

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОСИЛОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ВЛАЖНОЙ ШИХТЫ

Павловец В.М., к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии (pavlovets.victormix@yandex.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлены результаты исследования термостойкости влажных железорудных окатышей, полученных по технологии теплосилового напыления влажной шихты на шихтовый гарнисаж окомкователя и на комкующиеся окатыши некондиционных размеров. В экспериментах участвовали окатыши, полученные по технологиям ЗНД (зародышеобразование напылением и доокомкование) и ЗОН (зародышеобразование, окомкование и напыление), имеющие структурную неоднородность по влагосодержанию. У первых было пониженное содержание влаги в центре окатыша, у вторых – в оболочке окатышей. Установили, что температуры трещинообразования и шокового разрушения существенно увеличиваются с уменьшением содержания влаги в центре (ЗНД) и в оболочке (ЗОН) окатыша по сравнению с традиционной технологией (ЗО). Выяснили, что при равенстве общего содержания влаги в окатышах, полученных по технологиям ЗНД и ЗОН, их температуры трещинообразования существенно отличаются. Причем границы соотношения влажностей поверхностного слоя и центральной части окатыша, достигаемые каждой технологией и непосредственно влияющие на параметры термостойкости, также отличаются друг от друга. В частности, структурная неоднородность окатышей по влажности, при которой минимальное количество влаги содержится в центральной зоне окатыша (технология ЗНД), обладает самым большим интервалом соотношения влажностей. У окатышей, полученных по технологии ЗНД в этом интервале соотношения влажностей, можно повысить температуру трещинообразования на 240 °С по сравнению с окатышами, сформированными по технологии ЗО (560 °С). У окатышей, полученных по технологии ЗОН, границы соотношения влажностей поверхностной и центральной частей существенно меньше. В этих границах изменение термостойкости по критерию трещинообразования не превышает 40 °С.

Ключевые слова: термостойкость, влажность, теплосиловое напыление, воздушно-шихтовая струя, напыленный слой, зародыши, оболочка окатышей, железорудные окатыши.

Данные о термостойкости окатышей необходимы для назначения режима сушки и оптимальных скоростей нагрева окатышей на начальной стадии процесса термообработки [1 – 3]. Повышение границ термостойкости в общем случае позволяет интенсифицировать процессы сушки и обжига, а также сформировать энергосберегающий режим термообработки. Поэтому поиск технологических решений, направленных на повышение температур трещинообразования и шокового разрушения, является актуальной задачей в области подготовки окучкованного сырья к металлургической плавке.

Механизмы трещинообразования и шокового разрушения при сушке железорудных окатышей, получаемых по традиционной технологии ЗО (зародышеобразование капельным орошением и окомкование в режиме переката), достаточно хорошо изучены [4 – 7]. Основной причиной трещинообразования и шокового разрушения окатышей является формирование объемно-напряженного состояния, превышающего предел прочности окатышей. Это состояние определяется градиентом влагосодержания и перепадом температур по сечению окатыша во время их сушки. Удаление влаги с поверхности окатыша вызывает неравномерную усадку окатыша, которую усиливает повышенное давление водяных паров, образующихся в центральной зоне окатышей. По данным работы [6] усадка офлюсованных

окатышей достигает 2,9 – 3,0 %. Наиболее опасное состояние возникает в начале сушки, когда удаляется капиллярно-связанная влага, поскольку связанность материала до образования сетчатых коагуляционных структур обеспечивается относительно слабыми капиллярными силами. В свою очередь, уменьшение влажности и повышение размеров окатышей увеличивают термостойкость [6, 7]. С ростом пористости и размеров частиц шихты термостойкость окатышей увеличивается, но одновременно с этим снижается прочность на сжатие и истираемость [5 – 7].

Можно предположить, что для повышения термостойкости необходимо создать такую структуру распределения влажности по сечению окатышей, которая привела бы к уменьшению градиента влагосодержания и исключила неравномерную усадку при их сушке. Одним из путей повышения термостойкости может быть формирование структуры окатыша с регламентированной влажностью по его сечению. Это возможно с использованием теплосилового напыления влажной шихты на гарнисаж окомкователя с получением плотного слоя в технологии принудительного зародышеобразования (технологии ЗНД) или на окатыши некондиционных размеров (технологии ЗОН). Технология ЗНД опирается на теплосиловое напыление влажной шихты на гарнисаж окомкователя с получением плотного

