

УДК 669.162.12:622.782:536.242

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБЖИГУ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ НА КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЕ

©2024 г. Б.П. Юрьев, В.А. Дудко

*Институт новых материалов и технологий, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России В.Н. Ельцина», Екатеринбург
E-mail: yurev-b@mail.ru*

Поступила в редакцию 9 марта 2023 г.

После доработки 28 ноября 2023 принята к публикации 15 декабря 2023

Выполнен анализ приведенного в литературе аналитического решения задачи о нагреве слоя материала движущимся газом. Установлено, что недостатком такого решения является постоянство теплофизических свойств материала и газа, а также коэффициента теплопередачи, что не позволяет учитывать их изменение в процессе нагрева слоя, а также различное развитие химических реакций. В реальных условиях в обжигаемых окатышах протекает комплекс физико-химических процессов: окисление магнетита, разложение карбонатов, образование новых химических соединений и др. Отмечается, что расчет окислительного нагрева железорудных окатышей основан на закономерностях передачи теплоты в неподвижном слое. При этом длительность нагрева слоя зависит от многих факторов и определяется в основном длительностью теплообмена между слоем окатышей и газом. Разработана методика расчета теплообмена в слое обжигаемых офлюсованных окатышей применительно к конвейерной машине. Достоинство методики состоит в том, что она позволяет проводить расчет окислительного обжига окатышей с учетом кинетики процессов, происходящих в окатышах при нагреве. С ее использованием можно определять температуры материала и газа в слое окатышей не только в начальный, но и в любой момент времени, что достигается использованием граничных условий и путем интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен в неподвижном слое. Причем теплофизические свойства газа и материала, а также коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи принимались в виде функций от температуры, а не постоянными, как отмечается в предлагаемых решениях аналогичной задачи. Полученные в работе результаты имеют большое практическое значение, так как позволяют проводить анализ влияния разных параметров обжига на степень завершенности процессов в слое и получать обожженные окатыши с требуемыми металлургическими свойствами, а также определять размеры зоны обжига и оптимальную длину конвейерной машины, а следовательно, и ее производительность.

Ключевые слова: теплообмен; обжиг; железорудные окатыши; дифференциальные уравнения; высота слоя; скорость фильтрации; теплофизические свойства; граничные условия; газ; коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи; конвейерная машина; зона обжига; производительность.

Раскрытие темы начнем с рассмотрения особенностей нагрева слоя магнетитовых офлюсованных окатышей. Степень завершенности процессов при обжиге окатышей в слое с перекрестным током теплоносителя определяется прежде всего длительностью теплообмена между материалом и газом. Ускорение процесса обжига может быть обеспечено лишь при интенсификации теплообмена в слое. Это подтверждается экспериментальными данными, из которых следует, что время, необходимое для процессов окисления

магнетита, разложения карбонатов, твердо- и жидкофазных процессов спекания [1–4], мало в сравнении со временем прогрева слоя. Поэтому время нагрева слоя окатышей до требуемых температур будет практически определять длительность процесса обжига в целом.

Расчет окислительного нагрева железорудных окатышей основан на закономерностях передачи теплоты в неподвижном слое, являющемся частным случаем теплообмена в перекрестном токе. Время нагрева слоя,

а следовательно, и производительность обжиговой машины конвейерного типа зависит от многих факторов [5], в числе которых теплофизические свойства и размеры окатышей, претерпевающих при обжиге разные превращения; расход и температура теплоносителя. В свою очередь, теплофизические свойства окатышей зависят от химического состава материала, способа приготовления окатышей, фазового состава, изменяющегося в процессе термической обработки. Наибольшее значение при этом имеет сложный вид зависимости кажущейся теплоемкости окатышей [5], рассматриваемой с учетом наложения протекающих при обжиге окатышей экзо- и эндотермических процессов. Все это оказывает влияние на скорость нагрева и характер температурных полей материала и газа. Как следует из работы [6], крупность и теплопроводность окатышей также влияют на скорость их нагрева.

