

УДК 669.162.

**В.И. Большаков, Н.А. Гладков, В.В. Лебедь**

### **ВЗАИМОСВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИХТЫ И ПРОЦЕССОВ ЕЕ ПЛАВЛЕНИЯ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Представлен обзор основных публикаций, посвященных взаимосвязи характера распределения шихтовых материалов на колошнике и процессов в нижней части доменной печи. Рассмотрены разработки ИЧМ по управлению распределением шихты с учетом особенностей процессов формирования жидких фаз.

Важнейшим условием высокопроизводительной и экономичной работы доменных печей является обеспечение благоприятных условий движения восстановительных газов через столб шихтовых материалов. Интенсивность доменной плавки в основном определяется газопроницаемостью материалов в шахте печи и гидродинамикой расплавов в нижней ее части. Значимость газодинамики в шахте в последние десятилетия, благодаря прогрессу в области подготовки сырья, постоянно снижалась. На современном уровне развития технологии доменной плавки все большее значение приобретают процессы, происходящие в нижней части печи – в зоне высоких температур.

Несмотря на значительную инерционность доменных печей, довольно часто происходят существенные колебания в тепловом состоянии и других параметрах работы. Причиной являются изменения в химическом и гранулометрическом составе железорудного сырья и кокса, а также ошибки технологического персонала в ведении плавки, выражаемые в несогласованности режима загрузки и газодинамических параметров дутья. Качество и химсостав шихтовых материалов не находятся в прямом распоряжении персонала, таким образом главными оперативными средствами управления эффективностью доменной плавки являются управление распределением шихты по радиусу и окружности печи посредством программы загрузки (управление «сверху») и воздействие на ход плавки дутьевыми параметрами (управление «снизу»). Возможности влияния указанных факторов при управлении ходом печи существенно зависят от оснащения средствами автоматизированного контроля, представления технологическому персоналу обработанной информации в удобном для восприятия виде, а также от совершенства систем управления механизмами и применяемых программ загрузки [1].

Регулирование радиального распределения шихтовых материалов издавна являлось одним из важных приемов управления ходом доменной печи. На доменных печах, оборудованных конусными загрузочными устройствами, траектория падения материалов в печь является стабильной, а профиль поверхности засыпи шихты на колошнике, как правило, имеет

форму конической воронки. Создание бесконусных загрузочных устройств (БЗУ) с распределителями, расположенными над поверхностью засыпи и обеспечивающими глубокое регулирование радиального распределения шихты, привело к существенному изменению техники управления загрузкой [1]. Программа загрузки, обеспечивающая заданное распределение рудных нагрузок по радиусу печи, может быть составлена путем достаточно большого количества сочетаний различных наборов рабочих позиций распределителя при выгрузке порций шихтовых материалов.

Одной из проблем эффективной эксплуатации доменных печей является установление рациональной структуры столба шихтовых материалов, оказывающей значительное влияние на различные процессы в рабочем пространстве печи. Трудности в определении закономерностей формирования структуры столба шихты и составляющих ее элементах приводят к необходимости моделирования как математического, так и физического (полукруглые и плоские модели). Особый интерес с точки зрения большей информативности представляют исследования на охлажденных азотом доменных печах.

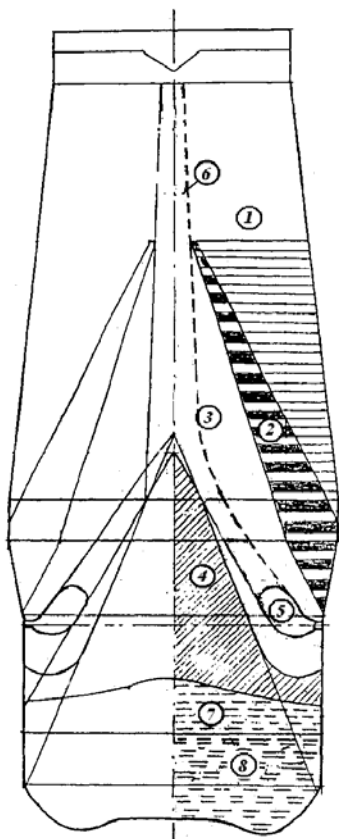
В Институте черной металлургии, исходя из данных собственных исследований и публикаций, в работе [2], развито представление о структуре столба шихты и влиянии на процессы плавки отдельных ее элементов.

