплового потока, кВт/м³; t – время, с.

Для численного решения задачи воспользуемся зональной моделью [4, 5]. Сущность зональных методов заключается в делении излучающей системы на зоны и замене непрерывного распределения температур и физических характеристик прерывным, состоящим из конечного числа однородных участков (зон). Исходя из этого, всю зону загрузки длиной L разобьем на i -е количество изотермических оптически однородных объемных зон, каждая из которых имеет длину, равную шагу витков шнека s . После некоторых преобразований (1) получаем выражение для определения температуры стружки в каждой зоне:

$$T_s^i = T_s^{i-1} + \frac{Q_{s,\text{ext}}}{\left(C_{p,s}\rho_s\right)_{\text{eff}} v_s S_s}, \quad (2)$$

где i – номер зоны (нумерация в направлении движения стружки); v_s – скорость стружки в шнеке, м/с; S_s – площадь поперечного сечения, занимаемого стружкой, м²; $Q_{s,\text{ext}}$ – сумма тепловых потоков, подводимых к стружке, кВт.

Эффективная теплоемкость определяется аддитивно исходя из массовой доли каждой компоненты в стружке:

$$C_{p,eff} = \varphi_s C_{p,s} + \varphi_{wat} C_{p,wat} + \varphi_{oil} C_{p,oil},$$

где φ_s , φ_{wat} , φ_{oil} – массовые доли стружки, воды и масла; $C_{p,s}$, $C_{p,wat}$, $C_{p,oil}$ – теплоемкости стружки, воды и масла. Помимо СОЖ свободное пространство пор в стружке заполняет воздух, доля которого по оценкам составляет $\varphi_{air} = 0,09\%$ при 10% СОЖ ($\varphi_{wat} = 5\%$, $\varphi_{oil} = 5\%$), поэтому при расчете эффективной теплоемкости вклад воздуха не учитывается.

Скорость движения стружки в шнеке v_s и время прохождения зоны загрузки t определяются через заданную производительность печи Q , используя следующие выражения:

$$Q = V \rho_s n \psi \text{ или } n = \frac{Q}{V \rho_s \psi},$$

$$v_s = sn, \quad t = \frac{L}{v_s},$$
(3)

где Q – производительность шнека, равная производительности печи, кг/ч; V – максимальный объем, m^3 , который может занимать стружка в одном шаге шнека: $V = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)s$; D – диаметр шнека, мм; d – диаметр вала, мм; n – частота вращения шнека, об/мин; ψ – коэффициент заполнения, изменяется от 0 до 1; s – шаг витков, мм.

Данная задача является сопряженной, поскольку совместно с температурой стружки рассчитывается температура дымовых газов. Температура газа описывается аналогичным уравнением:

$$C_{p,g} \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = -q_{g,ext},$$
(4)

где $C_{p,g}$, ρ_g , T_g – соответственно теплоемкость, плотность и температура дымовых газов; $q_{g,ext}$ – плотность теплового потока. После преобразования уравнения (4) получено выражение для определения температуры газа в каждой зоне:

$$T_g^i = T_g^{i+1} - \frac{Q_{g,ext}}{C_{p,g} G_g},$$
(5)

где G_g – массовый расход газа, кг/ч; $Q_{g,ext}$ – сумма тепловых потоков, отводимых от дымовых газов, кВт.

Температуры стружки и дымовых газов в каждой последующей зоне определяются по температурам, полученным в предыдущей зоне (в пределах шага шнекового питателя). Отличие в индексах предыдущей зоны в уравнениях (2) и (5) связано с противоположным направлением их движения, при этом нумерация зон общая.

Предполагается, что газовый поток движется с расходом G_g , соответствующим мощности горелки, в которой происходит сжигание смеси воздуха и природного газа при температуре T^* , т.е. пренебрегается иными источниками дымовых газов в системе. Расход воздуха Q_{air} определяется в соответствии с расходом CH_4 , подаваемым на горелку ($Q_{fuel} = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$), и рассчитывается по формуле $Q_{air} = \alpha V_0 Q_{fuel}$, где α – коэффициент избытка воздуха (в работе используется $\alpha = 1,85$); V_0 – минимально необходимое количество воздуха для сжигания 1 м^3 топлива (для CH_4 – $9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$); Q_{air} и Q_{fuel} – объемный расход воздуха и топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$. Следовательно, массовый расход дымовых газов определяется по выражению

$$G_g = \rho_g (1 + \alpha V_0) Q_{fuel} \frac{T^*}{273K}.$$

Температуры стружки и дымовых газов на входе в рассматриваемую систему задаются $T_{s,in}$ и $T_{g,in}$:

$$T_s \Big|_{t=0} = T_s^{i=0} = T_{s,in},$$

$$T_g \Big|_{t=0} = T_g^{i=N} = T_{g,in}.$$
(6)