Суммарное значение коэффициента теплопередачи k_F , учитывающее как внешнее, так и внутреннее тепловые сопротивления, приближенно может быть выражено для частиц сферической формы уравнением [7]:

$$k_F = \frac{\alpha_F}{1 + \frac{Bi}{5}}, \quad (1)$$

где α_F — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); Bi — критерий Био.

С учетом поверхности шаровых частиц в 1 м³ материала слоя можно определить объемный суммарный коэффициент теплопередачи k_V , Вт/(м³·К):

$$k_V = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_V} + \frac{R^2}{15(1-m)\lambda_M}}, \quad (2)$$

где α_V — коэффициент внешнего теплообмена, Вт/(м³·К); R — радиус окатыша, м; λ_M — теплопроводность окатышей, Вт/(м·К); m — порозность слоя, доли ед.

Величину α_V для слоя шаров находят из выражения

$$\alpha_V = \frac{6(1-m)}{2R} \alpha_F, \quad (3)$$

а величину α_F при $Re > 200$ определяют по формуле [8]

$$\alpha_F = 0,61 \frac{\lambda_\Gamma w_\Gamma^{0,67}}{R^{0,33} \nu^{0,67}}, \quad (4)$$

из которой видно, что коэффициент теплоотдачи зависит от размеров окатыша, скорости фильтрации газа w_Γ и теплофизических свойств теплоносителя (λ_Γ — коэффициент теплопроводности газа; ν — коэффициент кинематической вязкости).

Результаты лабораторных исследований и практика работы обжиговых машин конвейерного типа показывают, что оптимальный диаметр окатышей находится в пределах 13—16 мм [9]. Увеличение диаметра свыше оптимального снижает металлургические свойства окатышей, так как в них не успевают завершиться процессы окисления и спекания в нижней половине слоя. Уменьшение диаметра окатышей ниже оптимальной величины ухудшает газопроницаемость слоя, вследствие чего снижается скорость фильтрации и возрастает длительность нагрева слоя. Аналогичные пределы, хотя и обусловленные разными причинами, существуют и для всех остальных параметров и характеристик процесса обжига окатышей на конвейерных машинах. Например, изменение скорости фильтрации ограничено возможностями тягодутьевых средств и т.д. Поэтому поиск оптимального режима обжига окатышей при решении проблем теплообмена — задача сложная, а при решении проблем общего плана задача становится еще сложнее, так как изменение характера теплообмена влечет за собой изменение массообменных процессов окисления, спекания и в итоге качества обожженных окатышей. Для дальнейшего совершенствования технологии обжига окатышей возрастающую роль играют предварительные расчеты.

В статье рассмотрен вариант разработки методики расчета процесса теплообмена в слое обжигаемых офлюсованных магнетитовых окатышей, а также изложен подход к изучению влияния ряда параметров на интенсивность теплообмена в неподвижном слое.

Материалы и методика эксперимента. В работах [10, 11] дано аналитическое решение задачи о нагреве слоя материала движущим-

ся газом при произвольно заданных начальной температуре материала и изменении во времени температуры газа на входе в слой. При этом теплофизические свойства материала и газа, а также коэффициент теплопередачи приняты неизменными. Однако на процесс теплообмена, как уже отмечалось, существенное влияние оказывают изменение теплофизических свойств материала и газа и различное развитие химических реакций в массе окатыша в зависимости от температуры термической обработки материала. Для учета химических реакций обычно используется метод кажущейся теплоемкости [5], суть которого заключается в том, что источники (стоки) теплоты распределены равномерно по высоте слоя, постоянны во времени и включены в теплоемкость материала. Более строгим является расчет, в котором теплофизические свойства материалов учитывают кинетику протекания процессов, сопровождающих термическую обработку железорудных окатышей [12, 13]. Пример такого расчета применительно к обжигу офлюсованных железорудных окатышей на конвейерных машинах Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного комбината (ССГОКа) приведен ниже.

