

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»  
Российская академия естественных наук

**ВЕСТНИК  
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

*Сборник научных трудов*

*Издается с 1994 г. ежегодно*

Выпуск 38

Москва  
Новокузнецк  
2017

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

**В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии:** Сборник научных трудов. Вып. 38 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянецв (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2017 – 230 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 45, табл. 28, библиогр. назв. 222.

*Редакционная коллегия:* Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянецв М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., НИ ИрГТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спиринов Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., АО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ  
АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

Базайкин В.И.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Галевский Г.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Деев В.Б.	д-р техн. наук, проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Дорофеев В.В.	д-р техн. наук, АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк
Козырев Н.А.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Оршанская Е.Г.	д-р пед. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Руднева В.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Селянин И.Ф.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Темлянцев М.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк

## Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	7
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....	8
<i>Чжан Кэ</i>	
Проектно-исследовательский институт цветной металлургии Китая: научно-технологический потенциал, проектирование, строительство, инжиниринг, рециклинг горно-металлургических, энергетических и водохозяйственных объектов .....	9
<i>И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, И.Т. Амонов, Н.Р. Эсанов</i>	
Влияния щелочноземельных металлов на анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe в нейтральной среде .....	13
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ технических решений, направленных на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании .....	22
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ технических решений, направленных на организацию предварительного влагоудаления на участке окомкования в производстве железорудных окатышей .....	30
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ технических решений, направленных на управление процессом зародышеобразования в производстве окатышей, основанном на принудительном зародышеобразовании .....	37
<i>В.Б. Деев, Е.С. Прусов, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева</i>	
Влияние железа на характер кристаллизации, литейные и механические свойства заэвтектического силумина .....	43
<i>М.В. Темлянец, К.С. Коноз, О.В. Кузнецова, Э.Я. Живаго, В.Я. Целлермаер</i>	
Исследование высокотемпературного окисления рессорно-пружинной стали марки 40С2 и особенностей строения ее окарины .....	48
<i>А.А. Уманский, В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, А.В. Добрянский</i>	
Совершенствование режимов прокатки острых рельсов на универсальном рельсобалочном стане .....	55
<i>Е.С. Прусов, В.Б. Деев</i>	
Перспективы применения ультразвука при вводе наночастиц в алюминиевые расплавы .....	64
<i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев, С.Н. Кратько, Р.Е. Крюков</i>	
Поиск оптимальных технологических параметров режима работы рельсосварочной машины К1000 .....	70
<i>Р.А. Шевченко, С.Н. Кратько, П.Е. Шишкин, Н.А. Козырев, В.И. Базайкин</i>	
Применение методов математического моделирования для оптимизации технологических параметров процесса контактной сварки рельсов на машине К1000 .....	76
<i>Р.А. Шевченко, В.И. Базайкин, С.Н. Кратько, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев</i>	
Анализ токового режима работы сварочной машины К1000 при сварке рельсов на этапе оплавления .....	81
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	88
<i>Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева</i>	
Термодинамическое моделирование плазмосинтеза карбида циркония .....	89
<i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова</i>	
Исследование механизма плазмосинтеза диборида титана .....	97

вания / В. М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 6. – С. 9 – 13.

5. Павловец. В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 6. – С. 15 – 20.

УДК 669. 162. 12:622

В.М. Павловец

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

#### АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ОРГАНИЗАЦИЮ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ВЛАГОУДАЛЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ОКОМКОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

В работе проанализированы технические решения, направленные на организацию предварительного влагоудаления на участке окомкования в производстве железорудных окатышей.