При решении данной задачи рассмотрены два варианта граничных условий: с учетом и без учета теплообмена с окружающей средой [6, 7]. Тепловые потоки через стенку, отделяющую дымовые газы и стружку, а также окружающую среду, описываются в квазистационарном приближении, так как основной интерес представляет установившийся процесс работы печи. В рамках этого приближения тепловой

поток, падающий на стенку печи со стороны одной среды, равен потоку, который отдает противоположная поверхность этой стенки другой среде.

Для варианта с внешними адиабатическими стенками $Q_{g,ext} = Q_{s,ext} = Q_{g \rightarrow s}$, соответственно система тепловых потоков, позволяющая определить температуру на каждой поверхности рассматриваемых элементов конструкции печи, следующая:

$$\begin{aligned} Q_{g \rightarrow s} &= \varepsilon_{wg} \sigma_0 (T_g^4 - T_{wg}^4) S_{wg} + \alpha_g (T_g - T_{wg}) S_{wg} + \varepsilon_{ww} \sigma_0 (T_{ww}^4 - T_{wg}^4) S_{ww}, \\ Q_{g \rightarrow s} &= \frac{\lambda_w}{d_w} (T_{wg} - T_{ws}) \frac{S_{ws} + S_{wg}}{2}, \\ Q_{g \rightarrow s} &= \varepsilon_{ws} \sigma_0 (T_{ws}^4 - T_s^4) S_{ws}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $Q_{g \rightarrow s}$ – тепловой поток от дымовых газов к стружке, кВт; T_{wg} и T_{ws} – температура стенки со стороны дымовых газов и стружки, К; T_{ww} – температура стенки канала дымовых газов со стороны окружающей среды (не граничит со стружкой) и в данной постановке (адиабатные стенки) принимается равной T_g , К; λ_w – теплопроводность стенки, кВт/(м·К); d_w – толщина стенки, мм; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана: $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$, кВт/(м²/К⁴); S_{wg} и S_{ws} – площади поверхностей теплообмена со стороны дымовых газов и стружки, м²; α_g – коэффициент конвективного теплообмена дымовых газов в канале, кВт/(м·К); ε_{wg} , ε_{ws} и ε_{ww} – приведенная степень черноты между стенкой и газом, между стенкой и стружкой и между противоположными стенками в газовом канале.

Коэффициент теплообмена между газом и стенками канала $\alpha_g = Nu \lambda_g / d^*$ определяется корреляцией для турбулентного режима течения газа в канале:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_g^{0,8} Pr_g^{0,43} \left(\frac{Pr_g}{Pr_w} \right)^{0,25} \varepsilon_l,$$

где λ_g – теплопроводность дымовых газов, кВт/(м·К); d^* – эквивалентный диаметр канала; Nu – критерий Нуссельта; Pr_g – критерий Прандтля; Re_g и Re_w – критерий Рейнольдса при температуре газа и стенки; ε_l – поправка, учитывающая влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена.

Так как трехатомные газы, в частности углекислый газ (CO₂) и водяной пар (H₂O), входящие в состав дымовых газов, оптически активны в инфракрасном диапазоне спектра, в модели учтен радиационный теплообмен газа со стенкой, а также при определении радиационного теплообмена между стенками канала учтено нахождение поглощающей среды (дымовых газов) между ними. Приведенная степень черноты в системе газ/стенка $\varepsilon_{g,w}$ определяется по формуле:

$$\varepsilon_{g,w} = \left(\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right)^{-1},$$

где ε_g и ε_w – степень черноты газа и стенки. Приведенная степень черноты для системы двух поверхностей, разделенных поглощающим газом, описывается выражением:

$$\varepsilon_{w,w} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{w1}} + \frac{1}{\varepsilon_{w2}} - \frac{2(1-\varepsilon_g)}{2-\varepsilon_g} \right)^{-1}.$$

Степень черноты газа рассчитывается по формуле $\varepsilon_g = \beta \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2}$, где β – поправочный коэффициент; ε_{CO_2} и ε_{H_2O} – степени черноты углекислого газа (CO₂) и водяного пара (H₂O), которые определяются по известным номограммам.