напыленного слоя шихты и формирование зародышей механическим делением этого слоя в холостой зоне тарельчатого окомкователя [8]. Зародыши, полученные по этой технологии, обладают регламентированными свойствами (плотностью, пористостью, влажностью). В частности, влажность зародышей регулируется изменением температуры сжатого воздуха, формирующего теплосиловое напыление влажной шихты. На заключительном этапе технологии ЗНД на поверхности зародышей, из которых в ходе зародышеобразования удалась до 0,5 – 5,5 % влаги, способом доокомкования в рабочей зоне окомкователя формируется оболочка окатыша с относительно постоянной влажностью, близкой к влажности шихты. Изменяя в процессе принудительного зародышеобразования размер зародышей и их влажность можно целенаправленно воздействовать на термостойкость всего окатыша, схема формирования которого на зародышах с пониженной влажностью по технологии ЗНД показана на рис. 1.

По второй схеме получения окатышей (технологии ЗОН) теплосиловое напыление влажной шихты осуществляется на мелкие окатыши некондиционных размеров диам. 3 – 13 мм, комкующиеся в рабочей зоне окомкователя, что позволяет сформировать на окатышах шихтовую оболочку с пониженной на 3,5 % влажностью [9]. При этом влажность центральной части окатыша остается относительно постоянной и близкой к влажности напыляемой шихты. Изменяя влажность напыленной оболочки окатыша и размер напыляемых окатышей, которые в этой технологии выполняют роль зародышей, можно целенаправленно воздействовать на термостойкость всего окатыша. Схема формирования окатышей с шихтовой оболочкой, полученной теплосиловым напылением влажной шихты, показана на рис. 2. Причем напыление шихты можно организовать на окатыши нисходящего слоя материалов, движущие-

ся в режиме переката, где есть возможность получения окатышей с симметрично расположенной оболочкой на их поверхности (рис. 2, а), удобной для анализа влажностной структуры. При напылении шихты на окатыши восходящего слоя материалов, перекаат которых отсутствует и они совершают поступательное движение, также возможно формирование окатышей кондиционных размеров, но напыленная оболочка располагается несимметрично относительно центра напыляемого окатыша (рис. 2, б), что не совсем удобно для анализа влажности по сечению окатыша.

Таким образом, окатыши, полученные по технологиям ЗНД и ЗОН [10], можно условно отнести к двухслойным по содержанию влаги, поскольку они сформированы по двухступенчатой схеме, а окатыши, полученные по технологии ЗО, условно относятся к однослойным по содержанию влаги, поскольку получены по одноступенчатой схеме.

Целью настоящей работы является сравнительное исследование термостойкости влажных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты на поверхность комкующихся окатышей некондиционных размеров (ЗОН), и сформированных по технологии принудительного зародышеобразования (ЗНД), с термостойкостью окатышей, полученных по традиционной технологии (ЗО).

Для опытов использовали шихту на основе тейского железорудного концентрата (фракции менее 0,1 мм), содержащего 1 % бентонита в качестве связки. Средний размер $d_{\text{ч}}$ частиц шихты составлял 0,068 мм. По технологии ЗНД первоначально получали зародыши кубической формы с размером граней 2 – 3, 9 – 10 и 12 – 13 мм и начальной влажностью, которую регулировали, меняя температуру сжатого воздуха при напылении шихты на гарнисаж. После этого зародыши доокомковывали, формируя на их поверхности оболочку окатышей, для этого поверхность