Согласно современным представлениям в структуре столба шихтовых материалов выделяются следующие зоны (рис. 1):

① – Зона кусковых подвижных шихтовых материалов (сухая зона). В данной зоне осуществляется косвенное восстановление оксидов железа, то есть глубина развития сухой зоны обуславливает экономичность плавки, определяемую степенью использования тепловой и химической энергии газа.

② – Зона плавления (зона вязкопластичных материалов, пластичная зона), представленная размягченными и расплавленными слоями железорудных компонентов и коксовыми окнами между ними. В зависимости от принятого распределения рудных материалов и их качества, определяющих дутьевой режим, в доменной печи может быть сформирована зона плавления разного профиля, от которого зависит расход твердого топлива, производство печи, стойкость огнеупорной кладки в высокотемпературных зонах. Последнее достигается формированием узкой зоны плавления в осевой части печи, уменьшающей воздействие теплового потока на стены. Значительное развитие сухой зоны определяет уменьшение поверхности плавления, что связано с понижением интенсивности плавки, но обуславливает рост ее экономичности.

③ – Зона сплошной коксовой насадки. Через коксовую насадку просачиваются жидкие продукты плавки, распределение которых по сечению доменной печи соответствует распределению рудных нагрузок. Жидкост-



ная нагрузка на коксовую насадку снижает порозность последней вследствие внедрения в массу кокса оксидных расплавов, поступающих в горн совместно с коксом и осваивающихся только жидким шлаком. Характер распределения в насадке таких масс достоверно не изучен. Очевидным является лишь влияние этого процесса на газопроницаемость коксовой насадки и использование газа.

Рис.1. Схема структуры столба шихты в доменной печи.

В публикации [2] в коксовой насадке выделен коксовый канал (на рис.1 выделен пунктиром), являющийся своеобразным продолжением фурменной зоны, по которому отводятся газы в осевую зону печи. В литературе отсутствуют сведения о расположении и габаритах коксового канала. В некоторых работах проводится лишь линия, разграничивающая этот канал от образующей «тотермана», либо внутренней поверхности зоны плавления. В матери

риалах фирмы Тиссен приводится аналитическое выражение ширины канала, определяемой по количеству сжигаемого кокса в фурменной области. Ситуация, складывающаяся в коксовом слое, примыкающем к поверхности «тотермана», позволяет предполагать важную роль этого канала в обеспечении распределения газа по сечению печи.

④ – «Тотерман» – конусообразная малоподвижная масса уплотненного кокса, вершина которого может располагаться в приосевой зоне печи между распаром и серединой шахты. Ширина основания «тотермана» обусловлена глубиной проникновения дутья, при этом ниже уровня фурм уплотненная масса кокса сохраняется в виде столба (часто зонтичного вида), погруженного в расплав продуктов плавки. Данные последних исследований свидетельствуют о важной технологической роли «тотермана» в обеспечении осевого газового потока и отвода части газов, образующихся в расплаве горна за счет прямого восстановления попадающих туда окислов железа и вторичного окисления трудновосстановимых элементов. При этом особое внимание уделяется чистоте «тотермана», его

достаточной проницаемости не только для газов, но и металла, содержание углерода в котором является индикатором насыщения чугуна и показателем уровня расходования, растворения углерода в расплаве и, таким образом, очистки его от мелочи кокса, что способствует повышению стойкости углеродистых огнеупоров в горне.

