



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-84-93>
УДК 669.054.8

Поступила 10.05.2023
Received 10.05.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СТРУЖКО-ПОРОШКОВЫХ ДИСПЕРСИЙ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОХОДНОЙ МУФЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ГОРЯЧЕГО БРИКЕТИРОВАНИЯ. СООБЩЕНИЕ 3

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

Разработаны численный алгоритм решения математической модели процесса нагрева металлической стружки в проходной муфельной печи, а также компьютерная программа, позволяющая производить расчет параметров тепло- и массопереноса. Численное моделирование выполнено для различных составов смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и производительности печи. Установлено, что оптимальная производительность печи высотой 3,5 м с точки зрения наивысшей энергоэффективности ее работы равна 500 кг стружки в час. Из проделанных расчетов и их анализа следует, что повышение производительности печи практически возможно путем варьирования не только режимными параметрами (мощность газовой горелки и индуктора), но и конструктивными (высота печи, площадь проходного сечения муфеля, количество горелок и их эффективное расположение относительно муфеля).

Ключевые слова. Стружка, печь, муфель, горелка, индуктор, нагрев, температура, газопламенный, индукционный, тепло- и массоперенос, модель, расчет, параметры, оптимизация.

Для цитирования. Дьяконов, О. М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 3 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Середина // *Литье и металлургия*. 2023. № 2. С. 84–93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-84-93>.

MODELING OF THE PROCESS OF HEATING OF CHIP-POWDER DISPERSIONS OF FERROUS METALS IN THE PASS-THROUGH MUFFLE FURNACE OF HOT BRIQUETTING. MESSAGE 3

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

It has been established that the optimal productivity of a 3.5 m high furnace in terms of the highest energy efficiency of its operation is 500 kg of chips per hour. It follows from the calculations and their analysis that it is practically possible to increase the productivity of the furnace by varying not only the operating parameters (power of the gas burner and inductor), but also the design parameters (furnace height, muffle flow area, number of burners and their effective location relative to the muffle).

Keywords. Chips, furnace, muffle, burner, inductor, heating, temperature, gas flame, induction, heat and mass transfer, model, calculation, parameters, optimization.

For citation. Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V. Ju. Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 3. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 84–93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-84-93>.

В работах [1, 2] была представлена физико-математическая модель процесса нагрева металлической стружки в проходной муфельной печи. В настоящей работе кратко остановимся на методике численного решения этой модели и проведем анализ результатов с целью оптимизации параметров нагрева и оборудования.

Нагрев стружки в муфеле индуктора

Цель данной задачи заключается в определении температуры и оптимальной высоты H_{in} муфеля 8 индуктора 7, а в последующем – электрических параметров индуктора (рис. 1). Условие задачи – полное удаление из стружки жидкой фазы и нагрев стружки до заданной температуры, а именно до 700–850 °С. Муфель индуктора является продолжением муфеля газопламенного отсека, его проходное сечение постоянно по высоте, имеет такие же размеры и такую же прямоугольную форму, но с радиусами закругления по углам (рис. 2). В центре муфеля, т. е. в области индукционного нагрева, отсутствует шнек.

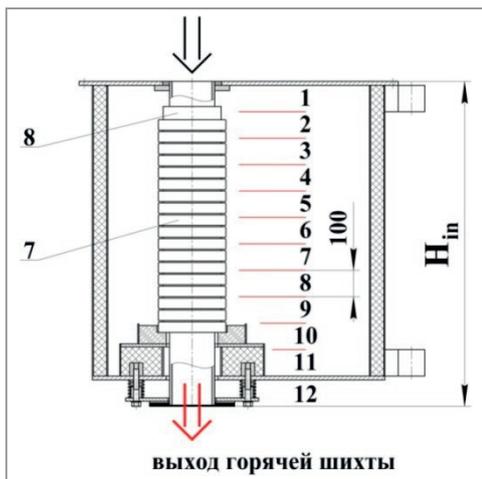


Рис. 1. Схема нагрева стружки в муфеле индуктора

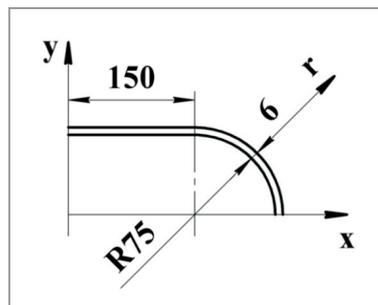


Рис. 2. Схема поперечного сечения муфеля индуктора (в симметрии)

Индукционный нагрев по своей природе является поверхностным, электромагнитный поток в глубине нагреваемого тела меньше потока на поверхности. В связи с этим в настоящей схеме нагрева в первую очередь будет нагреваться стальной муфель. Его температура устанавливается постоянной в пределах 850–900 °С и равномерно распределяется по высоте H_{in} . В самом дискретном пористом теле глубина нагрева увеличивается с ростом удельного сопротивления тела и понижается с ростом частоты тока, что позволяет определить необходимую частоту тока для нагрева тела на заданную глубину. Для ферромагнитных материалов, когда с ростом температуры увеличивается удельное сопротивление нагреваемого материала ρ , а при достижении точки Кюри значение относительной магнитной проницаемости падает от 100–50 до 1, глубина проникновения тока резко увеличивается, а поглощаемая мощность при этом снижается. Эффективность передачи энергии от индуктора к нагреваемому телу зависит также от величины зазора между ними и повышается при его уменьшении.

