

*В.М. Павловец***Сибирский государственный индустриальный университет****ОРГАНИЗАЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ВЛАГОУДАЛЕНИЯ НА УЧАСТКЕ
ОКОМКОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ**

Мировое производство железорудных окатышей в настоящее время превышает 500 млн. т в год, что составляет более четверти мирового выпуска окискованного сырья для черной металлургии [1, 2]. Основными производителями окатышей для черной металлургии являются США, Германия, Япония, Китай, Швеция, Россия, Украина и некоторые другие страны.

Структура производства окатышей во всех странах примерно одинакова и включает обогащение железных руд с получением тонкодисперсного концентрата, дозирование и смешивание компонентов шихты, окомкование влажной шихты и термообработку сырых окатышей [3 – 5]. Каждая из этих технологических операций реализуется на определенном участке производства и имеет строго целевое назначение. В частности, участок окомкования выполняет функции формообразования влажной сыпучей шихты в окатыши и первичного упрочнения. Участок термообработки предназначен для формирования необходимой (стандартной) прочности и включает термические операции: двухступенчатую сушку слоя окатышей, регламентированный подогрев, многоступенчатый обжиг и охлаждение окатышей, реализуемые на обжиговой конвейерной машине. Причем все технологические операции на обжиговой машине также имеют самостоятельное назначение и часто лимитируют друг друга, поскольку сопровождаются сложными высокотемпературными тепломассообменными процессами, протекающими одновременно. Среди них – диффузионный перенос влаги, многостадийное окисление и декарбонизация, массообмен при спекании, фазовое и минеральное структурообразование, уплотнение и упрочнение, растворение твердых спеков в шлаковой фазе и многие другие, находящиеся на стадии более детального изучения. Практически все эти процессы имеют температурное активирование. Поэтому, если на первой стадии сушки окатыши не будут полностью высушены, то интенсивность подогрева и обжига совместно с протекающими диффузионными процессами может быть сни-

жена, что приведет к уменьшению производительности агрегата, перерасходу топлива и энергии. Таким образом, первая стадия термообработки – сушка – является лимитирующей для большинства последующих процессов, развивающихся на обжиговой машине.

В мировой практике проблема полноты высушивания окатышей направлена на интенсификацию режима сушки непосредственно на обжиговой машине, что является достаточно сложной производственной задачей для отдельного теплотехнического агрегата, на котором одновременно протекают многочисленные теплофизические процессы. В этой связи спектр инженерных решений достаточно мал, поскольку решение одной проблемы в начальной стадии термообработки может спровоцировать появление другой проблемы уже в конечной стадии термообработки. Среди наиболее значимых инженерных решений в этой области следующие: пофракционная укладка слоя окатышей для формирования повышенной фильтрации газов, формирование структурных свойств окатышей и всего слоя, усиливающих влагоудаление в ходе конвективной сушки, реверсивная подача теплоносителя, многоступенчатый режим сушки, применение акустических волн и слоевого горения, вовлечение в процесс сушки нулевой зоны обжиговой ленты и некоторые другие, не менее сложные, но применяемые на практике [1, 3 – 5].

Новым в решении этой проблемы явилось предложение о переносе части тепловой нагрузки с высокотемпературной стадии технологии (обжиговой машины) на низкотемпературный участок производства – участок окомкования (окомкователь и транспортерная лента), протяженность которого соизмерима с длиной обжиговой машины [1, 2]. Сущность этого решения заключается в использовании струйной тепловой обработки (СТО) в рабочем пространстве окомкователя либо на участке транспортирования сырых окатышей к обжиговому агрегату для предварительного влагоудаления из окатышей перед участком термообработки.

Удаление до 10 – 15 % влаги на участке окомкования сокращает длительность влагоудаления и протяженность зоны сушки на обжиговой машине, что в свою очередь позволяет повысить температуру процесса термической сушки, скорость нагрева окатышей в зонах подогрева и обжига. Механизм предварительного влагоудаления (ПВУ) при низкотемпературном напылении влажной шихты связан с переносом молекулярной влаги из дисперсной фазы в газовый поток за счет разности скоростей фаз и концентраций жидкости в них. Расчеты показывают, что в результате внедрения этого мероприятия производительность обжиговой машины может повыситься на 2 – 3 % [1, 2]. Это решение было предложено на кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ и успешно отработано в лабораторных условиях и используется в учебном процессе. В этом решении впервые реализован подход к окомкователю как к низкотемпературному тепловому агрегату, в котором наряду с процессами формообразования шихты и упрочнения окатышей реализована функция предварительного влагоудаления, что позволило расширить функциональные возможности окомковательного оборудования. Это решение оформлено в виде многочисленных объектов интеллектуальной собственности [2], к которым проявили интерес зарубежные издатели [6, 7].