⑤ – Фурменная зона с выраженными полыми образованиями внутри слоя кокса, сформированными очагами горения, и некоторой разрыхленной областью вокруг них. Работа фурменного очага зависит как от параметров дутьевого режима и геометрии фурменных приборов, так и от характера распределения материалов на колошнике и, особенно, их качества. Параметры фурменного очага помимо газо–теплого обеспечения процессов плавки, формируют структуру столба шихты под зоной плавления, заметно влияя на ее очертания и состояние. Выход и свойства горновых газов определяют глубину проникновения их вглубь горна и геометрию зоны горения, которая, в свою очередь, определяет размеры коксового канала, параметры и состояние «тотермана», а также состояние и дренажную способность коксовой насадки, заметно зависящей от качества кокса и высокотемпературных свойств рудных компонентов шихты. Состояние и параметры фурменной зоны обуславливают интенсивность плавки и ее энергоемкость.

⑥ – Отдушина – целенаправленно образованная в столбе шихты зона повышенной газопроницаемости, обеспечивающая в совокупности с распределением рудных нагрузок по равновеликим кольцевым зонам колошника управление распределением газового потока по радиусу и высоте доменной печи для достижения высокой степени использования газа при устойчивом сходе шихты. Отдушина может формироваться как в осевой зоне печи, так и на периферии. Осевая и периферийная отдушины относятся к управляющим элементам структуры, которые определяют рациональное распределение материалов и газового потока в печи и оказывают существенное влияние на структуру столба, процессы схода шихты, характер развития восстановительных и тепловых процессов, состояние кладки стен печи и др. Необходимость создания отдушин, особенно на печах большого объема, подтверждена практикой и определяется их влиянием на процессы и результаты плавки.

⑦ и ⑧ – Зоны жидких продуктов плавки – шлака и чугуна. Эти зоны разделены в объеме горна из-за большой разницы удельных весов продуктов плавки (шлака 2,6 и чугуна 6,9 т/м<sup>3</sup>). Вследствие заметной разницы температур у оси и на периферии горна и отличающихся здесь составов формирующихся оксидных фаз, поверхность шлака искривлена с выпуклостью у оси. Поверхность более плотного и однородного чугуна в горне практически горизонтальна.

Как следует из вышесказанного, зона плавления, ее форма и местоположение, является одним из наиболее важных элементов столба шихты, существенно определяя процессы как в «сухой», так и в высокотемпературной зоне доменной печи. Большое значение зоне плавления придавали еще «классики» теории доменной плавки: Павлов М.А., Готлиб А.Д., Остроухов М.Я., Стефанович М.А. и др. В основном их представления, сформированные в середине XX в., не утратили актуальности и в настоящее время, но при этом следует отметить, что в тот период условия доменной плавки существенно отличались от современных. Главным образом, это различия в шихтовых условиях: агломерат присутствовал в малых количествах, в основном использовалась руда, а наряду с коксом использовался древесный уголь; загрузка производилась исключительно конусными аппаратами; подача дутья осуществлялась без обогащения кислородом и с низким нагревом ( $500\text{--}700^{\circ}\text{C}$ ), а объем печей не превышал  $2000\text{ м}^3$ .

Значение ровности хода для обеспечения высокой эффективности доменной плавки широко известно. Рассматривая влияние зоны плавления на ровность хода плавки акад. М.А.Павлов в работе [3] отмечал: «...для правильной и однообразной работы печи и получения однородных, то есть постоянного состава, продуктов плавки нужно поддерживать горизонт шлакообразования на постоянной высоте...».