Таким образом, стружка в горячем муфеле преимущественно нагревается путем прямого контактно-теплообмена, а также в пространстве муфеля за счет радиационно-конвективного теплообмена с газами – парами масла. Нагрев металла под воздействием переменного электромагнитного поля «изнутри» в значительной степени способствует испарению и удалению масла с его поверхности. Применение такого интенсивного комплексного нагрева обеспечивает полную очистку стружки от остатков масла и других органических примесей, уменьшение габаритов, повышение производительности и КПД печи.

Испарение масла из СОЖ происходит в диапазоне температур 160–380 °С. Доля испаряющегося масла (доля от начального содержания) в зависимости от температуры определяется аппроксимирующей зависимостью:

$$x_{vapOil} = \frac{1}{2} \operatorname{th} \left[8 \left(\frac{T}{T_{vap}} - 1 \right) \right] + \frac{1}{2},$$

где $T_{vap} = 160$ °С. Вид данной корреляции (рис. 3) основан на данных, приведенных в [3].

Как и в задаче предварительного газопламенного нагрева [1, 2], применим зональную модель, т.е. для каждого элементарного участка зоны индукционного нагрева запишем нестационарное двумерное уравнение теплопроводности в декартовых и полярных координатах:

$$\begin{cases} x = R \cos \varphi + r, \\ y = R \sin \varphi. \end{cases}$$

Декартовы координаты выбраны для расчета температуры в прямоугольной области муфеля индуктора (см. рис. 2), полярные – для расчета температуры в его округлой области. Данный переход позволил существенно упростить модель путем исключения деления этой области на несколько частей с простой геометрией. Нестационарное двумерное уравнение теплопроводности принимает следующий вид:

$$(C_{p,s} \rho_s)_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{eff} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right), \tag{1}$$

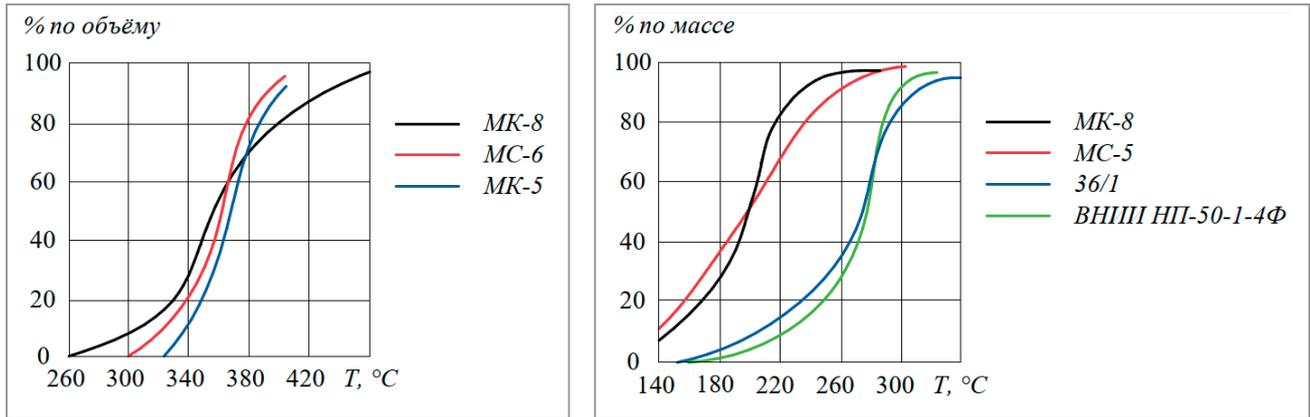


Рис. 3. Испаряемость (фракционный состав) некоторых нефтяных синтетических масел (% по массе и объёму) и синтетических масел в зависимости от температуры

$$\left(C_{p,s}\rho_s\right)_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{eff} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_s}{\partial \varphi^2} \right). \quad (2)$$

На границе нагревателя задается его температура, а на границе муфеля и стружки – тепловой поток через стенку. Соответственно граничные условия на стенке и оси симметрии муфеля запишем следующим образом:

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{\lambda_w}{d_w} (T_{heater} - T|_{r=R}) \quad \text{и} \quad \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=R} = \frac{\lambda_w}{d_w} (T_{heater} - T|_{y=R}), \quad (3)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad \text{и} \quad \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = 0. \quad (4)$$

Начальным условием для первого участка зоны индукционного нагрева (100 мм) является распределение температуры стружки (и степени конверсии топлива в случае неполного сгорания) на выходе из зоны газопламенного нагрева. Как и в предыдущей задаче, разностная аппроксимация дифференциальных уравнений теплопроводности реализуется методом конечных объемов. Численная реализация осуществляется методом переменных направлений. Схема расчетной сетки приведена на рис. 4.