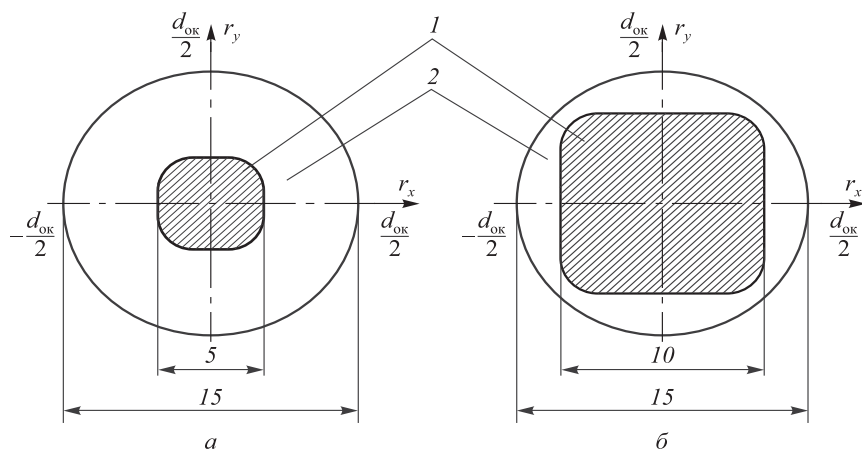


Рис. 1. Структура комбинированного окатыша, полученного по технологии принудительного зародышеобразования (заштрихованная область 1 принадлежит зародышам, незаштрихованная область 2 – оболочке окатышей)
а и б – схема окатыша с зародышем размером $h_{\text{зр}} = 5$ и 10 мм

Fig. 1. Structure of combined pellet, obtained by induced nucleation (shaded area 1 belongs to nucleus, not shaded area 2 – to pellet sheathing)
a and b – scheme of pellet with nucleus of the size $h_{\text{зр}} = 5$ and 10 mm

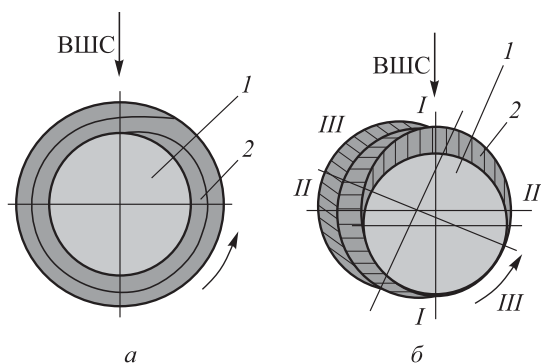


Рис. 2. Схема получения окатышей по технологии ЗОН, включающей формирование оболочки окатышей напылением шихты на комкующиеся окатыши нисходящего (а) и восходящего (б) слоев материала:

1 – комкующиеся окатыши некондиционных размеров; 2 – напыленный слой (оболочка окатышей); ВШС – воздушно-шихтовая струя; I, II, III – последовательность напыления шихты в восходящем слое материалов

Fig. 2. Scheme of pellets obtaining using ZON technology, including pellet sheathing formation by mixture spray on caking pellets of descending (a) and uprising (б) layers of material:

1 – caking pellets of unconditional size; 2 – sprayed coating (pellet sheathing); ВШС – air-mixture jet; I, II, III – sequence of mixture spraying in uprising layer of material

зародышей увлажняли и на нее подавали влажную шихту. Кондиционные окатыши диам. 15 – 16 мм содержали в центре зародыш, на который опиралась оболочка окатыша. Из всей массы (около 2 кг) полученных окатышей для определения термостойкости брали 20 окатышей, для анализа влажности использовали 10 окатышей. Для оценки результатов экспериментов использовали отношения $W_{\text{пов}}/W_{\text{ц}}$ влажности поверхностного слоя к влажности центральной (зародышевой) части окатыша. Влажность зародышей, находящихся в центре окатыша, и оболочки окатыша определяли, отделяя оболочку от центральной части, учитывая, что центральная часть окатыша по размерам соответствовала размерам зародыша. Влажность проб шихты определяли по стандартной методике. Особенностью технологии ЗНД является то, что на мелких зародышах размером 2 – 3 мм трудно сохранить начальную влажность в центре окатыша при доокомковании, поскольку требовалось увлажнение их поверхности, поэтому соотношение $W_{\text{пов}}/W_{\text{ц}}$ не превышало 1,25. Для окатышей, полученных на зародышах размерами 9 – 10 и 12 – 13 мм, это соотношение было выше и составляло 1,72 и 2,95 соответственно.

Для получения окатышей по технологии ЗОН использовали влажные окатыши некондиционных размеров диам. 9 – 10 и 12 – 13 мм, на поверхности которых формировали оболочку напылением влажной шихты в процессе работы тарельчатого окомкователя. Окатыши диам. менее 9 мм в экспериментах не использовали, так как напылением шихты на их поверхности трудно сформировать оболочку с пониженной влажностью. Для окатышей диам. 9 – 10 и 12 – 13 мм условно считали, что их влаж-

ность не меняется в процессе напыления, а влажность оболочки рассчитывали, зная ее массовую долю и влажность кондиционного окатыша диам. 15 – 16 мм. Для окатышей, полученных на зародышах диам. 9 – 10 мм, соотношение $W_{\text{пов}}/W_{\text{ц}}$ не снижалось менее 0,62, а для окатышей, полученных на зародышах размером 12 – 13 мм, это соотношение достигало значения 0,75.

