

В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, С. Т.Шулико

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СКОРОСТЕЙ ОПУСКАНИЯ ШИХТЫ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ

Установлено, что при ровном ходе печи с конусным загрузочным устройством скорость опускания шихты линейно увеличивается по радиусу колошника от центра к периферии. Показано, что условия движения шихты на печах с конусными и бесконусными загрузочными устройствами различны.

Современное состояние вопроса.

Показатели доменной плавки в значительной степени зависят от организации условий движения, распределения и взаимодействия встречных потоков шихты и газа [1]. Изменение скоростей опускания шихтовых материалов по сечению печи на уровне колошника связано с закономерностями движения сыпучих тел. При этом, на величину скорости и направление траекторий движения оказывают влияние противодействие газового потока, сформированного и зависящего от параметров дутьевого режима и программы загрузки печи, теплофизических и восстановительных процессов плавки, а также периодичности накопления и отработки продуктов плавки. В то же время, под воздействием скоростей опускания шихты формируется профиль (рельеф) поверхности засыпи на колошнике печи, который в свою очередь существенно влияет на распределение шихтовых материалов и газового потока в печи, а в конечном итоге на показатели плавки.

Оснащение доменных печей промышленными средствами измерения профиля поверхности засыпи (профилемерами) открыло широкие возможности исследования фактических величин и соотношений скоростей опускания шихты по сечению колошника и шахты в доменных печах различного объема, при различных режимах плавки для определения возможного диапазона их изменения и характера распределения.

Изложение основных материалов исследования.

Первое инструментальное исследование движения шихты в процессе плавки, проведенное С. П. Кинни в 1923 – 1929 г. г. на печи объемом 700 м³, показало, что скорость опускания материалов в различных точках сечения шахты доменной печи не является постоянной и максимально увеличивается вблизи стен печи. Выполненные в дальнейшем исследования особенностей движения шихтовых материалов явились подтверждением того, что на доменных печах с конусными загрузочными устройствами при нормальном ходе печей наибольшая скорость схода шихты наблюдается в периферийной зоне или вблизи неё. При увеличении интенсивности плавки максимуму скорости опускания шихты смещается в сторону оси печи [2]. В статье [2] показано, что условия движения шихты на печах с конусными

и бесконусными загрузочными устройствами существенно различаются. Так, выполненные Д.В.Ефремовым, Н.И.Красавцевым, А.П.Любаном и А.Н.Редько исследования на печах объема от 1000 до 1300 м³ показали, что распределение скоростей опускания шихты изменяется в достаточно широком диапазоне, иногда шихта по оси печи опускалась с большей скоростью, чем у стенки печи [3]. При исследовании работы доменных печей, Д.В.Ефремовым и Н.И.Красавцевым был установлен различный характер распределения скоростей схода шихты, зависящий от их хода [4]. В 1935 г. Д.В.Ефремов, измеривший скорость движения материалов посредством грузиков, опущенных в печь, установил что при ровном ходе печи средняя скорость опускания шихты составляет на периферии 3,9 м/ч, а по оси – не более 3,3 м/ч. По данным Н.И.Красавцева при ровном ходе печи скорости опускания материалов составляют 3,78 м/ч у стенки колошника, 5,04 м/ч над фурмами и 2,46 м/ч по оси печи, а при тугом ходе печи наибольшая скорость наблюдается у оси печи – 3 м/ч, наименьшая у стенки – 1,2 м/ч. Из данных А.Н.Редько следует, что опускание шихтовых материалов в периферийной части колошника происходит с наибольшей скоростью, тогда как в центральной – с наименьшей.

Аналогичные выводы о влиянии хода печи на распределение скоростей опускания шихтовых материалов по сечению колошника были получены в 1935–1939 г.г. лабораторией металлургии чугуна ЛПИ на доменных печах Магнитогорского завода, «Запорожстали» и «Азовстали» [5]. Изучение движения материалов осуществлялось двумя способами: непрерывным наблюдением за опусканием грузика, который вводился в печь через боковые отверстия, расположенные над уровнем засыпи шихты, а также последовательным определением во времени изменений поверхности засыпи материалов в периоды между загрузками подач в печь. Установлено, что под влиянием подвисаний, осадок и состояния рабочего профиля печи, скорость опускания шихты в различных точках сечения печи меняется. Во время ровного хода печи имеет место ярко выраженный периферийный сход материалов, а в условиях тугого хода, ускоряется сход материалов в промежуточной зоне печи. При сильном развитии подвисаний шихты с последующими обрывами, которые могут происходить в периферийной, центральной или промежуточной зонах сечения печи, скорость опускания материалов зависит от их характера. Так, на доменной печи №1 Магнитогорского завода при ее работе с подвисаниями и обрушениями шихты, скорость ее опускания изменялась, в среднем, от 2,4 до 12 м/ч.