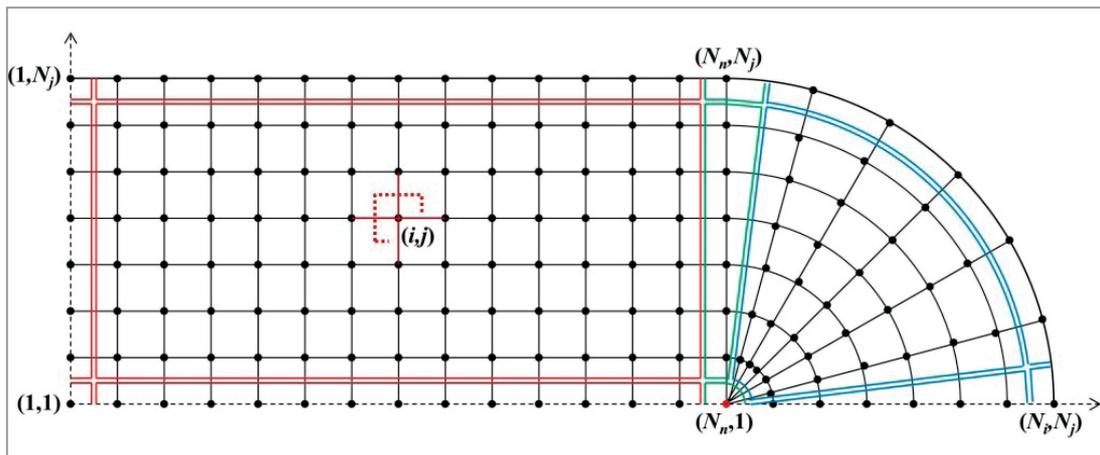


Рис. 4. Схема расчетной сетки в зоне индукционного нагрева

Результаты моделирования и оптимизация

Целью моделирования является повышение производительности и КПД печи, минимизация ее габаритных размеров, а также определение режимов работы, при которых на выходе из печи достигается заданная температура нагрева стружки при полном удалении СОЖ. На выходе из газопламенного отсека удаление воды должно быть полным, а масла (по данным экспериментального исследования) – с остатком не более 3%.

Рассмотрим порядок численного решения и проведем анализ результатов для оптимизации режимов нагрева. Изначально задаем все теплофизические свойства (плотность, теплоемкость, теплопроводность, степень черноты) в диапазоне температур 20–1000 °С для материалов, участвующих в процессе нагрева: стружки, муфеля, дымовых газов, шамотного кирпича и легковесного шамота, асбеста и стали, из которой изготовлен корпус печи. Задаем также начальную температуру стружки, температуру окружающей среды T_0 , температуру воздуха, подаваемого на горение, а также состав и теплофизические свойства СОЖ. Задаем приемлемые габариты газопламенного отсека печи $H_g = 1,7$ м и главный параметр – расход природного газа $G_g = 20$ м³/ч.

Далее алгоритмическая схема решения выглядит следующим образом.

1. Задаем линейный профиль температуры дымовых газов по высоте H_g . Вверху печи температуру дымовых газов ($T_{g,in}$) определяем термодинамическим расчетом по коэффициенту избытка воздуха, подаваемого в горелки, и по теплофизическим свойствам природного газа, воздуха и дымовых газов усредненного состава. Так, например, при $\alpha_{air} = 1,85$ $T_{g,in} \approx 1000$ °С.

2. Последовательно проходим все зоны печи сверху (со стороны загрузки стружки) донизу. Для каждой зоны выполняем операции 3–8.

3. Температуру наружной поверхности стенок печи в i -й зоне принимаем равной $T_{w,out}^{(i)} = T_0 + 20$, где $T_g^{(i)}$ – температура дымовых газов в i -й зоне.

4. Задаем диапазон температур для внутренней поверхности стенок печи в i -й зоне от $T_{w,in}^{(i)} = T_1 = T_g^{(i)} - 0,1$ до $T_{w,in}^{(i)} = T_2 = T_g^{(i)} - 100$.

5. Численно решаем задачу радиационно-конвективного теплообмена для заданной температуры внутренней поверхности стенки печи [2]. Температуру поверхности муфельной трубы при этом определяем итерациями по падающему потоку на основе уравнения переноса энергии в рабочем пространстве и муфеле печи. Методом половинного деления путем многократного решения задачи радиационно-конвективного теплообмена внутри печи находим температуру внутренней поверхности стенок $T_3 \in (T_1 - T_2)$, при которой суммарный тепловой поток, падающий на внутреннюю поверхность печи со стороны дымовых газов, положителен. Это необходимо для задания начальной точки по температуре стенки при решении задачи о распределении температуры в стенках печи в квазистационарном приближении. Данная задача имеет решение только при положительном потоке, падающем на поверхность стенки.

6. Решаем задачу о распределении температуры в стенках печи в квазистационарном приближении. Для этого методом половинного деления в диапазоне $T_3 - (T_3 + 100)$ °С путем многократного решения задачи радиационно-конвективного теплообмена определяем температуры внутренней и наружной поверхностей стенки печи, чтобы удовлетворить в первую очередь уравнению теплового поля в этой стенке. Точность расчета температуры составляет 0,01 °С. Из уравнений теплового поля находим также температуры на границах слоев в стенке печи. На каждом шаге температуру поверхности муфеля определяем по падающему тепловому потоку на основе соотношения температур его наружной и внутренней поверхностей.

7. Для найденных температур внутренней поверхности стенок печи, наружной и внутренней поверхностей муфеля решаем задачу радиационно-конвективного теплообмена во внутреннем пространстве печи и определяем суммарные тепловые потоки q_{in} , падающие на стружку в муфельной трубе.

8. Методом конечных элементов решаем нестационарную задачу теплопередачи в стружке. Время решения задачи зависит от времени пребывания стружки в отдельно взятой зоне печи, которое определяется отношением протяженности i -й зоны к скорости перемещения стружки в муфеле. Начальное распределение температуры стружки в i -й зоне определяем конечным распределением температуры в $(i-1)$ -й зоне.