В работах того времени выделялось довольно четкое понимание влияния распределения шихтовых материалов на форму зоны плавления и ее газопроницаемость. М.А.Стефанович [4] по этому поводу утверждал: «...увеличение количества шлака или ухудшение его свойств делают необходимым или уменьшение количества дутья или переход к менее равномерному распределению шихты и газов по сечению... нужная газопроницаемость зоны плавления может быть получена путем создания соответствующего распределения». Остроухов М.Я. [5] приводит три случая формы и расположения линии шлакообразования в зависимости от различных условий доменной плавки (рис.2). Случай 1 на рис.2 соответствует сильному периферийному ходу, возникающему при работе на мелких пылеватых рудах и часто является следствием загромождения центральной части печи рудой. Случай 2 соответствует более умеренному потоку газа на периферии. Он характерен для печей, работающих на подготовленной шихте. Случай 3 относится к работе печи в условиях восточных районов на офлюсованном агломерате (позднее размягчение и плавление).

В современных условиях представления об образовании и функционировании зоны плавления значительно расширились, главным образом благодаря исследованиям на замороженных (охлажденных азотом) доменных печах [6, 7]. Типичные конфигурации зоны плавления, полученные в подобных исследованиях, представлены на рис.3.

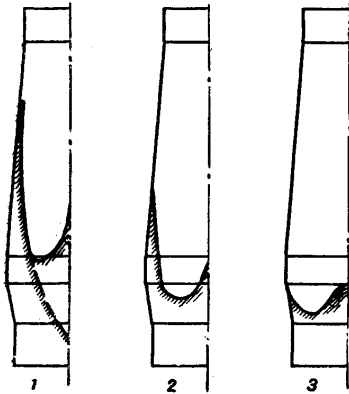
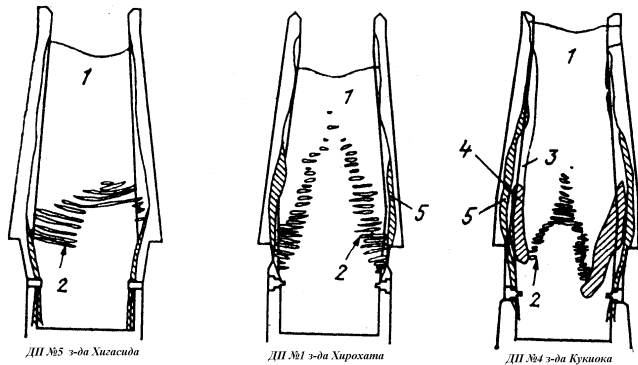


Рис.2. Линия плавления в доменной печи по М.Я.Остроухову.

Рис.3. Форма зоны плавления в замороженных доменных печах.

1 – область кусковых материалов; 2 – вязкопластичная зона; 3 – смешанная шихта; 4 – размягченная и расплавленная смешанная шихта; 5 – настилы.



Форма зоны плавления в большой степени зависит от способа загрузки и распределения шихты по сечению печи. Поскольку газопроницаемость изменяется в основном в результате изменения отношения руда/кокс (рудной нагрузки) по радиусу печи и гранулометрического состава шихтовых материалов, эти факторы влияют на форму зоны плавления.

Большой интерес представляют исследования влияния радиального распределения шихтовых материалов на форму зоны плавления с применением физических моделей. Так в работе [8] для изучения указанного влияния было построено несколько моделей. Результаты некоторых исследований на моделях приведены на рис.4. Диаграммы относительных скоростей газа приблизительно характеризуют форму зоны плавления. Как видно, при распределении рудных нагрузок наиболее близких к равномерному (распределение *с*), форма зоны плавления наиболее пологая. При неравномерном распределении шихты по радиусу (*б*) форма зоны плавления становится выпуклой.

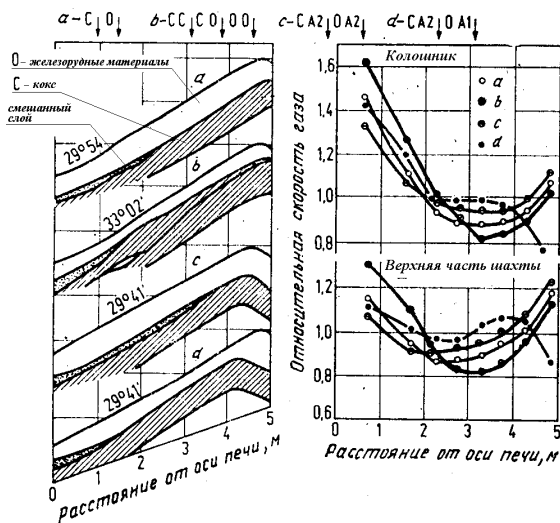


Рис.4. Распределение шихты и газа при различных способах загрузки.