В учебнике А.Д.Готлиба [6] показано, что для ровно работающей печи большого объема скорость опускания шихты у стен колошника составляла 4,08 м/ч, а у оси – 2,46 м/ч. Авторами работ [7,8] сделан обобщающий вывод о том, что оптимальному распределению скорости по диаметру колошника соответствует максимальная ее величина в промежуточной зоне, т.е. в вертикальном кольце столба шихты с наибольшей рудной на-

грузкой, а на периферии и в центре печи скорость схода должна быть ниже [7]. При излишне развитом периферийном потоке газов и слабом разрыхлении осевой зоны скорость опускания материалов у стенки печи увеличивается, а в центре уменьшается. При подгруженной периферийной и относительно свободной от рудных материалов осевой зоны печи скорости опускания в этих зонах уменьшаются, а в некоторых случаях максимальная скорость наблюдается в промежуточной или осевой зонах печи. В осевой зоне максимальные скорости опускания наблюдались при тугом ходе печи [8].

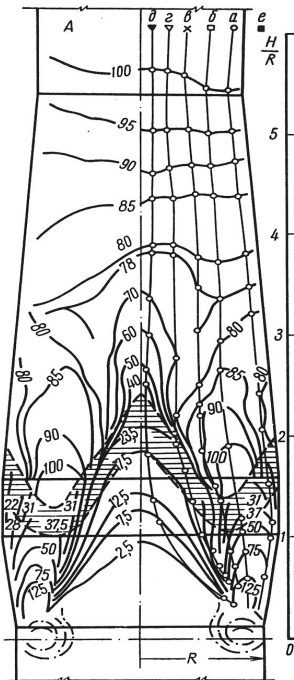
На печи объемом 1719 м³ завода им. Дзержинского при измерениях скорости схода шихты (программа загрузки $5A_2K_2A \downarrow 2KA_2K \downarrow$), осуществляемых с помощью гамма-профилемера, установлено, что скорость опускания шихты в периферийной зоне в 1,5 – 2 раза больше, чем в осевой. При этом скорости в различных сечениях колошника изменялись от 3 до 9 м/ч. В результате к началу выгрузки следующей очередной подачи профиль поверхности засыпи по диаметру колошника приобретал почти горизонтальную форму [9].

Исследования, проведенные на доменных печах Днепродзержинского металлургического комбината [10], позволили установить, что скорость опускания шихты на периферии выше, чем у оси: на периферии в рудном «гребне» ее величина составляла около 5 м/ч, в центре печи – 3,8 м/ч. При этом разница скоростей опускания шихты по радиусу колошника увеличилась с повышением расхода дутья. В результате форма профиля поверхности засыпи, зависящая от скоростей опускания шихты по сечению печи, обуславливала различное влияние программ загрузки на распределение материалов и газового потока, а также на ход плавки в целом. При увеличении скорости опускания шихты на периферии, прямые подачи ($AK \downarrow$) в большей степени подгружали периферийную зону и разгружали центр печи рудными материалами, а обратные подачи ($KA \downarrow$) разгружали периферию и загружали центр. В случае, когда скорость опускания шихты вблизи оси печи была выше, чем на периферии, прямые подачи усиливали загрузку центра и ослабляли загрузку периферии рудной частью подачи, а обратные, наоборот, больше разгружали центр и подгружали периферию. На распределение скоростей движения шихты по сечению печи влияли также количество работающих воздушных фурм, их диаметр и высов, определяющие размеры очагов горения.

При проведении исследований на доменной печи завода в Швельгерне (Германия) определялись скорости опускания поверхности засыпи на периферии и по оси печи в зависимости от величины рудной нагрузки [11]. Установлено, что при уменьшении рудной нагрузки за счет увеличения доли кокса в периферийной зоне от 12 до 24% скорость схода шихты в этой зоне изменялась от 8,6 до 8,7 м/ч. При тех же условиях скорость схода шихты по оси печи увеличивалась от 5,76 до 7,2 м/ч, хотя доля кокса в осевой зоне сохранялась практически постоянной – 38 – 40%.