Согласно работе [10] процесс теплообмена между газом-теплоносителем, фильтрующимся через неподвижный слой, и материалом описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial h} = - \frac{k_V}{c_T w_0} (\vartheta - t); \quad (5)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{k_V}{(1-m)c_M \rho_M} (\vartheta - t), \quad (6)$$

где ϑ — температура газового потока, °C; t — температура материала в слое, °C; h — координата высоты, м; τ — координата времени, с; c_T — теплоемкость газа, кДж/(м³·°C); w_0 — скорость газового потока при нормальных условиях, м/с; m — порозность слоя, доли ед.; ρ_M — плотность материала, кг/м³; c_M — теплоемкость материала, кДж/(кг·°C).

Для условий работы зоны обжига конвейерной машины температуру газа над слоем (ϑ_0) можно считать постоянной и равной 1270 °C. Распределение температуры материала в слое на входе в зону обжига зависит

от условий работы зоны подогрева и является функцией высоты. Исходя из этого запишем краевые условия задачи:

$$\vartheta_0 = \vartheta_{h=0} = \text{const}, \quad t_{\tau=0} = t(h). \quad (7)$$

При определении средней по массе температуры нагреваемого материала использовали суммарное тепловое сопротивление, учитывающее как процессы теплообмена между нагреваемым телом и средой, так и внутреннее тепловое сопротивление, зависящее от индивидуальных свойств самого тела [8]. Коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности материала определяли по методике [10]. Теплофизические параметры газа и материала, а также скорость газового потока принимали в виде функций температуры

$$\begin{aligned} \lambda_T &= \lambda_T(\vartheta); \quad c_T = c_T(\vartheta); \quad \nu_T = \nu_T(\vartheta); \quad c_M = c_M(t); \\ \lambda_M &= \lambda_M(t); \quad w = w_0 \vartheta / 273, \end{aligned} \quad (8)$$

где λ_T , λ_M — соответственно коэффициенты теплопроводности газа и материала, Вт/(м·°C); ν_T — коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с.

Задачу решали методом конечных разностей, рассматривая температуры ϑ газа при переходе из точки $(i-1)$ в точку i по высоте слоя и изменение температуры t материала при увеличении длительности обработки от $(n-1)$ до n . Для определения температуры материала и газа в данной точке необходимо знать распределение этой температуры по высоте слоя в момент времени $\tau = 0$ и величину этих параметров на верхнем горизонте слоя $h = 0$ в любой текущий момент времени. Эти величины определяли из граничных условий и интегрирования независимых дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен в слое:

$$\vartheta_{i,n} = \vartheta_{i-1,n} - \frac{k_V z \Delta h}{4 \bar{c}_T w_0 + k_V \left[\Delta h + \frac{\bar{c}_T w_0 \Delta \tau}{(1-m) \bar{c}_M \rho_M} \right]};$$

$$t_{i,n} = t_{i,n-1} - \frac{\bar{c}_T w_0}{(1-m) \bar{c}_M \rho_M} \frac{\Delta \tau}{\Delta h} (\vartheta_{i,n} - \vartheta_{i-1,n}), \quad (9)$$

где ρ_M — плотность материала, кг/м³; $z = \vartheta_{i,n-1} + \vartheta_{i-1,n-1} + 2\vartheta_{i-1,n} - (t_{i-1,n-1} + t_{i-1,n} + 2t_{i,n-1})$.

Теплоемкость материала усредняли по формуле

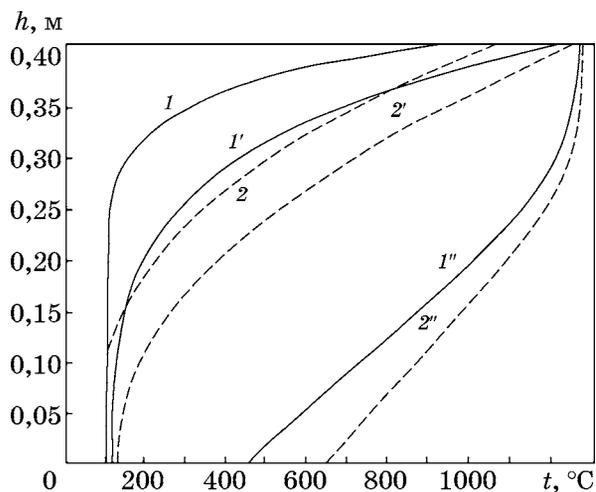
$$\bar{c}_M = (c_M t_{i,n} + c_M t_{i-1,n} + c_M t_{i,n-1} + c_M t_{i-1,n-1}) / 4.$$

Усреднение значений остальных теплофизических величин (\bar{c}_T , \bar{v}_T , $\bar{\lambda}_T$, $\bar{\lambda}_M$) проводили аналогично.