рудных нагрузок (рис.5а). Результаты представлены на рис.5б. Очевидна зависимость формы и расположения зоны плавления от характера распределения шихтовых материалов. При плавном нарастании отношения квази-руда/кокс от оси к стенке, зона принимает слабовыраженную Λ-образную форму.

При распределении рудных нагрузок с максимумом посередине радиуса печи— форма зоны плавления W-образная. При низкой рудной нагрузке на участке от оси до середины радиуса с резким возрастанием ее у стенки, зона плавления имеет форму перевернутой буквы «U».

Влияние формы и расположения зоны плавления на технологические показатели доменной плавки нельзя корректно определить на основании моделирования или изучения столба шихты в замороженных печах; необходимы исследования на работающих печах. Существуют различные способы оценки формы и расположения зоны плавления на действующей доменной печи: по температуре и составу газа по радиусу в области колошника; по температуре газа, измеряемой зондами в радиальном направлении на колошнике и в шахте; по статическому давлению, измеряемому в вертикальном направлении, и потере напора между областью стекания жидких продуктов плавки и областью кусковых материалов. В Японии помимо указанных способов применяется также оптоволоконная технология, реализованная в виде датчиков со световодами. Датчики устанавливаются в нижней части шахты, распаре и заплечиках, что позволяет определить положение корня зоны плавления по интенсивности светового излучения расплавленных шихтовых материалов. Для определения формы

зоны плавления применяется также горизонтальное зондирование нижней части печи с помощью зондов, оснащенных светопроводящими волокнами.

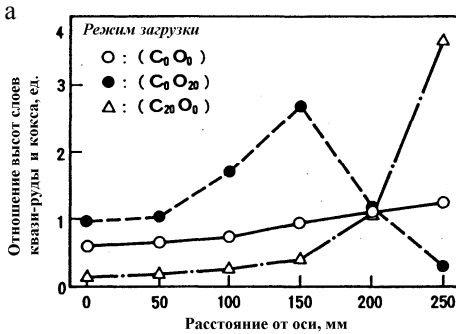
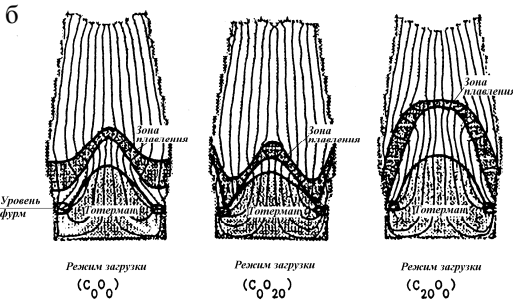


Рис.5. Радиальное распределение квази-рудных нагрузок на двухмерной физической модели доменной печи при различных режимах загрузки (а) и соответствующие им схемы зоны плавления (б).



На рис.6 показана, определенная по величине статического давления, форма зоны плавления на печи №3 завода Кимицу. Средняя часть  $\Lambda$ -образной пластичной зоны от одного периода к другому сужается. По мере этого сужения возрастает степень использования газового потока, снижаются расход топлива, температура колошникового газа и тепловые потери через стенку шахты.

Еще одним наглядным примером изменения удельного расхода кокса в зависимости от профиля зоны плавления являются результаты исследований, опубликованные в работе [10] (рис.7).