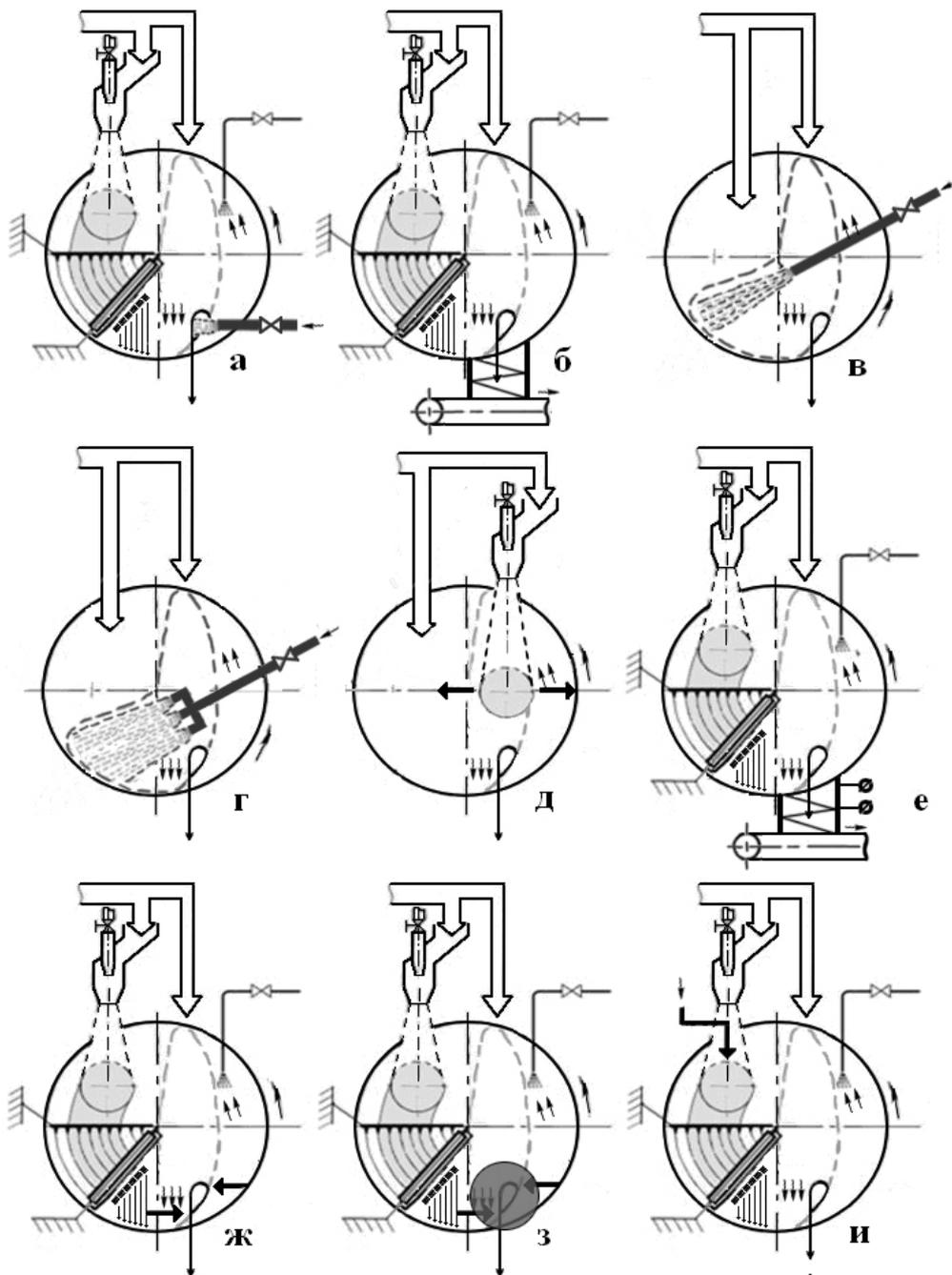
Technical solutions aimed at the organization of preliminary moisture removal at the pelletizing site in the production of jelly-ore pellets are analyzed.

Получение сырых окатышей на тарельчатом окомкователе по технологии принудительного зародышеобразования включает формирование зародышей по форме, близкой форме куба в холостой зоне тарели методом напыления и создание оболочки окатышей их доокомкованием в рабочей зоне окомкователя в режиме переката [1, 2]. Эта технология экспериментально опробована в лабораторных условиях и позволяет получать окатыши с дифференцированным распределением пористости по его сечению с более высокой удельной производительностью. Благоприятным сопутствующим процессом этой технологии является влагоудаление из зародышей, которые в процессе их доокомкования, располагаясь в центре гранулы, формируют окатыши с пониженным содержанием влаги уже на стадии окомкования. Практика этой технологии позволяет одновременно с окомкованием организовать предварительное влагоудаление (ПВУ) в циркуляционной зоне комкуемого слоя на тарели окомкователя или на стадии выгрузки окатышей из окомкователя. Подход к тарельчатому окомкователю

как к низкотемпературному тепловому агрегату заключается в использовании струйной тепловой обработки (СТО) для напыления шихты в технологии принудительного зародышеобразования и для обработки слоя влажных окатышей на заключительной стадии окомкования, либо при транспортировке окатышей к обжиговому агрегату [1, 2].