Таким образом, тепловой поток, падающий на стенку со стороны дымовых газов, включает радиационный и конвективный тепловые потоки от газа и радиационный поток от противоположной стенки. В данной части задачи при расчете радиационных тепловых потоков между стенками угловые коэффициенты принимались равными 1. Поскольку определение этих параметров для сложной геометрии требует немалых затрат по времени как на стадии создания кода, так и в процессе самого расчета и реальное их значение, согласно геометрии канала, будет несильно отличаться от 1 (стенки условно параллельные), данное допущение не должно заметно повлиять на конечный результат. В случае теплообмена газа со стенкой угловые коэффициенты также равны 1, поскольку имеет место радиационный теплообмен между двумя условно параллельными поверхностями: стенка и поверхность оболочки, в которой расположен газ.

Математическая модель нагрева стружки в шнеке от дымовых газов без учета теплообмена с окружающей средой состоит из уравнений (2), (5) и (7). Математическая модель с учетом внешнего теплообмена дополнена двумя аналогичными системами уравнений для тепловых потоков от дымовых газов к окружающей среде и со стороны стружки к окружающей среде. В данном описании они не приводятся.

Поскольку движение стружки и дымовых газов происходит в противоположных направлениях, определение их температур осуществляли итерационно.

Геометрические параметры шнека: $D = 200$ мм; $d = 90$ мм; $s = 160$ мм; $\delta = 10$ мм – толщина витка; $L = 975$ мм; $\delta_{w2} = 5$ мм – толщина стенки между шнеком и каналом. В случае учета теплообмена с окружающей средой дополнительно вводятся следующие параметры: $\delta_{w1} = 6$ мм – толщина стенки шнека и канала с внешней стороны (со стороны изоляции); $d_{is} = 100$ мм – толщина слоя изоляционного материала.

В ходе проведенного моделирования были получены зависимости температуры стружки на выходе из шнека от температуры дымовых газов на входе (в канал над шнеком) для массовой доли СОЖ в стружке 10% и различных долей масла (рис. 3).

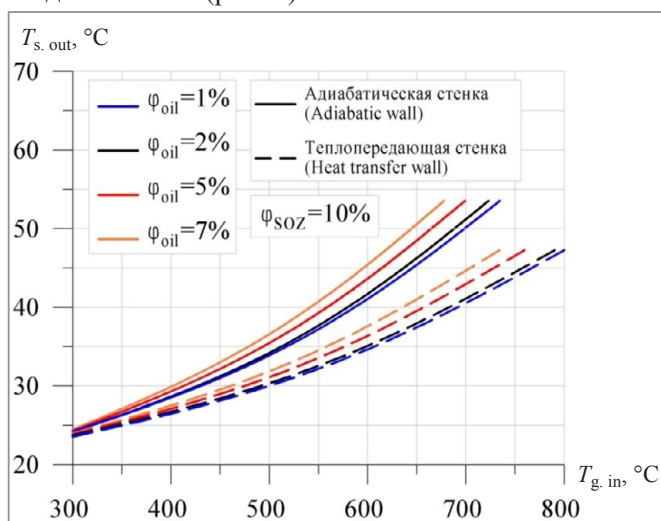


Рис. 3. Зависимость температуры стружки на выходе из зоны загрузки от температуры дымовых газов на входе

Установлено, что в процессе нагрева стружки в шнеке при интересующих условиях испарение СОЖ не происходит, соответственно в камеру газопламенного нагрева стружка поступает немного подогретой (< 100 °C) и с той же долей СОЖ. Чтобы не нагромождать программу, включая в основной код большое количество составных частей, создавая тем самым дополнительные циклы с итерациями, полученные зависимости были аппроксимированы полиномом 2-й степени и включены в программу расчета нагрева стружки в камере газопламенного нагрева как корреляция зависимости температуры стружки на входе от температуры выходящих дымовых газов.

Данные зависимости получены для двух вариантов граничных условий: с учетом и без учета теплообмена внешней стенки с окружающей средой. Чем выше температура дымовых газов, тем больше разница в результатах, полученных при разных постановках. По этой причине в последующих расчетах используются зависимости, учитывающие теплообмен с окружающей средой.