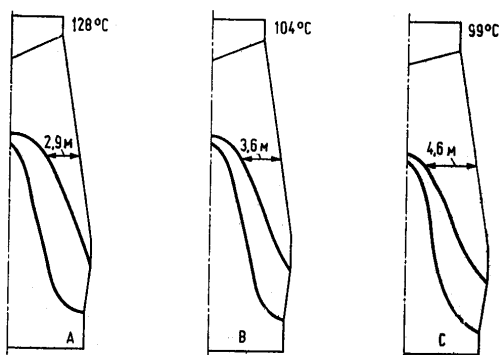


Рис.6. Определенная по статическому давлению форма зоны плавления на ДП №3 завода Кимйцу и основные показатели работы печи в трех периодах (А–С).

	A	B	C
Производство, т/сут	9 861	9 676	9 559
Расход кокса, кг/т чугуна	374	368	365
Расход магнез. кг/т чугуна	75	69	66
Расход топлива, кг/т чугуна	449	437	431
Степень использования CO, %	49,4	51,5	52,3
Теплототери в низте, ккал/мин	$1,247 \times 10^4$	$979 \times 10^4$	$968 \times 10^4$

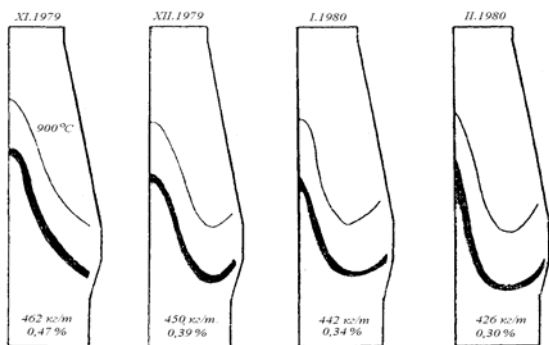


Рис.7. Варианты профиля зоны плавления и соответствующие им расход кокса и содержание кремния в чугуне.

Как отмечалось выше, геометрические параметры зоны плавления существенно зависят от распределения шихтовых материалов (рудных нагрузок) по радиусу колошника. Гидродинамические процессы, происходящие в коксовой насадке под зоной плавления, также обусловлены распределением рудных нагрузок. Количество образующихся жидких фаз прямо пропорционально величине рудной нагрузки, что вполне логично. Дренаживание капельно-жидкой фазы через пустоты коксовой насадки однозначно снижает порозность последней, что непосредственно сказывается на ее газопроницаемости. Таким образом, в условиях высокотемпературной области доменной печи естественной представляется необходимость использования при рассмотрении газодинамики коксовой насадки понятия «жидкостной нагрузки», как аналога рудной нагрузки, оказы-

вающей главенствующее влияние на газодинамику сухой зоны. Но для полноценного анализа гидро–газодинамических процессов, происходящих в нижней части печи, оперирование лишь величиной удельной жидкостной нагрузки, как отношения количества жидких фаз к количеству кокса, недостаточно. Необходима разработка системы показателей и критериев, однозначно характеризующих свойства жидких фаз (особенно вязкостных и поверхностных) в сопряжении с их количеством.

В доменном производстве для обеспечения заданного качества чугуна с учетом имеющихся шихтовых условий, как правило, железорудная порция представлена совокупностью различных по химсоставу основных компонентов и добавок, характер распределения которых обуславливает свойства жидких фаз в нижней части печи. Следует отметить, что даже при наличии достаточно точных оценочных показателей влияния свойств оксидных расплавов на технологические показатели плавки довольно сложной остается проблема осуществления требуемого распределения свойств и количества жидких фаз, как следствия распределения шихтовых материалов на колошнике.

В работе [11], на основе выполненных в ней исследований, показана необходимость совершенствования подходов, методик и вариантов рационального распределения шихты по радиусу колошника с учетом ее химического состава. В настоящее время в ИЧМ разрабатывается теоретическая база для создания приемов распределения шихтовых материалов, учитывающих особенности образования жидких фаз по высоте и по радиусу печи. Такой подход позволит формировать направленное распределение газов и потоков жидкости по сечению печи для достижения максимальной эффективности доменной плавки, получения чугуна заданного качества и увеличения продолжительности кампании печи [12].