Целью работы является анализ технических решений, позволяющих организовать предварительное влагоудаление на участке окомкования в производстве железорудных окатышей, опирающихся как на принудительное зародышеобразование (ЗНД) и напыление шихты на зародыши (ЗОН), так и на действующую технологию капельного зародышеобразования и окомкования шихты в режиме переката (ЗО).

Экспериментальные схемы, реализующие процесс предварительного влагоудаления (ПВУ), показаны на рисунке 2. Они были оформлены автором в виде объектов интеллектуальной собственности. На их основе были построены физические модели в масштабе 1:10, в которых окомкователь имел диаметр  $D=0,62$  м, работал с частотой вращения 12 об/мин, а угол наклона тарели составлял  $45^\circ$ . Расход шихты на зародышеобразование составлял 0,05 кг/с. Расход сжатого воздуха давлением 0,2 МПа и температурой 100-150 °С составлял 0,2 м<sup>3</sup>/мин. Окомкователь работал в нескольких режимах: по технологии принудительного зародышеобразования ЗНД (рисунок 1, схемы а, б, е, ж, з, и), в режиме капельного зародышеобразования и формирования оболочки окатышей в режиме напыления шихты ЗОН (рисунок 1, схема д) и по схеме получения окатышей в режиме капельного зародышеобразования и окомкования шихты в режиме переката ЗО (рисунок 1, схема в, г). Окатыши для анализа эффективности экспериментальной схемы отбирали после СТО в количестве 0,5 кг, для которых определяли влажность  $W_{ок}$  стандартным методом ( $t=105$  °С,  $\tau=30$  минут), и которую сравнивали с влажностью загружаемой шихты ( $W_{ш}$ ), определяя коэффициент безразмерной влажности  $\theta_w$  ( $\theta_w = W_{ок}/W_{ш}$ ). Сложность экспериментальной схемы определяли по количеству конструктивных элементов схемы, налипанию шихты на детали схемы, по появлению отказов и затруднений в работе при визуальном наблюдении за процессом. Выход годного (ВГ) являлся сопутствующим показателем. Численное значение выхода годного вычисляли по разности между массой загружаемой шихты и массой образовавшейся мелочи фракции  $\leq 5$  мм в течение определенного цикла зародышеобразования и доокомкования (5 минут). При определении ВГ учитывали, что годные окатыши имели размер 12-16 мм, а их прочность составляла более 0,5 кг/окатыш. Важной характеристикой технологических схем, приведенных на рисунке 1, является режим работы устройства. Если процесс ПВУ протекает одновременно с зародышеобразованием и окомкованием, то режим работы окомкователя совмещенный. Если в процессе работы окомкователя развивается сначала зародышеобразование и окомкование, а затем ПВУ, то режим работы условно назван прямым



Схемы ПВУ : а – струей нагретого воздуха в зоне циркуляции (патент РФ №2236472), б – тоже на участке разгрузки окатышей (патент РФ №2241048), в – тоже в холостой зоне (а.с. СССР №1747517), г – тоже многоструйной струей (патент РФ №2155239), д – одной ВШС в челночном режиме работы (патент РФ №2270875), е – ультразвуковым излучателем на участке разгрузки (а. с СССР №1678866), ж – барботированием слоя окатышей двухструйной струей воздуха в зоне циркуляции (а.с. СССР №1705374), з – тоже с экранированием зоны барботирования и циркуляции (а.с. СССР №1719049), и – пористым поглотителем влаги (патент РФ №2280085)

Рисунок 1 – Технологические схемы, позволяющие организовать предварительное влагоудаление на участке окомкования

последовательным. Для выбора наиболее эффективной технологической схемы необходимо учитывать весь комплекс показателей, к которым можно отнести характер распределения пористости, размеры и форму пор, возможности влиять на коэффициент смятия зародышей, эффективность напыления влажной шихты на ШГ и другие показатели, которые трудно учесть в рамках предлагаемой работы. В настоящей статье ограничились основными параметрами (режим работы, сложность схемы, выход годного, относительное влагоудаление), которые непосредственно связаны с режимом ПВУ на участке окомкования. Характеристика технологических схем и результаты выполненных экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика технологических схем и результаты экспериментов