9. После того как пройдены все зоны печи и в каждой из них определены тепловые потоки, падающие на муфель и стенки печи, а также распределение паров СОЖ по высоте печи, находим новый профиль температуры дымовых газов по высоте печи из решения системы уравнений зональной модели. Если максимальное отличие вновь найденного профиля температуры дымовых газов и предыдущего составляет более 5 °С, то вычисления повторяем, начиная с пункта 3. Для сходимости и устойчивости итераций для температурного профиля дымовых газов используем следующее выражение:

$$T_g^{(m+1)} = (1 - \xi)T_{g,2} + \xi T_g^{(m)},$$

где $T_g^{(m+1)}$ – температура дымовых газов в рассматриваемой точке на $(m+1)$ -й итерации; $T_g^{(m)}$ – температура дымовых газов в этой же точке на m -й итерации; $T_{g,2}$ – температура дымовых газов, полу-

ченная на m -й итерации; ξ – коэффициент корреляции. Обычно этот коэффициент выбирают в диапазоне $\xi = 0,1-0,2$.

В случае, когда необходимо найти расход газа, который обеспечивает прогрев стружки до заданной средней температуры (например, 700 °С), задаем диапазон расхода газа так, чтобы при меньшем расходе температура стружки на выходе из печи была меньше заданной, а при большем расходе – больше заданной. Если такой диапазон расхода газа задан, то искомым расход может быть найден методом половинного деления.

Описанная численная схема была реализована в виде компьютерной программы на языке Delphi 7. Отметим, что на процессоре Pentium 4 с тактовой частотой 2,8 ГГц расчет одной итерации (с заданным профилем температуры дымовых газов) занимает около 15 мин, для нахождения окончательного профиля температуры дымовых газов в зависимости от комбинации параметров требуется 5–20 итераций. Для нахождения оптимального расхода газа, обеспечивающего нагрев стружки до заданной температуры, необходимо выполнить расчет для 8–10 различных расходов газа.

В табл. 1 приведены результаты моделирования нескольких вариантов работы печи с параметрами $Q_{fur} = 250, 500, 750$ кг/ч, $G_g = 20$ м³/ч, расход природного газа на горелку $G_{CH_4} = 20$ м³/ч, массовая доля СОЖ в стружке $\psi_{COЖ} = 8-10\%$, массовая доля масла в стружке $\psi_{oil} = 1-3\%$, массовая доля воды в стружке $\psi_w = 7\%$, начальная температура стружки при входе в газопламенный отсек $T_0 = 90$ °С, плотность стружки $\rho = 1700$ кг/м³ (пористость 0,782), высота зоны газопламенного нагрева $H_g = 1,7$ м, высота индуктора 1 м, температура на поверхности муфеля индуктора 850 °С.

Таблица 1. Результаты расчета

Q_{fur} , кг/ч	C_{wat} , %	C_{oil} , %	T_{min} , °С	T_{max} , °С	T_{cp} , °С	x_{wat}	x_{oil}	T_{comb} , °С	η
750	0	0	301	997	466	0	0	1992	0,267
750	7	0	96	855	268	0,351	0	1992	0,272
750	7	1	95	569	186	0,472	0,675	1559	0,187
750	7	2	94	401	143	0,570	0,801	1287	0,134
750	7	3	93	302	122	0,648	0,902	1097	0,100
500	0	0	456	1107	618	0	0	1992	0,262
500	7	0	101	976	358	0,069	0	1992	0,269
500	7	1	97	751	274	0,247	0,473	1677	0,209
500	7	2	97	578	212	0,345	0,591	1453	0,164
500	7	3	96	455	172	0,428	0,695	1282	0,132
250	7	1	537	1085	676	0	0	1819	0,228
250	7	3	329	833	458	0	0,027	1551	0,179

Примечание. T_{min} – минимальная; T_{max} – максимальная; T_{cp} – средняя по сечению муфеля температура стружки; x_{wat} и x_{oil} – доля воды и масла от начального содержания на выходе из зоны газопламенного нагрева при разной производительности печи Q_{fur} для различного начального содержания воды C_{wat} и масла C_{oil} ; T_{comb} – температура сгорания природного газа с учетом горения паров масла; η – КПД зоны газопламенного нагрева.

На рис. 5, 6 приведено распределение содержания воды и масла в стружке, а также средней по сечению муфеля температуры стружки в зависимости от высоты в газопламенном отсеке печи при производительности печи 250 кг/ч. Из рисунков видно, что при данной производительности удаление жидкой фазы из стружки в газопламенном отсеке полное (рис. 5): $x_{wat} = 0$ и $x_{oil} = 0$. Значения температуры стружки на выходе при исходном содержании масла 1 и 3% соответственно равны 675 и 451 °С (рис. 6). Температуры газа, принимаемые в расчете как средние между температурами газа на входе и выходе, соответственно равны 1819 и 1551 °С. КПД для такой системы без учета индукционного нагрева составляет 17,9–20,4%.

Весьма характерным является то, что при увеличении содержания масла в стружке (в данном случае от 1 до 3%) температура нагрева стружки и КПД печи снижаются. Это вызвано тем, что процесс испарения масла требует значительных энергетических затрат, а времени для полного сгорания паров масла в газопламенном отсеке оказывается недостаточно. Масло испаряется, частично сгорает и частично уносится из печи в составе отходящих дымовых газов. Таким образом, при производительности печи 250 кг/ч в индукторе металл будет нагреваться практически при отсутствии защитного покрытия и защитной атмосферы, что недопустимо.

