

В.И.Большаков, Г.Н.Голубых, Н.М.Можаренко, Л.Г.Тубольцев

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ ЗАДУВКЕ И ВЫДУВКЕ

Изложен опыт задувки и выдувки доменных печей, являющийся основой для определения влияния технологических, технических и организационных факторов на обеспечение безопасной эксплуатации доменных печей в нестационарных режимах в рамках программы «Ресурс».

Современное состояние проблемы промышленной безопасности.

Особенностью современного доменного производства является значительное увеличение единичной мощности основных агрегатов, совершенствование технологического процесса доменной плавки, модернизация конструкций и оборудования доменных печей (ДП) [1]. Наряду с требованием обеспечения качества продукции (чугун, шлак, доменный газ), неперменной целевой установкой для производственного процесса является обеспечение промышленной безопасности доменных печей, стабильности производственного процесса и максимальной продолжительности кампании доменной печи. Помощь производственному персоналу доменной печи в обеспечении безопасного протекания процессов восстановления и плавки должны оказывать системы автоматизированного контроля и управления производственным процессом [2]. В конце 70-х годов прошлого столетия на доменных печах начали устанавливать развитые автоматизированные системы управления доменной плавкой, основанные на использовании моделей технологических процессов, экспертных систем и других элементов искусственного интеллекта. Такие системы контролируют ключевые параметры режима доменной плавки, обработанные данные о величине и тенденциях изменения которых используются для управления ходом печи. Мониторинг хода доменной плавки является также одной из составляющих промышленной безопасности работы доменной печи [3].

Наиболее опасными с точки зрения возникновения аварий являются периоды работы печи в нестационарных условиях, когда происходит резкое изменение технологических параметров и персонал должен принять соответствующие меры по контролю и стабилизации хода плавки. Эти меры относятся к так называемому «кризисному менеджменту» и должны выполняться по специальным технологическим инструкциям. К «кризисному менеджменту» должны быть отнесены и работы в нестационарных условиях работы печи в период ее задувки и выдувки.

В общем случае параметры мониторинга работы доменной печи представлены на рис.1, где показаны наиболее опасные участки печи, требующие соответствующего мониторинга.

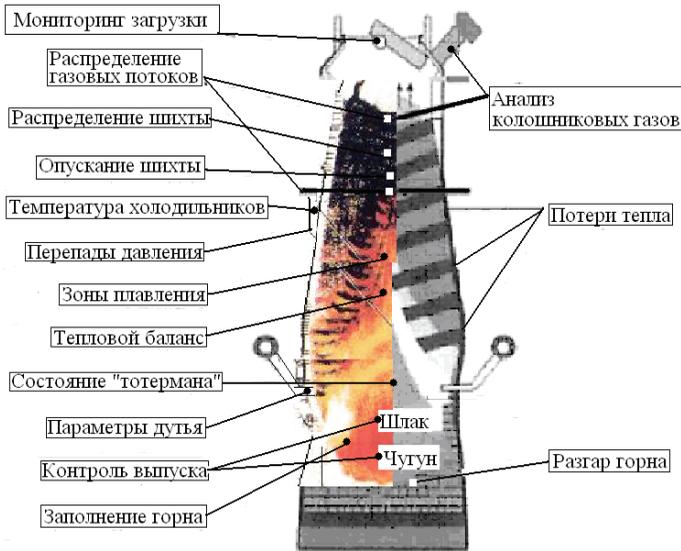


Рис.1. Параметры, необходимые для эффективного мониторинга процесса доменной плавки.

Доменные печи относятся к категории взрывопожароопасных производственных объектов, в которых используются, образуются и транспортируются взрывоопасные и воспламеняющиеся вещества – жидкости, газы, пыли, а также жидкие чугун и шлак с температурой 900–1500⁰С. Поэтому неременным условием высокопроизводительной и безаварийной их работы должно быть строгое соблюдение технологии плавки в конкретных условиях. Доменное производство относится к техногенно и экологически опасным объектам металлургии. По количеству произошедших аварий в черной металлургии на первом месте стоят системы доменных печей, газоочистки и газопроводы.

За последнее время на доменных печах Украины и России участились случаи аварий при их работе в нестационарных режимах, которыми являются пуско–остановочные операции. Изучение взрывов промышленных газов на предприятиях черной металлургии показывает, что 28% от общего количества взрывов приходится на технологические комплексы ДП, включающие воздухонагреватели, пылеуловители и скрубберы с прилегающими газопроводами, причем около 90% этих взрывов приходится на пуско–остановочные операции, в том числе: до 60% взрывов на доменных печах возникло при выполнении пусковых операций и около 40% – при выполнении операций по остановке печей. Поэтому необходимо тщательно подготавливать и аккуратно выполнять пусковые и остановочные операции в соответствии с заранее составленными планами и инструкциями, обеспечивающими эксплуатационную безопасность и технологическую

устойчивость процесса плавки при задувках и выдувках [4].