№ технологической схемы (рис. 1)	Показатели работы устройства			
	Режим работы	Сложность схемы	Выход годного, %	$\theta_w$
а	Прямой последовательный	Простая	91,5	0,85
б	Прямой последовательный	Сложная	96,2	0,81
в	Совмещенный	Простая	94,4	0,97
г	Совмещенный	Простая	94,1	0,97
д	Совмещенный	Сложная	92,8	0,88
е	Прямой последовательный	Сложная	96,3	0,81
ж	Прямой последовательный	Простая	92,1	0,84
з	Прямой последовательный	Простая	92,5	0,84
и	Совмещенный	сложная	96,6	0,80

Процесс предварительного влагоудаления по схеме (а) организован с помощью СТО циркуляционной нагрузки окомкователя. Эта схема отличается универсальностью, поскольку применима для всех перспективных технологий получения окатышей: технологии принудительного зародышеобразования (ЗНД), технологий напыления влажной шихты на комкующиеся материалы (ЗОН, ЗОНД) так и для действующей технологии (ЗО) [1, 2]. Для тарельчатого окомкователя циркуляционная нагрузка – это кондиционные окатыши диаметром 14-16 мм, движущиеся по спиралеобразной траектории на поверхности слоя перед разгрузкой на транспортную ленту [1,3]. Это наиболее простая в аппаратурном исполнении схема пред-

варительного влагоудаления, которая одновременно осуществляет наклеп поверхности (упрочнение) окатышей и срыв с её поверхности слабосвязанных частиц. Суть технологии заключается в термической обработке влажных окатышей струей воздуха, нагретого до 100 °С. При этом кондиционные окатыши динамическим давлением струи искусственно задерживаются на поверхности циркуляционного слоя в течение 5-15 с и обеспечивают частичное влагоудаление с поверхности окатышей. В этой технологии возможно применение большого числа управляющих воздействий на процесс ПВУ: скорость воздуха и его температура, угол атаки в двух плоскостях, количество струй (позиция ж), установка отражающего экрана (позиция з) и другие. Если окомкователь при этом работает в режиме ЗНД, то кондиционные окатыши имеют пониженное влагосодержание в центральной части гранулы, а СТО обеспечивает влагоудаление на поверхности окатышей, что позволяет получить окатыши с равномерным распределением влаги по сечению. Меньший результат дает применение СТО для окатышей, полученных по технологии ЗОН, у которых влажность поверхностного слоя ниже влажности центральных слоев.

Схема (б) включает установку контактного спиралеобразного теплообменника на участке разгрузки готовых окатышей из тарели окомкователя на транспортерную ленту. Эта схема более сложная по сравнению со схемой (а), но более автономная, поскольку не нарушает процесс окомкования на заключительном этапе технологии, что позволяет повысить ВГ с 91,5 до 96,2 %. Поэтому здесь возможно повысить температуру теплоносителя  $t$  до 200-250 °С и его скорость  $v$  в противоточном режиме движения до 30-50 м/с. Достоинством является более протяженный путь движения окатышей по спиралеобразному каналу диам. 0,05 м и длиной до 6,0 м и, соответственно, более высокая длительность СТО (до 30 с). В процессе СТО стенки канала нагреваются до 50 °С, что также способствует повышению эффективности влагоудаления. Эксперименты, проведенные на спиралеобразном резиновом теплообменнике ( $t=150$  °С,  $v=30$  м/с), показали возможность удаления до 1,5 % ( $\theta_w = 0,81$ ) влаги. Недостатком схемы (б) является необходимость сбора слабосвязанных частиц и возврат их в окомкователь и ограничения по температуре для эластичных (резиновых, резиноканевых) теплообменников.

Для схем (в) и (г) процесс влагоудаления является сопутствующим, поскольку основное назначение этих схем заключается в увеличении пути переката за счет ориентации комкуемых материалов в холостую зону окомкователя. Это позволяет увеличить производительность окомкователя по ВГ до 94,4 %. Ударное взаимодействие сырых окатышей с бортами тарели формирует упрочняющий наклеп и повышение прочности. Положительный эффект по влагоудалению достигается для окатышей, у которых размеры близки к кондиционным (диам. 14-16 мм), аналогично схеме (а). Это обусловлено тем, что для окатышей более низких размеров (диам. ме-

нее 14-16 мм), при доокомковании требуется более интенсивное увлажнение поверхности гранул. По конструктивному оформлению обе технологические схемы относятся к сравнительно простым решениям.