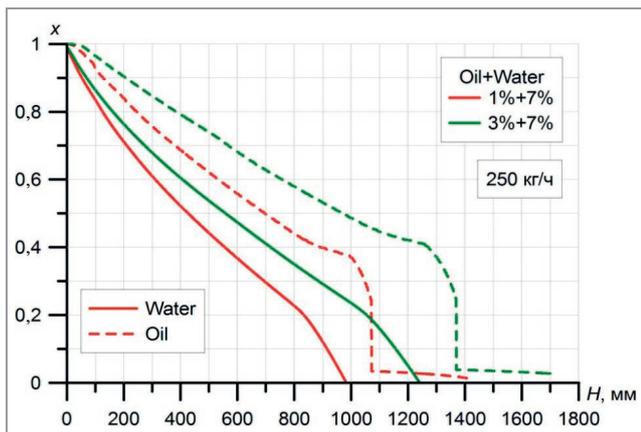


Рис. 5. Зависимость содержания масла и воды в стружке от высоты в зоне газопламенного нагрева при их разном начальном содержании ($Q_{fur} = 250$ кг/ч)

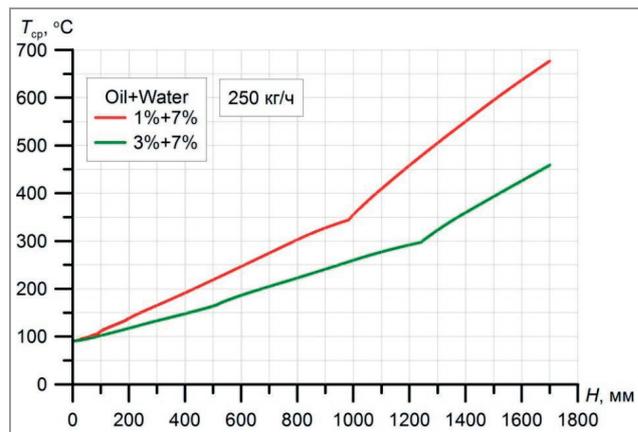


Рис. 6. Зависимость средней по сечению температуры стружки от высоты в зоне газопламенного нагрева при разном начальном содержании воды и масла ($Q_{fur} = 250$ кг/ч)

На рис. 7, 8 показано распределение содержания воды и масла в стружке, а также минимальной, максимальной и средней по сечению муфеля температуры стружки в зависимости от высоты в зоне газопламенного нагрева при различном содержании СОЖ и производительности печи 500 кг/ч. Из рисунков видно, что увеличение содержания масла в стружке от 1 до 3% существенно сдерживает процессы испарения воды и нагрева стружки. При отсутствии масла вода в газопламенном отсеке печи испаряется полностью, при увеличении его содержания от 1 до 3% количество испарившейся воды изменяется в пределах 75–57%. Соответственно снижается температура нагрева металла и повышается неравномерность нагрева по сечению муфеля: $T_{cp} \in 610 - 160$ °C, $T_{min} \in 450 - 90$ °C, $T_{max} \in 1100 - 450$ °C.

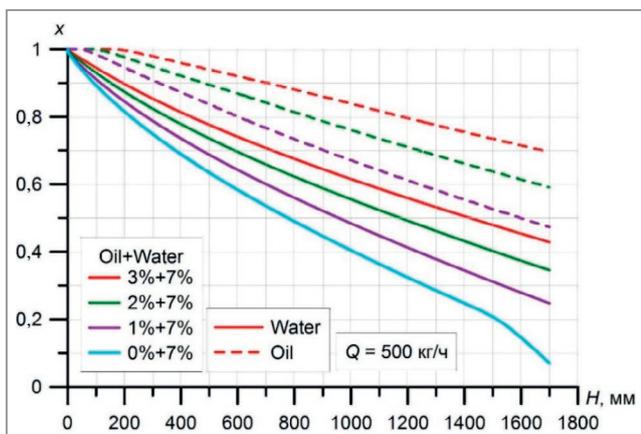


Рис. 7. Зависимость содержания масла и воды в стружке от высоты в зоне газопламенного нагрева при их разном начальном содержании ($Q_{fur} = 500$ кг/ч)

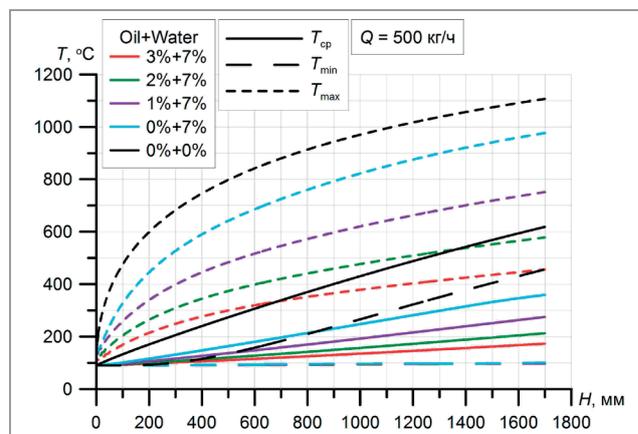


Рис. 8. Зависимость минимальной, максимальной и средней по сечению температуры стружки от высоты в зоне газопламенного нагрева при разном содержании воды и масла ($Q_{fur} = 500$ кг/ч)

Остаток воды в стружке, переходящий из газопламенного отсека в индукционный нагреватель, составляет 3%, масла – до 2%.

Дальнейшее повышение производительности печи до 750 кг/ч (рис. 9, 10), связанное с сокращением времени нагрева, приводит к совершенно неприемлемому остаточному содержанию воды в стружке (4,6%) и неэффективному нагреву металла: при средней температуре стружки на выходе из зоны газопламенного нагрева 100 °C минимальная температура составляет 90 °C, максимальная – 260 °C.