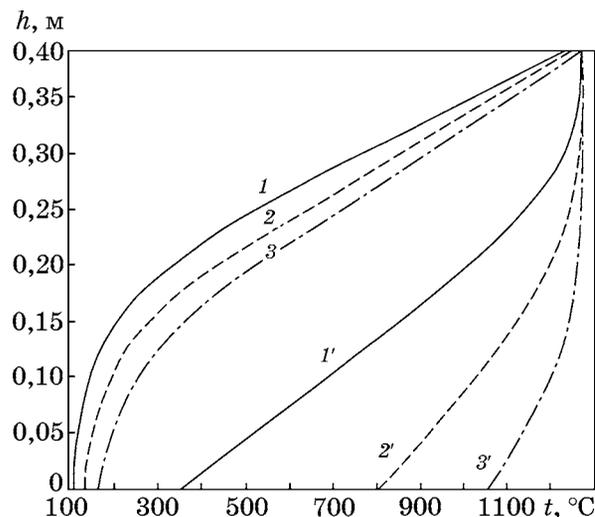
Систему уравнений (9) решали итерационным методом. Численное решение задачи выполняли на ЭВМ. Предварительное исследование схемы на устойчивость показало, что уменьшение шага по высоте на величину <10 мм, а во времени — <10 с целесообразно, так как при итерации точность счета $0,1$ °С является достаточной. Полученное решение использовали для анализа работы зоны обжига конвейерной машины в условиях ССГОКа. Температуру газа-теплоносителя в зоне обжига приняли равной 1275 °С. Момент окончания прогрева материала фиксировали по достижении нижним горизонтом слоя температуры 1100 °С.

Результаты исследований и их обсуждение. Расчеты с использованием формул (1)—(9) выполнены для двух вариантов начального распределения температур в слое окатышей на входе в зону обжига (фиг. 1, кривые 1, 2), полученных на основе теплотехнических исследований, связанных с изменением температур окатышей по высоте слоя на конвейерной машине ОК-108 ССГОКа. Из фиг. 1 видно, что при прочих одинаковых условиях начальное распределение температур существенно влияет на теплообмен в слое (различие в температурах нижних горизонтов через 5 мин достигает уже 200 °С). Понятной становится необходимость учета начального распределения температур газа и материала. Для нагрева слоя высотой $0,4$ м до температуры низа 1100 °С в первом случае (кривая 1) требуется $9,83$ мин, а во втором (кривая 2) — $8,92$ мин.

Анализ влияния скорости фильтрации газа-теплоносителя на распределение температуры в слое (фиг. 2) показывает, что с увеличением скорости фильтрации от $0,6$ до $1,5$ м/с (при заданной длительности обработки) процессы теплообмена заметно интенсифицируются. Так, если при скорости фильтрации $0,6$ м/с нижний горизонт прогрелся лишь до 350 °С, то при скоростях фильтрации $1,0$ и $1,5$ м/с температура этого горизонта повысилась соответственно до 800 и 1050 °С. Для того, чтобы нижний горизонт слоя высотой $0,25$ м (при такой высоте слоя ведут обжиг окатышей на конвейерных машинах) прогрелся до температуры 1100 °С при скорости фильтрации $0,6$ м/с (табл. 1) при первом



Фиг. 1. Распределение температуры в слое окатышей высотой h в зависимости от ее начального распределения по первому (1) и второму (2) вариантам на входе в зону обжига при длительности выдержки в указанных вариантах: $\tau = 1$ мин (1', 2') и 5 мин (1'', 2'') (скорость фильтрации слоя одинаковая: $w_{\phi} = 1,0$ м/с)