Струйная тепловая обработка может быть организована в виде отдельных воздушных струй, ориентированных на сырые материалы, или с помощью трехфазных воздушно-шихтовых струй, направленных на шихтовый гарниз (технология ЗНД) или на комкующиеся материалы (технология ЗОН) [2]. Достоинством технологии ЗНД является использование холостой зоны тарели в технологическом процессе. В технологии ЗОН зародыши, напротив, формируются традиционным капельным орошением в сочетании с перекатом, а оболочка окатыша напыляется воздушно-шихтовыми струями. Указанные технологии позволяют получать окатыши с повышенной реакционной способностью. Отдельные струи (нагретые и холодные) целесообразно применять как для действующей технологии окомкования железорудной шихты (ЗО), так и в сочетании с технологиями ЗНД и ЗОН. Эти возможности технологий ЗНД и ЗОН особенно актуальны для производства окатышей из дисперсного технологического сырья [8, 9].

Следует заметить, что в действующей технологии окомкования железорудной шихты нарушение режима увлажнения материалов может снизить производительность окомкова-

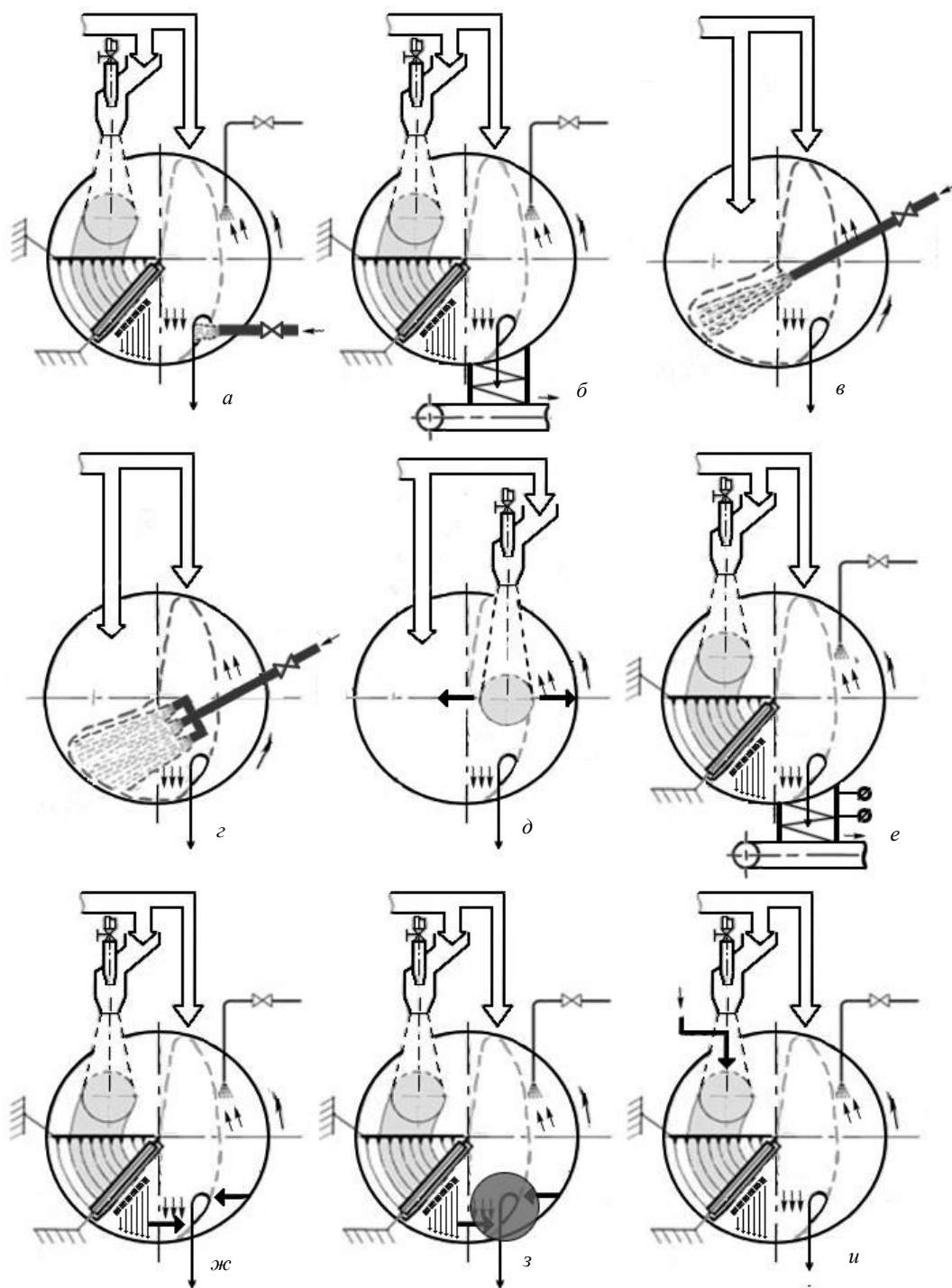
теля, усилить налипание шихты на ограждения оборудования, нарушить режим переката и снизить прочность окатышей [3 – 5, 10]. Технологии ЗНД и ЗОН в меньшей степени зависят от колебаний влажности напыляемой шихты и позволяют одновременно с окомкованием организовать предварительное влагоудаление в циркуляционной зоне комкующего слоя или в холостой зоне окомкователя в процессе зародышеобразования. Естественно предположить, что конструктивные решения технических схем СТО могут влиять на степень предварительного влагоудаления из зародышей и окатышей в процессе их производства [2].