Увеличение доли окатышей в шихте доменных печей в последние десятилетия существенно увеличило актуальность исследований распределения окатышей в смеси с агломератом [13]. Различное соотношение агломерата и окатышей в равновеликих кольцевых зонах колошника приводит, как сказано выше, к различным свойствам жидких фаз в зоне плавления и под ней. В работе [13] установлен желательный характер распределения доли окатышей в различных кольцевых зонах доменной печи. Так, в периферийной зоне колошника следует ограничивать долю окатышей (особенно неофлюсованных), так как из–за их низкой основности усиливается эрозия футеровки печи и повышается вероятность прогара воздушных фурм. ИЧМ реализовал новые приемы загрузки шихтовых материалов, внедренные на доменных печах, оборудованных БЗУ. Один из них заключается в формировании на конвейере железорудной порции с головной частью из агломерата без окатышей. Другой прием представляет собой способ загрузки, при котором в пристеночной зоне колошника образуется замкнутое кольцо из агломерата (так называемый, «валик»).

Закключение. Одним из основных оперативных средств управления ходом доменной плавки является управление распределением шихтовых материалов по сечению печи посредством изменения программы загрузки. Наиболее критичным элементом столба шихтовых материалов является зона плавления, форма и расположение которой весьма существенно влияют на технологические показатели доменной плавки: ровность хода, экономичность, продолжительность кампании и производительность. В Институте черной металлургии разработаны приемы распределения шихтовых материалов на печах, оснащенных БЗУ, с учетом основности шихты. В настоящее время в Институте разрабатывается теоретическая база для создания приемов распределения, учитывающих особенности образования жидких фаз в высокотемпературной области доменной печи.

1. *Большаков В.И.* Теория и практика загрузки доменных печей. – М.: Металлургия. 1990. – 256 с.
2. *Роль структуры столба шихты в достижении высокой эффективности доменной плавки / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, И.Г. Муравьева // В сб. научн. трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Киев: Наукова думка, 2002. – Вып.5. – С.27–38.*
3. *Павлов М.А.* Металлургия чугуна, ч. II. Доменный процесс. Металлургиздат, 1944.
4. *Стефанович М.А.* Анализ хода доменной плавки. Свердловск, 1960.
5. *Остроухов М.Я.* Процессы шлакообразования в доменной печи. Металлургиздат, 1963, – 223с.
6. *Kodama K.* Trans. Iron Steel Inst. Japan, 1971, 11, Suppl. I, S. 112–117.
7. *Kanbara K.* Proc. Ironmaking Conf., Iron Steel Div., Metallurg. Soc. Amer. Inst. min. metallurg. petrol. Eng., 1974, 33, S. 416–422.
8. *Совершенство технологии доменной плавки в Японии / Й. Хосидэ, С.Такаги, А. Юномура. // Черные металлы, – 1980, – №25/26, – С. 3–14.*
9. *Tetsu to Hagane*, 1991, №10
10. *Modele mathematique Simplifie pour l'evaluation de la repartition des temperatures dans un haut fourneau / H.Itaya, F.Aratani, A.Koni, S.Kiyohara // Revue de Metallurgie – CIT. –1982 may, – P.443–450.*
11. *Оптимизация состава и режима загрузки шихтовых материалов с целью повышения эффективности доменной плавки / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, Д.Н. Тогобицкая // Сталь. – 2001. – №4 –С.6–10.*
12. *Оценка технологических свойств жидких фаз в текущих условиях доменной плавки / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, В.В. Лебедь // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2004, №2. С.31–36.*
13. *Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / В.И.Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, Ю.А. Богачев // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002, №6. С.11–15.*

*Статья рекомендована к печати д.т.н. И.Г.Товаровским*