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее приемлемой и оптимальной является производительность печи, равная 500 кг/ч. Однако с целью полного удаления воды из стружки и повышения производительности требуется увеличение высоты газопламенного отсека до 2 м и проходного сечения муфеля при неизменной толщине прогреваемого слоя стружки. Соответственно кратному повышению производительности должно быть увеличено количество газовых горелок при их эффективном расположении относительно муфеля.

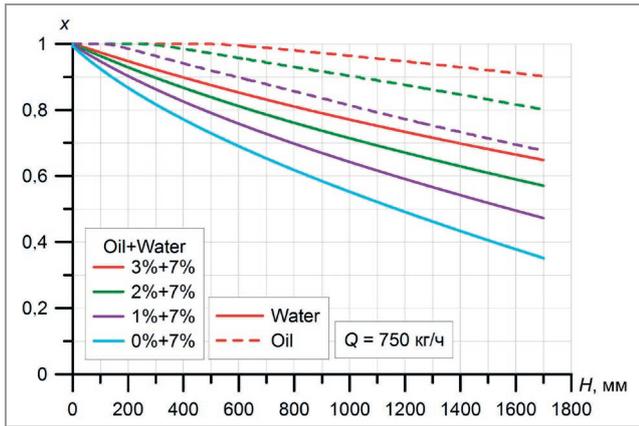


Рис. 9. Зависимость содержания масла и воды в стружке от высоты в зоне газопламенного нагрева при их разном начальном содержании ($Q_{fur} = 750$ кг/ч)

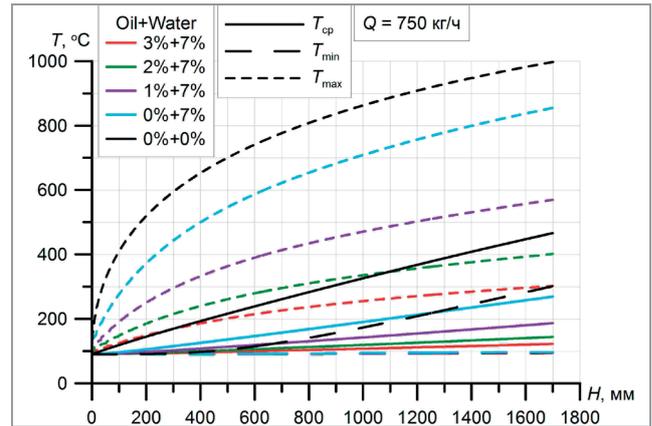


Рис. 10. Зависимость минимальной, максимальной и средней по сечению температуры стружки от высоты в зоне газопламенного нагрева при различном начальном содержании воды и масла ($Q_{fur} = 750$ кг/ч)

Численное решение в зоне индукционного нагрева

Теплопроводность стенки стального муфеля принималась равной $\lambda_w = 25$ Вт/(м·К). Поскольку выходное сечение муфеля газопламенного нагрева отличается от сечения муфеля индуктора, проводилась сшивка расчетной сетки на данной границе с учетом сохранения средней температуры стружки по сечению (рис. 11).

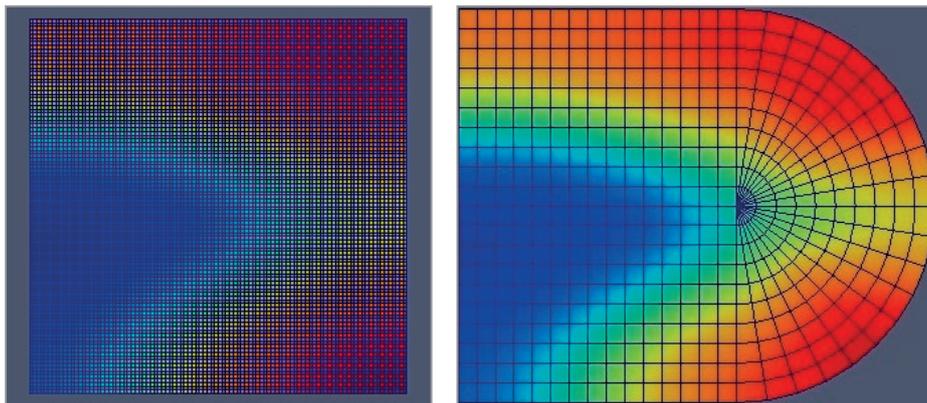


Рис. 11. Результат сшивки сечений муфеля газопламенного нагрева и муфеля индуктора

На рис. 12 показана зависимость средней по сечению температуры стружки от высоты муфеля индуктора при начальном содержании воды 7% и масла 1% в стружке для разной производительности печи. Стружка прогревается до необходимой температуры практически в середине муфеля. При

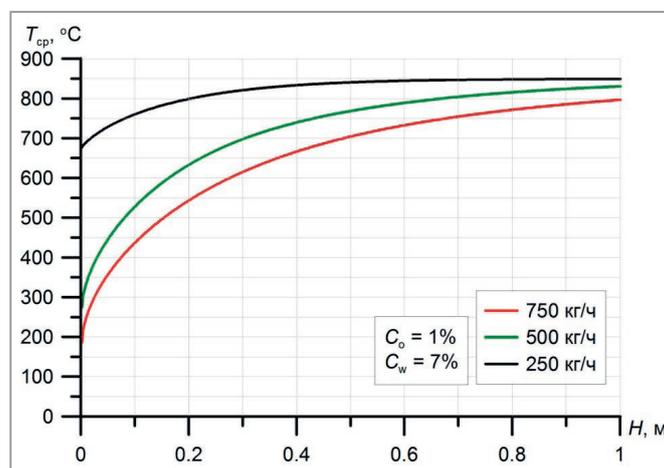


Рис. 12. Зависимость средней по сечению температуры стружки от высоты в зоне индукционного нагрева при начальном содержании воды 7% и масла 1% для разной производительности печи