Целью настоящей работы является анализ комбинированных технических решений на основе СТО, позволяющих организовать предварительное влагоудаление на участке окомкования в производстве железорудных окатышей и опирающихся как на принудительное зародышеобразование и напыление шихты на зародыши, так и на действующую технологию окомкования шихты в режиме переката.

Экспериментальные схемы, реализующие процесс предварительного влагоудаления, показаны на рисунке. Они представляли собой комбинированные технические решения, на которые в свое время автором были получены охранные документы.

На их основе были построены физические модели в масштабе 1:10, в которых окомкователь имел диаметр $D = 0,62$ м и работал с частотой вращения 12 об/мин, а угол наклона тарели составлял 45° . Расход шихты на холодное напыление и зародышеобразование составлял 0,05 кг/с. Расход сжатого воздуха давлением 0,2 МПа не превышал $0,2 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Окомкователь работал в нескольких режимах: по технологии принудительного зародышеобразования ЗНД (см. рисунок, схемы *а, б, е, ж, з, и*), по технологии принудительного формирования оболочки окатышей в режиме напыления шихты ЗОН (схема *д*) и по схеме получения окатышей в режиме капельного зародышеобразования и окомкования шихты в режиме переката ЗО (схемы *в, г*). Струйную тепловую обработку в схемах *а, б, д, е, ж, з, и, к* проводили с помощью струй сжатого воздуха, нагретого до 100°C . В схемах *в, г* применяли струи холодного воздуха. Окатыши для анализа эффективности экспериментальной схемы отбирали после СТО в количестве 0,5 кг, для которых определяли их влажность $W_{\text{ок}}$ стандартным методом ($t = 105^\circ\text{C}$, $\tau = 30$ мин) и которую сравнивали с влажностью загружаемой шихты $W_{\text{ш}}$, определяя коэффициент безразмерной влажности θ_w ($\theta_w = W_{\text{ок}}/W_{\text{ш}}$).