Выводы

1. Приведено описание устройства и принципа действия проходной муфельной печи горячего брикетирования стружко-порошковых дисперсий черных металлов. Отличительной особенностью данного устройства является наличие двух систем газопламенного и индукционного нагрева, в результате которого гарантированно обеспечивается достижение заданной температуры нагрева шихты при полном удалении жидкой фазы. Масляная компонента СОЖ используется для создания защитной углеводородной атмосферы, обеспечивающей безокислительный нагрев металла, а также получение углеродного покрытия, которое помимо защитных функций выполняет роль смазки в процессе горячего брикетирования. Последующее сжигание паров масла в топке печи приводит к значительной экономии природного газа. Печь, построенная по такому принципу, обладает наименьшими габаритами и наивысшими технико-экономическими характеристиками.

2. Расчетная схема печи разделена на три зоны: 1 – зона загрузки в печь; 2 – зона газопламенного нагрева; 3 – зона индукционного нагрева. Выполнено моделирование процесса нагрева стружки в зоне загрузки в печь. Получены зависимости температуры стружки на выходе из шнекового питателя от температуры дымовых газов на входе для массовой доли СОЖ в стружке 10% и различных долей масла. Установлено, что в процессе нагрева стружки в зоне загрузки фазовые превращения СОЖ не происходят, температура нагрева шихты не превышает 100 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов О. М., Литвинко А. А., Серeda В. Ю. Оценка качества горячепрессованных брикетов как вида шихтовых материалов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 48–55.
2. Дьяконов О. М., Литвинко А. А., Серeda В. Ю. Совершенствование технологии рециклинга отходов черных металлов в процессах их подготовки к металлургическому переплаву // Тр. 28-й Междунар. науч.-техн. конференции «Литейное производство и металлургия 2020, Беларусь». Минск, 2020. С. 45–52.
3. Дьяконов О. М., Серeda В. Ю. Безокислительный нагрев стружко-порошковых дисперсий черных металлов в углеводородной атмосфере // Литье и металлургия. 2021. № 4. С. 79–89.
4. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением. М.: Энергоатомиздат, 1991. 288 с.
5. Лисиенко В. Г. Зональная модель теплообмена при нагреве металла в пламенных печах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1972. № 8. С. 154–158.
6. Телегин А. С., Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г. Тепломассоперенос. М.: Металлургия, 1995. 400 с.
7. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

REFERENCES

1. D'jakonov O. M., Litvinko A. A., Sereda V. Ju. Ocenka kachestva gorjachepressovannykh briкетов kak vida shihtovykh materialov [Evaluation of the quality of hot-pressed briquettes as a type of charge materials]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 48–55.
2. D'jakonov O. M., Litvinko A. A., Sereda V. Ju. Sovershenstvovanie tehnologii reciklinga othodov chernykh metallov v processah ih podgotovki k metallurgicheskomu pereplavu [Improving the technology of recycling ferrous metal waste in the processes of their preparation for metallurgical remelting]. *Trudy 28-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2020. Belarus'» = Proceedings of the 28th International Scientific and Technical Conference "Foundry production and metallurgy 2020. Belarus"*. Minsk, 2020, pp. 45–52.
3. D'jakonov O. M., Sereda V. Ju. Bezokislitel'nyj nagrev struzhko-poroshkovykh dispersij chernykh metallov v uglevodorodnoj atmosphere [Oxidation-Free Heating of Chip-Powder Dispersions of Ferrous Metals in a Hydrocarbon Atmosphere]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 79–89.
4. Bloh A. G., Zhuravlev Ju. A., Ryzhkov L. N. *Teploobmen izlucheniem* [Heat transfer by radiation]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1991, 288 p.
5. Lisienko V. G. Zonal'naja model' teploobmena pri nagreve metalla v plamennykh pechah [Zonal model of heat transfer during metal heating in flame furnaces]. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija = Processings of high schools. Ferrous metallurgy*, 1972, no. 8, pp. 154–158.
6. Telegin A. S., Shvydkij V. S., Jaroshenko Ju. G. *Tplomassoperenos* [Heat and mass transfer]. Moscow, Metallurgija Publ., 1995, 400 p.
7. Miheev M. A., Miheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Jenergija Publ., 1977, 344 p.