Схема (д) предполагает циклическое (челночное) напыление влажной шихты на поверхность материалов, комкуемых в рабочей зоне окомкователя по технологиям ЗОН или ЗОНД, необходимое для интенсификации роста массы оболочки окатыша. Процесс влагоудаления также является сопутствующим, но более эффективен по сравнению со схемами (в) и (г), поскольку процесс роста массы не нарушается, а, напротив, реализуется с более высокой скоростью. Сушится не тонкий поверхностный слой размером 0,5-1,0 мм, как в схемах (а) и (ж), а более массивный размером 2-3 мм.

Схема (е) отличается от схемы (б) установкой ультразвуковых излучателей на тракте подсушки окатышей, что безусловно усложняет аппаратное оформление способа. Эксперименты показали относительно невысокую эффективность ультразвука на слоевых процессах. Положительный эффект можно достичь повышением мощности и частоты излучателя, что требует относительно высоких энергетических и материальных затрат. Степень влагоудаления  $\theta_w = 0,81$  можно повысить только путем удлинения тракта сушки, что также достаточно затруднительно.

Влагоудаление по схеме (ж) позволяет организовать барботирование восходящего слоя окатышей в нижней части окомкователя струями теплоносителя, ориентированными под острым углом к поверхности слоя окатышей (как вариант установленными вертикально). Этот режим дает возможность организовать интенсивное циркуляционное движение теплоносителя по сравнению со схемой (а) в глубине слоя и обеспечить более высокую площадь поверхности слоя окатышей, накрываемую СТО. В результате более интенсивной СТО величину  $\theta_w$  можно снизить до 0,84.

Динамические параметры теплоносителя можно увеличить на 10-15 % в схеме (з), в которой зона барботажа и циркуляции окатышей снабжена экраном, препятствующим выбросу окатышей из рабочего пространства окомкователя. Экран целесообразно выполнять из эластичных материалов, в наименьшей степени деформирующих влажные окатыши.

В схеме (и) реализована классическая схема принудительного зародышеобразования, в которой одновременно с влажной шихтой возможно напыление пористого поглотителя влаги (связующего, порообразователя, органических добавок и других материалов). Использование, например, древесной пыли или древесных отходов в количестве 2-3 %, позволяет снизить  $\theta_w$  до 0,80. Эта схема относится к классической технологии ЗНД, по которой возможно одновременно с зародышеобразованием получить снижение влажности сначала зародышей, а потом и окатышей, у которых понижена влажность в зародышевом центре.

Можно отметить, что в рассмотренных схемах влагоудаление является как основным, так и сопутствующим процессом. При реализации ос-

нового процесса (схема а, в, г) возможно нарушение процесса окомкования, что несколько ограничивает его возможности использования. Вынос этого процесса за рабочее пространство окомкователя (схемы б и е), несомненно, оправдывает задачу, но усложняет аппаратное оформление технологии. Поэтому более предпочтительным является комбинированный процесс получения окатышей, в котором основной процесс реализован по технологии ЗНД (схема и), а сопутствующий процесс влагоудаления организован по схемам (з) или (д). Последнее сочетание технологических схем предполагает совмещение основных технологических операций технологий ЗНД и ЗОН.

**Выводы.** Проанализированы технические схемы, реализующие методы предварительного влагоудаления железорудных окатышей в рабочем пространстве окомкователя и на участке окомкования, организованные с помощью струйной тепловой обработки. Проанализирован подход к тарельчатому окомкователю как к низкотемпературному теплотехническому агрегату, предназначенному для тепловой обработки слоя влажных окатышей на заключительной стадии окомкования и транспортировки окатышей к обжиговому агрегату.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин [и др.]. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.

**Вестник горно-металлургической секции РАЕН.  
Отделение металлургии**

*Сборник научных трудов*

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 22.09.2017 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 13,5 Уч.-изд.л. 14,4 Тираж 300 экз. Заказ № 447

Сибирский государственный индустриальный университет  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.  
Издательский центр СибГИУ