температуре муфеля индуктора 850 °С и исходя из предположения, что все тепло от индуктора пошло на нагрев стружки (отсутствуют тепловые потери) КПД печи с учетом индукционного нагрева составит 23,4%. Очевидно, что индукционный нагрев нивелирует недостатки газопламенного нагрева при производительности печи 500 кг/ч. Тем не менее обозначенные выше требования к стружке, поступающей в индукционный нагреватель, должны выполняться. Как видно из рисунка, при входе в индуктор средняя температура стружки равна 300 °С.

На рис. 13, 14 показаны изображения полей температур и концентраций СОЖ в стружке в зонах газопламенного и индукционного нагрева с помощью цветовой гаммы при производительности печи 500 кг/ч.

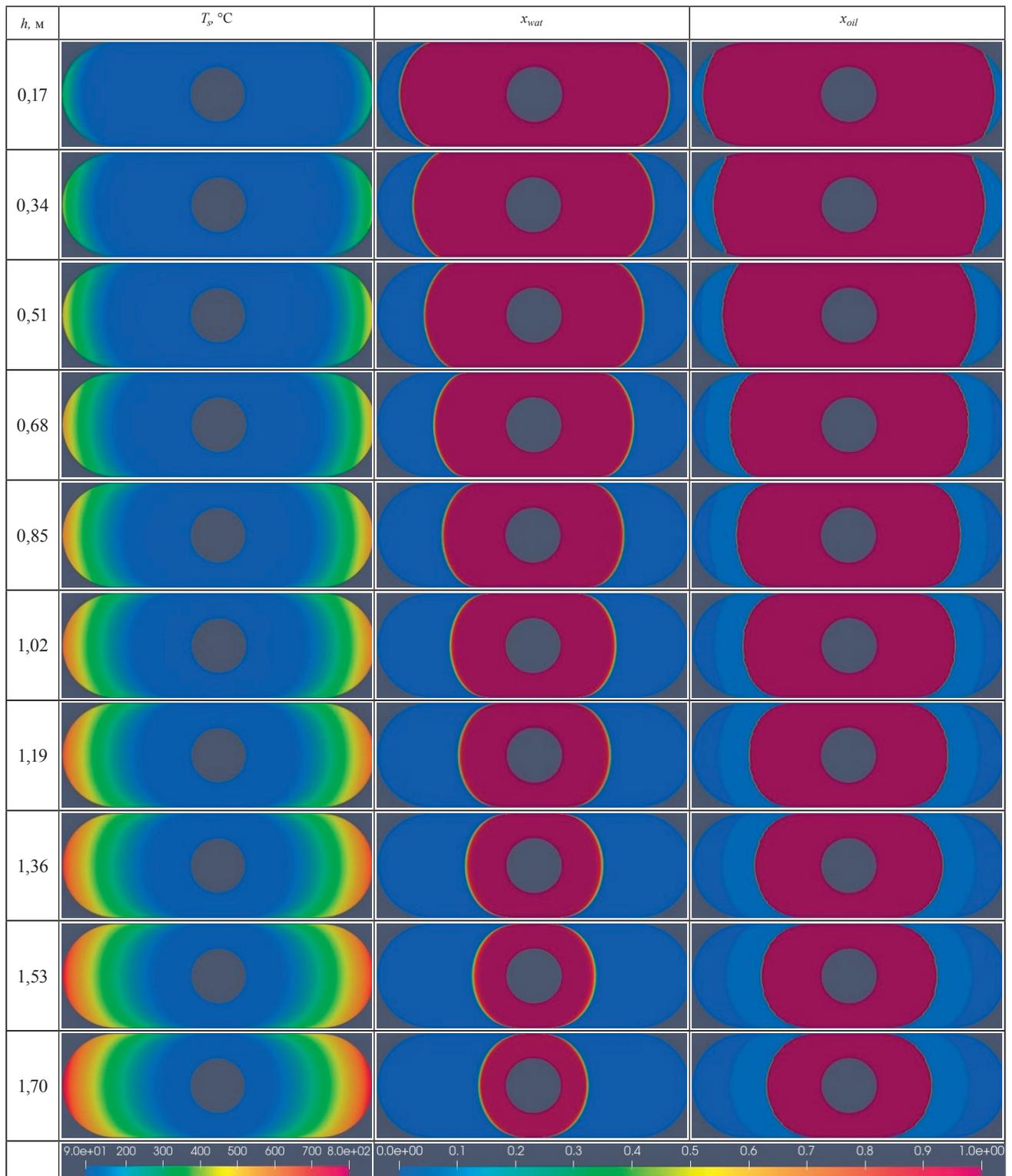


Рис. 13. Распределение температуры стружки T_s и долей воды x_{wat} и масла x_{oil} от начального содержания на разной высоте зоны газопламенного нагрева при производительности печи 500 кг/ч, начальном содержании воды 7% и масла 1%