На доменной печи объемом 2014 м^3 , оборудованной двухконусным засыпным аппаратом, измеренная с помощью сканирующего рентгеновского профилемера скорость опускания шихты составила: на периферии – $6,06\text{--}6,24 \text{ м/ч}$, в рудном гребне – $5,22\text{--}5,4 \text{ м/ч}$, по оси печи – $5,94\text{--}6,0 \text{ м/ч}$ [7]. Установлено, что наиболее медленное опускание шихты в рудном «гребне» (промежуточной зоне), несущем максимальную рудную нагрузку, предопределяет завершенность теплофизических и восстановительных процессов в сухой зоне шахты при наименьших материально–технических затратах. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными, полученными на доменной печи завода Оита в Японии, где наименьший расход топлива на выплавку чугуна был получен при опускании столба шихты с уменьшением скорости от оси к периферии. При этом, некоторое ее увеличение в центральной части печи наблюдалось в момент снижения расхода дутья и вызвано уплотнением столба шихты в этой зоне [12].

Авторами работы [4] установлено, что при низкой интенсивности плавки наибольшие скорости опускания шихтовых материалов на колошнике доменной печи наблюдаются в периферийной зоне. С увеличением расхода дутья максимум величины скорости опускания шихты отдалается от стен колошника на $600\text{--}1000 \text{ мм}$, а при форсировании плавки перемещается к осевой зоне печи.



Изучение распределения скоростей движения материалов в столбе шихты (рис.1), выполненное Л.З. Ходаком и Ю.И. Борисовым [13] на модели доменной печи объемом 1386 м^3 (масштаб 1:20) показало, что в осевой части колошника материал движется быстрее, а ближе к стенам его движение замедляется. Опускание материала в верхней части шахты ускоряется у стен, при этом скорости опускания на периферии начинают превышать скорости в центре с максимальными их значениями над фурменными очагами. Различие в радиальном распределении скоростей по высоте печи вызвано различной порозностью материалов в объеме столба шихты, которая обуславливает особенности распределения шихты и движения восходящего газового потока.

Рис.1. Схема поля скоростей при моделировании движения столба материалов доменной печи под комплексным воздействием процессов плавления и горения.

Наибольшая скорость опускания шихтовых материалов возможна и в промежуточной зоне колошника. На доменной печи №3 АК «Тулачермет» объемом 2002 м³, оборудованной двухконусным загрузочным устройством, с помощью радиоизотопного профилемера (РИАП–2М) установлено, что при расходе дутья 1,6 м³/м³ объема печи, и программе загрузки КРПК ↓2 РККР ↓3 (уровень засыпи 1,7 м) скорость опускания шихты по радиусу колошника печи возрастала от периферии к оси печи: от 5,94 м/ч на периферии, до 6,9 м/ч у оси и достигала максимального значения – 7,5 м/ч – в промежуточной и осевой зонах соответственно [14].

В ходе исследований на одной из Магнитогорских доменных печей, работающей в форсированном режиме, с помощью рентгеновского импульсного профилемера, также было установлено, что скорость опускания шихты в кольцевых зонах сечения колошника изменяется с постепенным возрастанием от оси печи к периферии, с максимальными значениями ее в промежуточной зоне: 1 – осевая зона – 2,64 м/ч, 2 – 7,02 м/ч, 3 – 10,14 м/ч, 4 – 10,32 м/ч, 5 – периферийная – 8,64 м/ч [15].

Анализ приведенных результатов экспериментальных исследований показывает существенную зависимость распределения скоростей опускания шихты по сечению доменной печи от режима плавки и хода доменной печи. Выполненные на доменных печах исследования опускания шихтовых материалов в ходе плавки позволили установить наличие взвешенного слоя над поверхностью засыпи шихты, возникающего при определенных режимах работы печи. В тех местах верхней части шахты, где газы идут с наибольшей скоростью, плавильные материалы могут подхватываться силой восходящей струи газов и удерживаться во взвешенном состоянии [16].