Фиг. 2. Расчетная зависимость температуры окатышей по высоте слоя h от скорости фильтрации газа-теплоносителя (второй вариант): 1—3 — для скоростей $0,6$; $1,0$; $1,5$ м/с, $\tau = 1$ мин; 1'—3' — для скоростей $0,6$; $1,0$; $1,5$ м/с, $\tau = 6$ мин

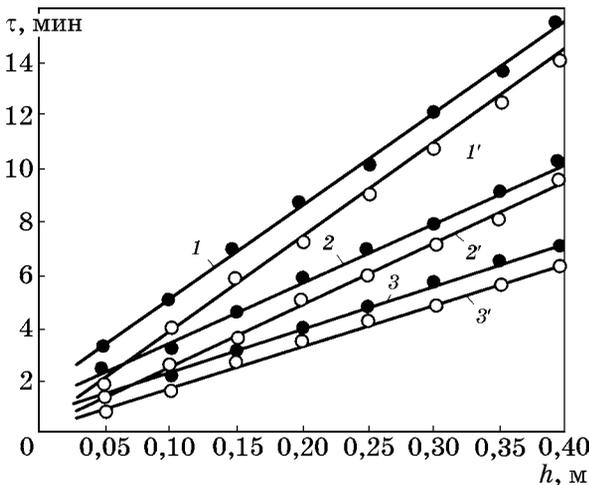
варианте начального распределения температур материала на входе в зону обжига, требуется $10,40$ мин, а при скоростях фильтрации $1,0$ и $1,5$ м/с — соответственно $6,65$ и $4,87$ мин. При втором варианте потребуется $9,0$; $5,9$ и $4,1$ мин.

Для большей наглядности и удобства пользования полученными результатами построен график (фиг. 3), из которого видно, что между высотой слоя и временем обработки окатышей при данной скорости фильтрации существует линейная зависимость, что позво-

Таблица 1

**Влияние скорости фильтрации слоя w_f и его высоты на
длительность обработки окатышей**

w_f , м/с	Время достижения нижним горизонтом слоя температуры 1100 °С, мин, при высоте слоя, м							
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Первый вариант								
0,6	3,01	5,17	6,85	8,82	10,40	12,00	13,65	15,30
1,0	2,04	3,52	4,47	5,61	6,65	7,68	8,80	9,83
1,5	1,54	2,57	3,38	4,05	4,87	5,53	6,18	6,98
Второй вариант								
0,6	2,05	3,98	5,85	7,20	9,00	10,80	12,22	13,90
1,0	1,49	2,00	3,60	4,90	5,90	6,98	7,95	8,92
1,5	1,02	1,97	2,90	3,50	4,12	4,96	5,57	6,28



Фиг. 3. Зависимость длительности прогрева слоя окатышей до температуры 1100 °С от высоты слоя и скорости фильтрации газа-теплоносителя 0,6; 1,0; 1,5 м/с (соответственно кр. 1—3 в первом варианте и кр. 1'—3' — во втором варианте)

ляет описать ее математически. Так, в работе [14] влияние высоты слоя на длительность термической обработки предложено аппроксимировать следующим выражением:

$$\tau = ah + b, \quad (10)$$

где a , b — постоянные коэффициенты, значения которых, рассчитанные для реальных условий, представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что для принятых выше условий расчета коэффициент a не зависит от скорости фильтрации слоя и определяется начальным (перед зоной обжига) распределением температуры материала.

Таблица 2

**Значения коэффициентов a и b в уравнении (10)
при разных значениях скорости фильтрации
в двух вариантах начального распределения
температуры материала**

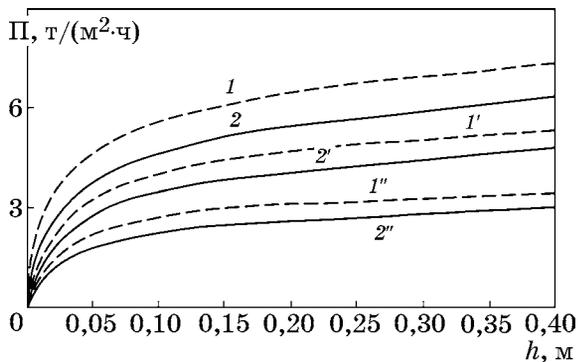
w_f , м/с	Первый вариант		Второй вариант	
	a	b	a	b
0,6	1,36	34,90	0,60	34,90
1,0	1,36	21,10	0,60	21,10
1,5	1,36	13,90	0,60	13,90

В свою очередь коэффициент b зависит от скорости фильтрации слоя и не зависит от изменения начального распределения температуры материала. Таким образом, коэффициенты a и b характеризуются разными параметрами процесса термической обработки окатышей в неподвижном слое.