По традиционной технологии ЗО окатыши получали на тарельчатом окомкователе диам. 1,0 м, наклоненном к горизонту под углом 45°, и работающем с частотой 6 об/мин. Для этих окатышей влажность центральной части превышала влажность оболочки и находилась по соотношению $W_{\text{пов}}/W_{\text{ц}} = 0,95$ ($W_{\text{ц}} = 8,14\%$).

Методика определения термостойкости (температур $t_{\text{т}}$ трещинообразования, °С, и $t_{\text{ш}}$ шокового разрушения, °С) включала загрузку 20 окатышей в печь, предварительное нагревание до заданной температуры, и выдержку при этой температуре в течение 20 мин. После выдачи окатышей из печи и охлаждения их на открытом воздухе при температуре 20 °С визуально оценивали состояние окатышей, наличие трещин, частичное или полное разрушение окатышей. За величину $t_{\text{т}}$ брали температуру, при которой хотя бы один окатыш имел трещины (рис. 3, а),



Рис. 3. Внешний вид окатышей, подвергнутых термическому разрушению:

а – трещинообразование; б – шоковое разрушение

Fig. 3 External view of pellets, subjected to thermal destruction: а – fracturing; б – shock erosion

а за параметр $t_{ш}$ принимали температуру, при которой хотя бы один окатыш разрушался на несколько частей (рис. 3, б). Результаты экспериментов дублировали.

Результаты экспериментов по определению температуры трещинообразования показаны на рис. 4, а результаты определения температуры шокового разрушения приведены в таблице. Величина $t_{ш}$ имеет достаточно большой разброс, поэтому итоговые значения в таблице представлены в виде интервала значений, соответствующих минимальному и максимальному значениям $t_{ш}$.

Установили, что самая низкая термостойкость ($t_T = 540^\circ\text{C}$, рис. 4) и ($t_{ш} = 700 - 760^\circ\text{C}$, таблица) получена для окатышей, сформированных по технологии ЗО. Эти окатыши содержат максимальное количество влаги, как в поверхностном слое, так и в центре гранулы, что непосредственно снижает границы термостойкости по вышеуказанному механизму. Для окатышей, полученных по технологиям ЗНД при $W_{пов}/W_{ц}$ более 1,0 и ЗОН при $W_{пов}/W_{ц}$ менее 0,95 с использованием теплосилового напыления влажной шихты, общее содержание влаги существенно меньше, что закономерно повышает термостойкость окатышей. В частности, для образцов, полученных по технологии ЗНД, максимальное количество влаги сосредоточено в поверхностном слое окатышей, а уменьшение этого параметра в центральной части окатыша практически линейно повышает значение t_T до 800°C ($W_{пов}/W_{ц} = 2,95$, рис. 4) и $t_{ш}$ до $900 - 940^\circ\text{C}$ (таблица) для всех размеров зародышей. Чем больше размер последних, тем выше его массовое содержание в кондиционном окатыше и тем выше значения t_T и $t_{ш}$ (рис. 4, таблица). Это объясняется меньшим количеством влаги и образующегося водяного пара в центральной части окатыша, что снижает плотность потока влаги, перемещающегося из центра

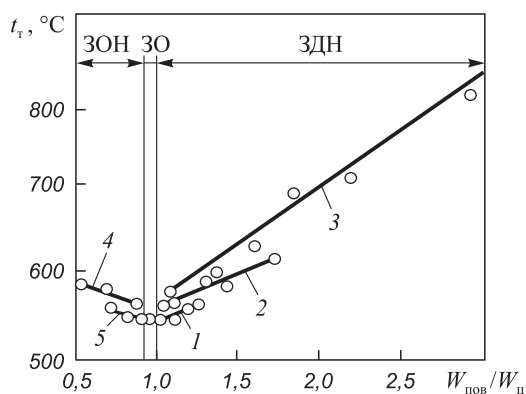


Рис. 4. Влияние отношения $W_{пов}/W_{ц}$ на температуру трещинообразования. Высота грани зародышей в технологии ЗНД и диаметр напыляемых окатышей по технологии ЗОН, мм:
1 – 2 – 3; 2 – 9 – 10; 3 – 12 – 13; 4 – 9 – 10; 5 – 12 – 13