Как отмечено в работе японских исследователей [16] последствиями влияния газового потока на состояние поверхности засыпи шихты являются сдвиг кокса к оси печи, а также кратковременный переход его во взвешенное состояние. Возможность перехода материалов в псевдооживленное состояние в верхней части печи отмечена также в работе [13].

Из исследований, проведенных на доменной печи с использованием гамма–профилемера [9] следует, что характер диаграмм профилемера в осевой зоне подтверждает скопление в ней шихтовых материалов преимущественно крупных фракций, обуславливающих развитие центрального газового потока в печи и соответствующую крупнокусковую структуру столба шихты с спущиванием ее поверхности и переводом материалов во взвешенное состояние при чрезмерной форсировке хода печи. Возможность возникновения «кипящего слоя» отмечена в работах В.М.Клемперта [18].

В работах ряда исследователей [19] и [7] показано, что уплотнение периферийного кольца после выгрузки материалов с конуса приводит к смещению газового потока к оси печи. В результате чего скорость газа в центральной верхней части шахты кратковременно возрастает в 1,35 –

1,45 раза. Описанный характер уплотнения периферийного кольца материалов, перераспределение газа по сечению в верхней части шахты, растекание трапецевидных торов подтверждается показаниями профилемера, фиксирующего частые «кипения» слоя шихты в центре печи.

При исследованиях опускания шихтовых материалов в процессе доменной плавки, особое внимание уделялось влиянию на распределение скоростей опускания шихты по сечению печи выпусков продуктов плавки. Так, на доменной печи объемом 3000 м^3 [20], наблюдались стабильные периодические колебания скоростей опускания материалов по сечению печи в ходе плавки. При этом, скорости опускания шихты в осевой зоне колошника печи определялись расчетным путем на основании взаимосвязи между скоростями опускания поверхности шихты в осевой и периферийной зонах, для чего использовались данные о массе загружаемых материалов и показания электромеханических зондов. Результаты исследований показали, что в периферийной зоне скорость опускания шихты изменяется в пределах $9\text{--}15 \text{ м/ч}$. При этом амплитуда ее колебаний во времени достигала $\pm 0,9 \text{ м/ч}$, с возможным ее ростом до $\pm 2,7 \text{ м/ч}$, что объясняется периодическим подходом и проплавлением слоев рудной составляющей подачи. В осевой зоне амплитуда колебаний была значительно выше, чем в периферийной зоне, а скорость опускания иногда достигала $13,8 \text{ м/ч}$ (рисунок 2)..

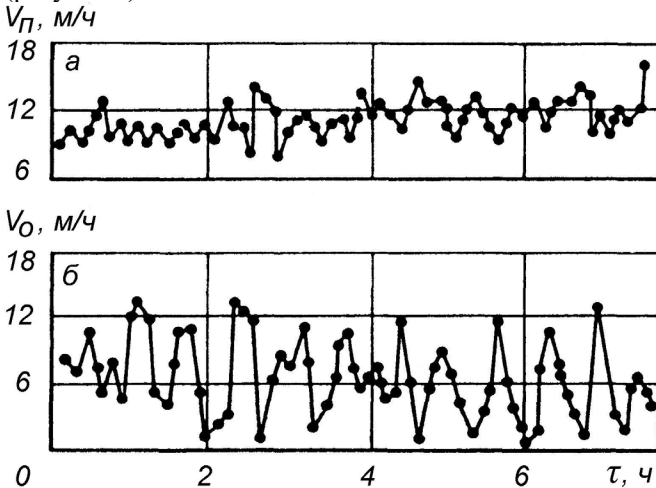


Рис.2. Изменение скорости опускания поверхности шихты во времени в периферийной (а) и осевой (б) зонах

Более высокие амплитуды колебаний скорости опускания шихты совпадали с выпусками, а низкие – с накоплением продуктов плавки. Причиной такого ускоренного опускания шихты в осевой зоне является, так же,