При известной длительности термической обработки удельная производительность Π зоны обжига машины ленточного типа определяется [15] по формуле

$$\Pi = [h(1 - m)\rho_m 60] / \tau. \quad (11)$$

Расчет по соотношению (11) (фиг. 4) показывает, что при всех значениях скорости фильтрации газа с увеличением высоты слоя удельная производительность зоны обжига (производительность конвейерной машины, отнесенная только к площади зоны обжига) возрастает, особенно при малых значениях высоты слоя, вследствие меньшей длительности



Фиг. 4. Изменение удельной производительности зоны обжига конвейерной машины ОК-108 (ССГОК) в зависимости от высоты слоя и скорости фильтрации газа-теплоносителя: w_f — 1,5 м/с (кр. 1, 2), 1,0 м/с (кр. 1', 2') и 0,6 м/с (кр. 1'', 2'') соответственно для первого (кр. 1, 1', 1'') и второго (кр. 2, 2', 2'') вариантов

ности пребывания окатышей в зоне. При большой высоте слоя интенсификация процесса теплопереноса, а следовательно, и приращение производительности зоны резко замедляется. Так, при скорости фильтрации 0,6 м/с удельная производительность зоны обжига составляет для второго варианта при высоте слоя 0,25 м — 2,7, а при скоростях 1,0 и 1,5 м/с соответственно 4,2 и 5,6 т/(м²·ч). При увеличении высоты слоя до 0,4 м производительность для этого же случая составит 3,0; 4,8 и 6,3 т/(м²·ч). Эти данные (при существующих в настоящее время скоростях фильтрации слоя, близких к 0,6 м/с) удовлетворительно совпадают с эксплуатационными показателями работы промышленных

обжиговых машин. Более точные значения удельной производительности зоны обжига приведены в табл. 3.

Для большей наглядности использования полученных результатов рассмотрим пример по определению длины зоны обжига конвейерной машины ОК-108, если при существующих режимах эксплуатации (в случае нормально работающей машины) скорость движения ленты составляет 1,5—2,5 м/мин, высота слоя $h = 0,25$ м. Скорость фильтрации газа и температура газа-теплоносителя составляют соответственно 1 м/с и 1275 °С. Процесс нагрева считается законченным по достижении нижним горизонтом слоя окатышей температуры 1100 °С.

Из табл. 1 для высоты слоя $h = 0,25$ м и $w = 1$ м/с длительность обработки окатышей в зоне обжига для второго варианта составит 5,90 мин. Таким образом, длина зоны обжига для скоростей движения ленты 1,5; 2,0; 2,5 м/мин соответственно составит 8,85; 11,80; 14,75 м. При ширине ленты 2 м площадь зоны обжига составит 17,70; 23,60 и 29,50 м². Из табл. 3 находим удельную производительность зоны обжига для рассматриваемого случая, которая равна 4,43 т/(м²·ч). Зная ее, найдем производительность зоны обжига. Для площадей 17,70; 23,60 и 29,50 м² она составит соответственно: 78,41; 104,55 и 130,69 т/ч.

Выводы. 1. С использованием численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен

Таблица 3

Зависимость удельной производительности зоны обжига от высоты слоя и скорости фильтрации

w_f , м/с	Удельная производительность зоны обжига, т/(м ² ·ч), при высоте слоя, м							
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Первый вариант								
0,6	1,89	2,21	2,50	2,59	2,74	2,85	2,92	2,98
1,0	2,79	3,24	3,83	4,06	4,29	4,45	4,53	4,64
1,5	3,70	4,44	5,06	5,63	5,85	6,18	6,46	6,53
Второй вариант								
0,6	2,78	2,86	2,92	3,17	3,20	3,22	3,26	3,28
1,0	3,42	3,53	3,84	4,15	4,43	5,11	5,20	5,32
1,5	5,59	5,79	5,90	6,51	6,89	6,92	7,16	7,26

между газом-теплоносителем, фильтрующим через неподвижный слой, и материалом, усовершенствована методика расчета температурных полей в газе и материале.