Экспериментальные технические схемы, позволяющие организовать предварительное влагоудаление на участке окомкования

Схемы ПВУ: *а* – струей нагретого воздуха в зоне циркуляции; *б* – то же на участке разгрузки окатышей; *в* – то же в холодной зоне; *г* – то же многосопловой струей; *д* – одной ВШС в челночном режиме работы; *е* – ультразвуковым излучателем на участке разгрузки; *ж* – барботированием слоя окатышей двухсопловой струей воздуха в зоне циркуляции; *з* – то же с экранированием зоны барботирования и циркуляции; *и* – влагопоглощающие дисперсные добавки

Сложность экспериментальной схемы определяли по количеству конструктивных элементов схемы, налипанию шихты на детали агрегатов, по появлению отказов и затруднений в работе при визуальном наблюдении за процессом. Выход годного (ВГ) вычисляли по разности между массой загружаемой шихты и

массой образовавшейся мелочи фракции ≤ 5 мм после цикла зародышеобразования, доокомкования (5 мин) и СТО. При определении выхода годного учитывали, что годные окатыши имели размер 12 – 16 мм, а их прочность составляла более 0,5 кг/окатыш. Важной характеристикой технологических схем, приве-

денных на рисунке, 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 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 шихтовый гарнисаж (ШГ) и другие показатели, которые трудно учесть в рамках предлагаемой работы.

В настоящей работе 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 экспериментов представлены в таблице.

Сущность экспериментальной схемы *а* заключается в последовательной реализации процесса получения окатышей по технологии ЗНД на основе холодного напыления влажной шихты и в термической обработке влажных окатышей струей воздуха, нагретого до 100 – 150 °С. Процесс предварительного влагоудаления сначала протекает при напылении влажной шихты, а затем у окатышей кондиционных размеров в циркуляционной зоне слоя материалов. Эта схема отличается универсальностью, поскольку применима для всех технологий получения окатышей: технологии принудительного зародышеобразования, технологии напыления влажной шихты на комкующиеся материалы и для действующей технологии [11, 12].

Для тарельчатого окомкователя циркуляционная нагрузка – это кондиционные окатыши диам. 14 – 16 мм, движущиеся по спиралеобразной траектории на поверхности слоя перед разгрузкой на транспортерную ленту [2]. Это наиболее простая в аппаратном исполнении схема предварительного влагоудаления, в которой с помощью СТО одновременно осуществляется наклеп поверхности (упрочнение) окатышей и срыв с нее слабосвязанных частиц. 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 боль-

шого числа управляющих воздействий на процесс ПВУ: скорости воздуха и его температуры, угла атаки в двух плоскостях, количества струй (позиция *жс*), установки отражающего экрана (позиция *з*) и других. 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. В этой схеме СТО в минимальной степени нарушает процесс доокомкования.

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 выход годного с 91,5 до 96,2 %. Поэтому здесь можно увеличить температуру теплоносителя до 200 – 250 °С и его скорость в противоточном режиме движения до 30 – 50 м/с. Достоинством является больший путь движения окатышей по спиралеобразному каналу диам. 0,05 м и длиной до 6,0 м и, соответственно, более высокая длительность СТО (до 30 – 50 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 стенки 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 комкующихся материалов в холостую зону окомкователя струями холодного воздуха. Поэтому нагретые струи в этой схеме применять нецелесообразно. Указанный режим работы позволяет увеличить производительность окомкователя по показателю ВГ до 94,4 %. Ударное взаимодействие сырых окатышей с бортами тарели формирует упрочняющий наклеп и обеспечивает повышение прочности.

Характеристика экспериментальных технических схем и результаты опытов

Номер экспериментальной схемы (см. рисунок)	Показатели работы устройства			
	Режим работы	Сложность экспериментальной схемы	Выход годного, %	θ_w
<i>a</i>	Прямой последовательный	Простая	91,5	0,85
<i>б</i>	Прямой последовательный	Сложная	96,2	0,81
<i>в</i>	Совмещенный	Простая	94,4	0,97
<i>г</i>	Совмещенный	Простая	94,1	0,97
<i>д</i>	Совмещенный	Сложная	92,8	0,88
<i>е</i>	Прямой последовательный	Сложная	96,3	0,81
<i>ж</i>	Прямой последовательный	Простая	92,1	0,84
<i>з</i>	Прямой последовательный	Простая	92,5	0,82
<i>и</i>	Совмещенный	Сложная	96,6	0,80

Положительный эффект по влагоудалению достигается для окатышей, у которых размеры близки к кондиционным (диам. 14 – 16 мм), аналогично схеме *a*. Это обусловлено тем, что для окатышей более низких размеров (диам. менее 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 совмещенным, но более эффективен по сравнению с процессами, представленными схемами *в* и *г*, поскольку рост массы не нарушается, а, напротив, реализуется с более высокой скоростью. Сушится не тонкий поверхностный слой размером 0,5 – 1,0 мм (как в схемах *a* и *ж*), а более массивный размером 2 – 3 мм. В этой схеме трудно организовать СТО, поскольку возможно нарушение режима доокомкования из-за аэродинамического взаимодействия струй воздуха и воздушно-шихтовых струй в рабочей зоне окомкователя.