как и в периферийной, периодическое изменение интенсивности плавления слоев железорудных материалов. Расположение области наибольших скоростей опускания шихты по радиусу колошника следует увязывать с местом наибольшего сосредоточения железорудных материалов в столбе шихты и с очертаниями зоны плавления. Средняя скорость опускания шихты в периферийной зоне возрастала только в начале выпуска. В это период происходит понижение уровня чугуна в металлоприемнике, уменьшение сил, выталкивающих кокс в фурменные очаги. Во второй половине выпуска и в интервале накопления продуктов плавки средняя скорость на периферии практически постоянна. В осевой зоне в интервале выпуска происходит увеличение средней скорости опускания шихты, но ее максимум наблюдается во второй его половине, во время снижения уровня шлака. На рисунке 3, приведенном в учебнике [21], представлена диаграмма изменения скорости движения шихты в верхней части доменной печи, полученная при измерениях до выпуска (кривая 3), во время выпуска (4) и после выпуска чугуна (1). Кривая 2 отражает изменение средней скорости движения шихты за все время измерений. Из диаграммы следует, что максимальная средняя скорость движения материалов – 7 м/ч наблюдалась на расстоянии 600 мм от стен. Средняя скорость у оси печи всего лишь на 0,25 м/ч превышала скорость у стен и была значительно ниже, чем на расстоянии 600 мм от стен.

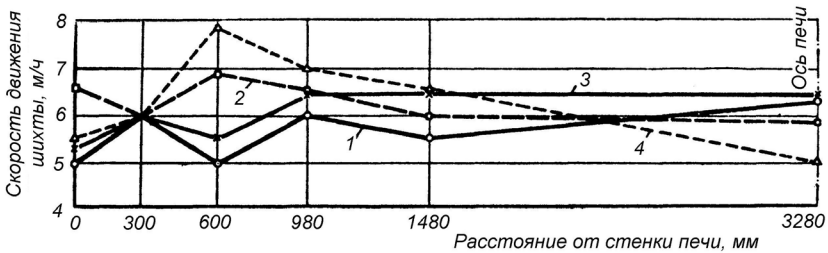


Рис.3. Диаграмма скорости движения шихты в различных точках верхней части печи полезным объемом 1386 м³

В ходе исследований, проведенных на ДП-6 ($V_{П}=3200 \text{ м}^3$) Новолипецкого металлургического комбината, оборудованной бесконусным загрузочным устройством с использованием системы слежения за распределением скоростей опускания шихты по радиусу колошника в течение 70 циклов непрерывной ее загрузки установлено, что средняя величина скорости опускания изменяется от 7,2 до 11,7 м/ч. По мнению авторов, значительные колебания средней скорости схода шихты зависят от условий выпуска продуктов плавки [22].

Исследования, выполненные на ДП №1 с КЗУ Криворожского металлургического завода, позволили установить, что наиболее значительные

изменения скорости опускания шихты в шахте печи связаны с изменениями теплового состояния печи, выпусками чугуна и периодичностью загрузки. На основании статистического анализа изменения средней скорости опускания шихты после выгрузки каждой подачи установлена большая колеблемость абсолютного значения параметра скорости в пределах 1,8 – 15 м/ч, за период между двумя–тремя подачами [23].

Заключение

Таким образом, анализ результатов исследований [1–23], проведенных в 1923–1995 г.г. на действующих доменных печах объемом 700–3200 м³, оборудованных, в основном, конусными загрузочными устройствами, при различных параметрах режима плавки и их ходе, полученных с помощью уровнемеров и профилемеров различных конструкций, а также физических моделей, позволил установить фактические средние величины скоростей опускания шихты по сечению колошника. Установлено, что при ровном ходе печи с конусным загрузочным устройством скорость опускания шихты линейно увеличивается по радиусу колошника от центра к периферии. В большинстве случаев скорость на периферии больше, чем в осевой зоне. Значения скоростей опускания шихты изменяются в широких пределах: в периферийной (пристеночной) зоне печи от 3,4 м/ч до 15,0 м/ч и в осевой (центральной) – от 2,5 м/ч до 13,8 м/ч, при этом средняя величина скорости опускания шихты изменяется от 1,2 м/ч до 12,0 м/ч.

В настоящее время доменные печи оснащаются бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ) и системами измерения профиля поверхности засыпи (профилемерами), в частности основанных на радиолокационном методе измерения (ДП№9 «Криворожстали»). Первые результаты исследований, выполненных на ДП №9 с использованием радиолокационной системы, позволил установить, что наибольшая скорость опускания шихты наблюдается в осевой зоне печи. Накопление и анализ базы данных о распределении фактических скоростей опускания шихты по сечению колошника и шахты печи является актуальной задачей. Использование этих знаний при освоении функциональных и технологических возможностей профилемеров позволит более эффективно осуществлять разработку и совершенствование технологических приемов управления распределением шихты и газового потока в печи, направленных на повышение степени использования энергии печных газов и снижение затрат топлива на выплавку чугуна [24].