Fig. 4. Influence of $W_{пов}/W_{ц}$ ratio on fracturing temperature. Height of nucleus face in ZND technology and diameter of pellets sprayed implementing ZON technology, mm:
1 – 2 – 3; 2 – 9 – 10; 3 – 12 – 13; 4 – 9 – 10; 5 – 12 – 13

Температура шокового разрушения окатышей

Размер зародышей Размер окатышей	$\frac{W_{пов}}{W_{ц}}$, М	Значение $t_{ш}$, $^\circ\text{C}$
<i>по технологии ЗНД</i>		
2 – 3 –	1,05	700 – 740
	1,12	700 – 760
	1,20	720 – 780
	1,25	740 – 780
9 – 10 –	1,12	700 – 760
	1,34	720 – 780
	1,45	740 – 800
12 – 13 –	1,72	760 – 800
	1,14	700 – 740
	1,62	740 – 800
	2,15	800 – 840
	2,95	880 – 940
<i>по технологии ЗОН</i>		
– 9 – 10	0,62	740 – 800
	0,85	720 – 760
– 12 – 13	0,75	720 – 780
	0,91	700 – 760
<i>по технологии ЗО</i>		
– 15 – 16	0,95	700 – 740

окатыша к его поверхности. В результате диффузионный поток водяного пара из центра окатышей на его поверхность существенно сокращается, что не вызывает опасных градиентов влажности, неравномерной усадки и позволяет подвести к окатышам при их сушке более интенсивный тепловой поток.

Для технологии ЗОН характерно обратное распределение влаги: в центральной части окатыша ее содержание максимальное и соответствует влажности окатышей, полученных по технологии ЗО. В поверхностной части (в оболочке) окатыша влажность снижена на 0,8 – 3,5 %, что в свою очередь позволяет облегчить диффузию пара с поверхностной части окатыша и снизить диффузионные затруднения при переносе водяного пара из центральной части образца к поверхности. Этому благоприятствует большее количество открытых пор в оболочке, сформированных теплосиловым напылением шихты по технологии ЗОН, по сравнению с окатышами, полученными по технологии ЗО. Сравнивая термостойкость всех трех технологий, можно отметить, что близкие значения t_T и $t_{ш}$ получены для окатышей технологий ЗО при $W_{пов}/W_{ц} = 0,95$, ЗОН при $W_{пов}/W_{ц} > 0,7$ (диаметр окатышей 12 – 13 мм) и ЗНД при $W_{пов}/W_{ц} < 1,1$ (диаметр зародышей 2 – 3 мм).

Выводы. При отношении $W_{\text{пов}}/W_{\text{ц}} < 0,7$ (ЗОН) температуры трещинообразования и шокового разрушения возрастают, но в меньшей степени, чем у окатышей, полученных по технологии ЗНД при $W_{\text{пов}}/W_{\text{ц}} > 1,1$. Это позволяет предположить, что термостойкость окатышей в большей степени повышается из-за снижения влажности центральных слоев окатышей, что технически возможно по технологии ЗНД, чем снижение влажности оболочки окатышей, достигаемое технологией ЗОН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боковиков Б.А., Клейн В.И., Малкин В.М. и др. Механизм формирования области переувлажнения в зоне сушки обжиговой конвейерной машины // *Сталь*. 2003. № 9. С. 20 – 23.
2. Исаев Е.А., Чернецкая И.Е. К вопросу интенсификации производства железорудных окатышей // *Металлы*. 1997. № 6. С. 8 – 13.
3. Юсфин Ю.С., Каменов А.Д., Буткарев А.П. Управление окучиванием железорудных материалов. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
4. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф., Антоненко Л.К. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
5. Маерчак Ш. Производство окатышей. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
6. Сулименко Е.И. Производство окатышей. – М.: Металлургия, 1988. – 128 с.
7. Тимофеева В.С., Никитченко Т.В., Федина В.В. Исследование термостойкости окатышей // *Сталь*. 2012. № 12. С. 12 – 14.
8. Павловец В.М. Принципы организации принудительного зародышеобразования в холостой зоне тарельчатого окомкователя // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2009. № 4. С. 3 – 6.
9. Павловец В.М. Сравнение способов получения комбинированных окатышей путем напыления шихты низкотемпературными струями сжатого воздуха // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2005. № 6. С. 11 – 17.
10. Пат. № 2402619 РФ и № 2464328 РФ. Способ получения окатышей / В.М. Павловец // *Изобретения. Полезные модели*. 2010. № 30 и 2012. № 29.