Схема *е* отличается от схемы *б* установкой дополнительных 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 излу-

чателя, что требует относительно высоких энергетических и материальных затрат. Степень влагоудаления ниже $\theta_w = 0,81$ можно обеспечить только путем удлинения тракта сушки, что достаточно затруднительно. Особенностью схем *б* и *е* является возможность сравнительно точного определения длительности СТО. В остальных схемах этот показатель можно оценить только приближенно.

Предварительное 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 *a* в глубине слоя и обеспечить более высокую площадь поверхности слоя окатышей, накрываемую СТО. В результате более интенсивной СТО, основанной на автономных струях, значение параметра θ_w можно снизить до 0,84.

Динамические параметры теплоносителя можно увеличить на 10 – 15 % в схеме *з*, в которой зона барботаж и циркуляции окатышей снабжена отражающим экраном, препятствующим выбросу комкующихся материалов из рабочего пространства окомкователя. Экран целесообразно выполнять из эластичных материалов, в наименьшей степени деформирующих влажные окатыши и препятствующим налипанию шихты.

В схеме *и* реализована классическая схема принудительного зародышеобразования, в которой одновременно с влажной шихтой воз-

можно напыление пористого поглотителя влаги (связующего, порообразователя, органических добавок и других материалов). Использование, например, древесной пыли или древесных отходов в количестве 2 – 3 % позволяет снизить показатель θ_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 основного процесса (схемы *а*, *в*, *з*) возможно нарушение процесса окомкования, что несколько ограничивает его использование и требует дополнительных мер по стабилизации технологии. 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 (схемы *а*, *б*, *и*), а завершающий процесс влагоудаления с помощью СТО организован по схемам *ж*, *з*.

Технически возможно сочетание технологических схем ЗНД и ЗОН, которое позволяет повысить равномерность влагоудаления по сечению окатышей. Результаты экспериментов позволили сформулировать подход к тарельчатому окомкователю как к низкотемпературному теплотехническому агрегату, в котором возможна тепловая обработка слоя влажных окатышей для предварительного влагоудаления.

Выводы. Проанализированы экспериментальные технические схемы, реализующие методы предварительного влагоудаления железорудных окатышей в рабочем пространстве окомкователя и на участке окомкования, организованные с помощью струйной тепловой обработки. В работе оценивали сложность экспериментальной схемы, стабильность работы окомковательного оборудования и степень предварительного влагоудаления из окатышей. Обсуждение преимуществ и недостатков каждой схемы в направлении предварительного влагоудаления дало возможность увязать их с достоинствами режима принудительного зародышеобразования. Это позволило наметить пути совершенствования технологии производства окатышей. Результаты экспериментов дают возможность сформулировать подход к тарельчатому окомкователю как к низкотемпературному теплотехническому агрегату, предназначенному для тепло-

вой обработки слоя влажных окатышей на стадии окомкования и транспортировки окатышей к обжиговому агрегату.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, П.К. Антоненко, Р.М. Жак. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
4. Ручкин И.Е. Производство железорудных окатышей. – М.: Металлургия, 1976. – 184 с.
5. Маерчак Ш. Производство окатышей. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
6. Pavlovets V.M. Thermal Stessin Yron-Ore Pellets Differentiated Porosity // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. № 8. P. 538 – 543.
7. Pavlovets V.M. Producing Wet Pellets by Forced Nucleation // Steel in Translation. 2010. Vol. 40. № 6. P. 511 – 516.
8. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: Учебное пособие для вузов. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.
9. Газоочистные устройства сталеплавильных агрегатов и утилизация промышленных отходов: Учебное пособие для вузов / Е.В. Протопопов, Ю.И. Дерин, Е.П. Волынкина, С.Г. Коротков – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2005. – 96 с.
10. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Металлургия, 1966. – 152 с.
11. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 6. С. 9 – 13.
12. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.

© 2017 г. В.М. Павловец
Поступила 8 ноября 2017 г.