1. *Маханек И.Г., Онорин О.П.* Изменение структуры слоя шихтовых материалов под влиянием потока газов. – Сталь, 1972, № 11. С. 975 – 977.
2. *Познание* процессов доменной плавки: Коллективный труд [Под ред. Большакова В.И., Товаровского И.Г. – Днепропетровск: «Пороги». 2006. –439 с.
3. *Фиалков Б.С., Плицын В.Т.* Кинетика движения и характер горения кокса в доменной печи. – М.: Металлургия, 1971. – 288 с.
4. *Красавцев Н.И., Остроухов М.Я.* Работа мастера на современной доменной печи. – Москва, 1949. – 544 с.

5. *Доменный процесс по экспериментальным данным* [Труды Ленинградского политехнического института, 1949, №2.
6. *Готлиб А.Д.* Доменный процесс. – М.: Металлургия, 1966. – 503 с.
7. *Федулов Ю.В.* Механика формирования слоя материалов на колошнике доменной печи.– Сталь, 1991, №3. – С. 9 – 14.
8. *Бабарыкин Н.Н.* Доменный процесс по новейшим исследованиям. Сборник статей [М.:Металлургиздат, 1963. – С.84 – 102.
9. *Исследование формирования профиля поверхности засыпи и структуры столба шихты в доменной печи* /В.А. Смоляк, Б.В. Щербицкий, Н.Т. Евсеева, В.И. Василенко //Сталь, 1974, №2. С. 100 – 103.
10. *Логонов В.И., Мусиенко К.А., Кучеров В.И.* Влияние структуры столба шихтовых материалов на ход доменной плавки. // Сталь. – 1986. – № 8. – С. 11 – 14.
11. *Фогельпот Г.Б., Стилл Г., Петерс М.* Исследование процесса стекания чугуна в доменной печи. //Черные металлы. – 1985. – №8. – С. 21 – 27.
12. *Naratou Shouichi* //Iron and Steel Inst. Jap. – 1981. – 67. – №12. – S.711.
13. *Ходак Л.З., Борисов Ю.И.* О скорости движения шихты в доменной печи. //Сталь. – 1971. – №3. – С.199–203.
14. *Поверхность засыпи шихты и ее связь с параметрами доменной плавки* [С.А. Бадин, М.Т. Бузоверя, Г.Ю. Воронин, С.Т. Шулико // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб.науч. тр. ИЧМ. – Киев: Наукова думка, – 1995. – С.57–68.
15. *Гришкова А.А., Клемперт В.М.* Работа доменной печи в форсированном режиме. // Сталь.– 1987. – № 9. – С.17–22.
16. *Hiroaki Nishio, Tatsuro Ariyama.* Influence of gas flow on burden distribution in blast furnace // Tetsu to Hagane, 1980, v.66. – P.98–107.
17. *Дружков В.Г., Ведешкин М.В., Подборных О.Н.* Очертания осевой зоны неподвижных материалов и траектории движения составляющих шихты в моделях доменных печей. // Сталь. – 1988. – № 12. – С.11–15.
18. *Клемперт В.М.* Автоматизация доменной печи. – М.:Металлургия, 1965. – 216с.
19. *Стефанович М.А.* Анализ хода доменного процесса. –Свердловск, 1960. – 286с.
20. *Пыжов В.Г.* Характер схода шихты в доменной печи. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1984. – №4. – С.5 –8.
21. *Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е.* Металлургия чугуна. – Киев: Выща школа, 1988. – 354 с.
22. *Клемперт В.М., Френкель М.М., Гришкова А.А.* Контроль и управление газораспределением доменной печи. – М.: Металлургия, 1993.
23. *Анализ скорости схода шихты в шахте доменной печи* / А.А. Гришкова, Д.С. Рубинштейн, И.А. Рылов, М.М. Френкель [С.86 – 8.
24. *Большаков В.И., Муравьева И.Г.* Перспективы управления ходом доменной печи с использованием результатов измерения профиля засыпи //Метал. и горноруд. пром–ность. – 2004. – №4. – С.81–84.

Статья рекомендована к печати к.т.н. Н.М.Можаренко