Поступила 10 июня 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 2, pp. 82–87.

THERMAL STABILITY ANALYSIS OF IRON-ORE PELLETS PRODUCED USING THE TECHNOLOGY OF HEAT-SPRAYING OF WET CHARGE

Pavlovets V.M., *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Thermal Energy and Environment*
(pavlovets.victor@yandex.ru)

Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

Abstract. The article presents the results of the study of thermal stability of wet iron-ore pellets obtained by heat-spraying technology of wet charge on charge pelletizer skull, as well as on the clumping off-grade pellets. The experiments involve the pellets obtained by the technology of nucleation by spraying and additional clumping and the technology of nucleation, pelletizing and spraying. These pellets have structural heterogeneity on the moisture content. The former has the reduced moisture content in the center of the pellet; the second one has lower moisture content in the coat of the formed pellets. It is established that the cracking temperature and shock fracture increase significantly with the decrease of moisture content in the center (nucleation by spraying and additional clumping) and in the coat (the technology of nucleation, pelletizing and spraying) of pellets as compared with the conventional technology. It was found out that in case of equality of the total moisture content of the pellets obtained by the technology of nucleation by spraying and additional clumping and the technology of nucleation, pelletizing and spraying, their fracturing temperatures differ significantly. The boundaries of the moisture ratio of the surface layer and the central part of the pellet, achieved by each of the offered technologies and affect directly the heat resistance parameters are also different from each other. In particular, the structural heterogeneity of the pellets according to the moisture content at which a minimum amount of moisture is contained in the central area of the pellet (the technology of nucleation by spraying and additional clumping), has the largest interval of the moisture ratio. For the pellets, obtained according to the technology of nucleation by spraying and additional clumping in the interval of the moisture ratio, it is possible to raise the cracking temperature at 240 °C compared to pellets formed according to the technology of nucleation, pelletizing (560 °C). The pellets, obtained according to the technology of nucleation, pelletizing and spraying, have the boundaries of the moisture ratio in the surface and

central parts, which are significantly less. Within these boundaries the change in heat resistance according to the criterion of crack formation does not exceed 40 °C.

Keywords: thermal stability, humidity, heat and power spraying, air-charge jet, sprayed layer, nucleus, pellet coat, iron-ore pellets.

REFERENCES

1. Bokovikov B.A., Klein V.I., Malkin V.M., Nevolin V.N., Soloukhin A.A., Yaroshenko Yu.G. The formation mechanism of the over-wetting area in the drying zone of the burning conveyor machine. *Stal'*. 2003, no. 9, pp. 20–23. (In Russ.).
2. Isaev E.A., Chernetskaya I.E. To the approach of intensification of iron-ore pellet production. *Metally*. 1997, no. 6, pp. 8–13. (In Russ.).
3. Yusfin Yu.S., Kamenov A.D., Butkarev A.P. *Upravlenie okuchivaniem zhelezorudnykh materialov* [Control of agglomeration of iron-ore materials]. Moscow: Metallurgiya, 1990. 280 p. (In Russ.).
4. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F., Antonenko L.K. *Intensifikatsiya proizvodstva i uluchshenie kachestva okatyshей* [Intensification of production and pellet quality improvement]. Moscow: Metallurgiya, 1994. 240 p. (In Russ.).
5. Maerchak Sh. *Proizvodstvo okatyshей* [Pellet production]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 232 p. (In Russ.).
6. Sulimenko E.I. *Proizvodstvo okatyshей* [Pellet production]. Moscow: Metallurgiya, 1988. 128 p. (In Russ.).
7. Timofeeva V.S., Nikitchenko T.V., Fedina V.V. Analysis of thermal stability of pellets. *Stal'*. 2012, no. 12, pp. 12–14. (In Russ.).
8. Pavlovets V.M. Principals of forced nucleation in the idle zone of a palletizing disk. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 4, pp. 3–6. (In Russ.).
9. Pavlovets V.M. Comparison of methods of combined pellet obtaining by spraying charge with low-temperature compressed air jets. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 6, pp. 11–17. (In Russ.).
10. Pavlovets V.M. *Sposob polucheniya okatyshей* [Pellet process]. Patent RF no. 2402619 and 2464328. *Byul. Izobretenii*. 2010, no. 30 and 2012, no. 29. (In Russ.).

Received June 10, 2014