2. Достоинство методики состоит в том, что она позволяет проводить расчет окислительного обжига офлюсованных окатышей с учетом кинетики процессов, происходящих в окатышах при нагреве.

3. Методика также позволяет учитывать начальное распределение температуры материала в слое и влияние параметров термической обработки на степень завершенности процессов в слое, а также вычислять оптимальную длину зоны обжига на конвейерной машине, которая определяет в целом ее производительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yur'ev, B.P.* Oxidation of iron-ore pellets / B.P. Yur'ev, N.A. Spirin // *Steel in Translation*. 2011. V.41. P.400—403.
2. *Readman, P.W.* Oxidation processes in titanomagnetites / P.W. Readman, W.O. Reilly // *Z. Geophys.* 1971. Bd.37. №3. S.329—338.
3. *Абзалов, В.М.* Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин [и др.]. — Екатеринбург : МИЦ, 2015. 335 с.
4. *Плотников, С.В.* Механизм фазовых превращений при окислительном обжиге промышленных окатышей из концентратов руд железистых кварцитов / С.В. Плотников, А.С. Бормотов // *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 2011. №3. С.29—32.
5. *Юрьев, Б.П.* Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин, О.В. Матюхин, О.Ю. Пешуков. — Екатеринбург : ООО «УИПЦ», 2014. 180 с.
6. *Швыдкий, В.С.* Физика. Теплопроводность. Конвекция / В.С. Швыдкий, Б.П. Юрьев, Ю.Г. Ярошенко, В.И. Матюхин. — Екатеринбург : Изд. УрФУ, 2010. 91 с.
7. *Братчиков, С.Г.* Теплотехника окускования железорудного сырья / С.Г. Братчиков, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский [и др.]. — М. : Металлургия, 1975. 208 с.
8. *Китаев, Б.И.* Теплообмен в доменной печи / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Б.Л. Лазарев. — М. : Металлургия, 1966. 355 с.
9. *Юрьев, Б.П.* Разработка технологий для производства железорудных окатышей с высокими металлургическими свойствами / Б.П. Юрьев, Н.А. Спириин, О.Ю. Пешуков [и др.]. — Нижний Тагил : Изд. НТИ (филиал) УрФУ, 2018. 172 с.
10. *Тимофеев, В.Н.* Закономерности нагрева неподвижного слоя / В.Н. Тимофеев, Ф.Р. Шкляр, М.В. Раева // В сб. науч. тр. ВНИИМТ. — М. : Металлургия, 1970. №23. С.180—194.
11. *Базилевич, С.В.* Теплотехнические расчеты агрегатов для окускования железорудных материалов / С.В. Базилевич, В.М. Бабошин, Я.Л. Белоцерковский [и др.] — М. : Металлургия, 1979. 208 с.
12. *Юрьев, Б.П.* Изучение кинетики процессов при обжиге железорудных окатышей / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев // *Зав. лаб. Диагностика материалов*. 2017. Т.83. №3. С.33—36.
13. *Юрьев, Б.П.* Исследование кинетики окисления офлюсованных железорудных окатышей / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.А. Дудко // *Сталь*. 2017. №5. С.10—15.
14. *Ярошенко, Ю.Г.* Метод теплового расчета при обжиге офлюсованных окатышей / Ю.Г. Ярошенко, С.В. Базилевич, С.Г. Братчиков // *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 1963. №10. С.22—29.
15. *Юрьев, Б.П.* Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей / Б.П. Юрьев, Л.Б. Брук, Н.А. Спириин [и др.]. — Нижний Тагил : Изд. НТИ (филиал) УрФУ, 2018. 310 с.