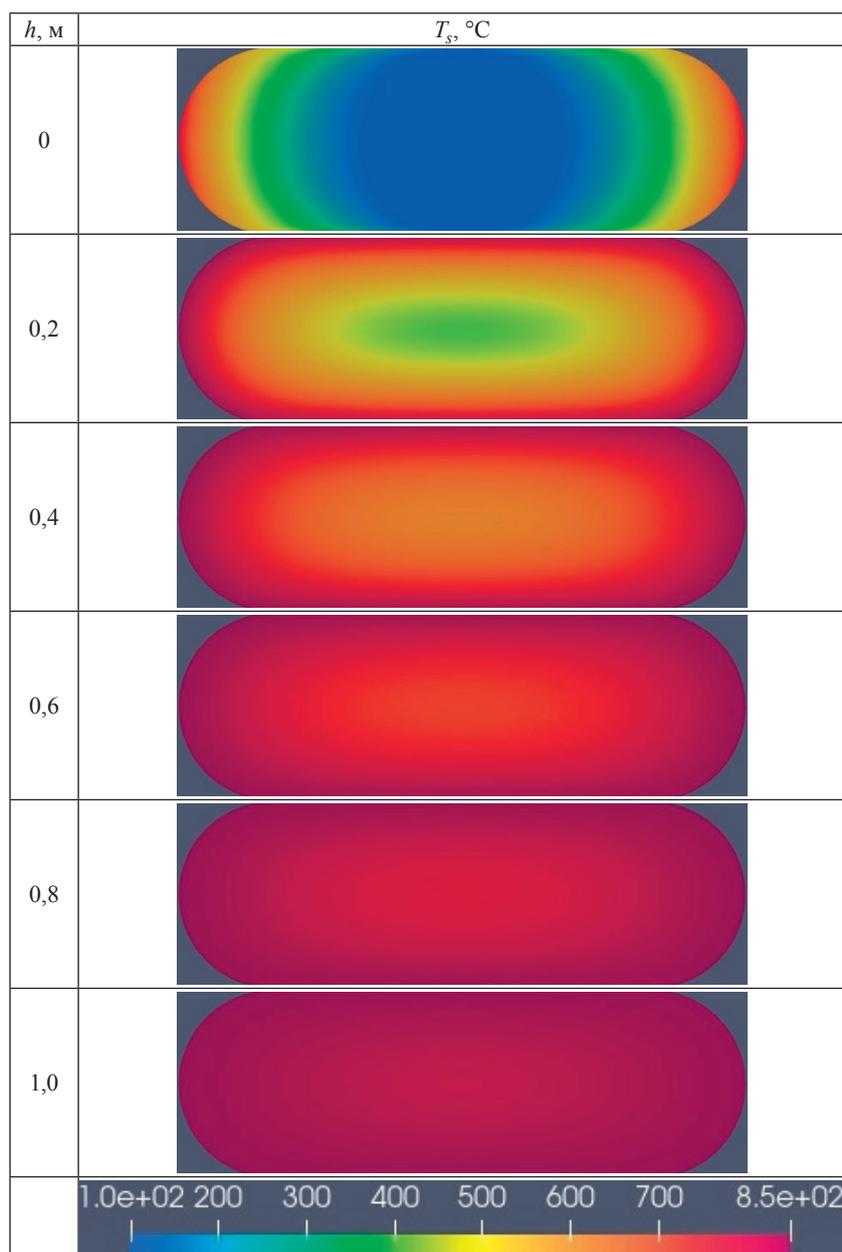


Рис. 14. Распределение температуры стружки в зависимости от высоты в зоне индукционного нагрева ($Q_{\text{fur}} = 500 \text{ кг/ч}$)

Таким образом, на основе поставленной задачи и сформулированной математической модели проведено моделирование процесса нагрева стружки в проходной муфельной печи. Согласно результатам моделирования, при использовании комбинации «газопламенный муфельный нагрев – индукционный нагрев» возможно достижение средней температуры стружки 700–850 °С при производительности печи 500 кг/ч. Из расчетов следует, что повышение производительности печи обеспечивается варьированием несколькими параметрами и не только режимными (мощность горелки и индуктора), но и конструктивными (высота муфеля газопламенного отсека и площадь его проходного сечения, количество газовых горелок и их эффективное расположение относительно муфеля).

Сопоставление расчетных данных с результатами натурных экспериментов на работающей установке показало, что предложенная и решенная математическая модель непрерывного нагрева стружки в проходной муфельной печи дает качественно правильную картину процесса и удовлетворительную для практики точность расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. Серeda // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 59–67.

2. Дьяконов, О.М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 2 / О.М. Дьяконов, А.А. Литвинко, В.Ю. Серeda // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 70–82.

3. Александров, В.Г. Авиационный технический справочник / В.Г. Александров, А.В. Майоров, Н.П. Потюков М.: Транспорт, 1973. 400 с.

REFERENCES

1. Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V. Ju. Modelirovanie processa nagreva struzhko-poroshkovykh dispersij chernyh metallov v prohodnoj mufel'noj pechi gorjachego briketirovaniya. Soobshhenie 1. [Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 1]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 59–67.

2. Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V. Ju. Modelirovanie processa nagreva struzhko-poroshkovykh dispersij chernyh metallov v prohodnoj mufel'noj pechi gorjachego briketirovaniya. Soobshhenie 2. [Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 2]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 70–82.

3. Aleksandrov V.G., Majorov A.V., Potjukov N.P. *Aviacionnyj tehniceskij spravochnik* [Aviation Technical Handbook]. Moscow, Transport Publ., 1973, 400 p.