В нестационарных условиях работы важно не только обеспечить выполнение работ в соответствии с разработанными технологическими инструкциями, но и обеспечить накопление информационного опыта о работе ДП. Это позволит обеспечить многоуровневый контроль соблюдения условий промышленной безопасности в дальнейшем, поскольку малейшая ошибка обслуживающего персонала может привести к тяжелым последствиям. Схема такого многоуровневого накопления информации и опыта приведена на рис.2.

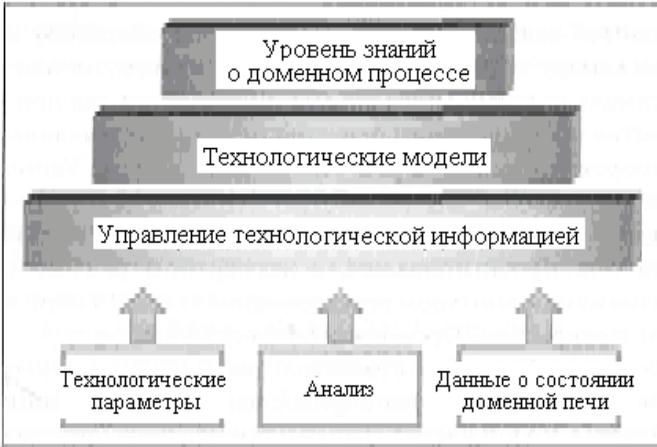


Рис.2 Структурная схема получения информации о процессе доменной плавки.

Опыт обеспечения промышленной безопасности свидетельствует, что обслуживающему персоналу необходимо постоянное повышение уровня знаний и обобщение опыта предотвращения и ликвидации аварийных ситуаций, особенно на таких сложных и потенциально опасных металлургических агрегатах, как доменная печь.

Система управления предприятием требует ориентации на будущее и должна непрерывно совершенствоваться для достижения максимального уровня промышленной безопасности доменной печи. Таким образом, возникает необходимость разработки и совершенствования параметров, обеспечивающих достаточный объем информации для принятия оптимальных управленческих решений при нестационарных условиях работы ДП. Анализ показывает, что даже на зарубежных предприятиях существующие системы управления промышленной безопасностью недостаточно жизнеспособны, слишком сложны, дороги и трудны в обслуживании [5], что связано с риском неадекватного отображения внутри системы информации о состоянии металлургического агрегата и, соответственно, принятия неверных управленческих решений. Таким образом,

чем выше используемый на предприятии уровень стандартов, технологических инструкций и другой возможной информации, тем больше вероятность достижения максимальных производственных результатов (рис.3), в частности, повышения производительности и обеспечения промышленной безопасности.

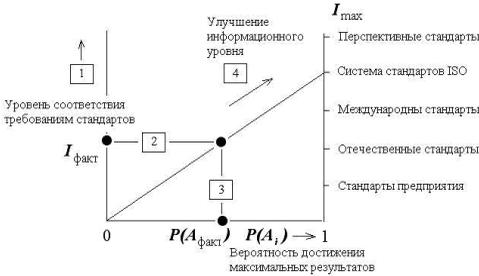


Рис.3. Базовые элементы информационного обеспечения системы управления металлургическим предприятием. 1 — уровень соответствия стандартов предприятия принятым в отечественной и международной практике; 2 — фактический уровень информационного обеспечения предприятия; 3 — вероятность достижения предприятием максимально возможных результатов в различных сферах своей деятельности; 4 — направление улучшения уровня информационного обеспечения предприятия.

Один из возможных вариантов концептуальной схемы промышленной безопасности работы доменной печи показан на рис.4 [6].

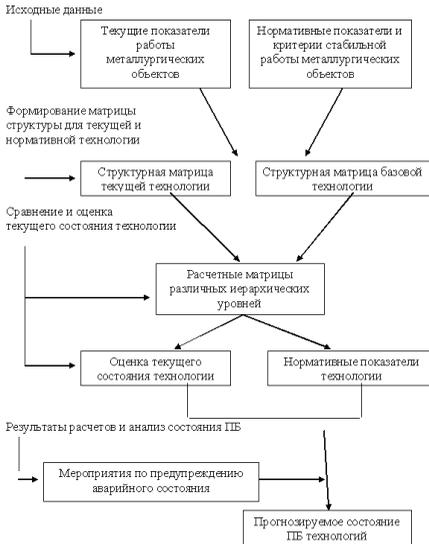


Рис.4. Алгоритм расчета и оценки показателей и критериев системы промышленной безопасности доменной печи.

Важное место в системе промышленной безопасности занимает формирование матрицы структуры для текущей и нормативной технологии ведения доменной плавки. Одной из форм такой информации является технологическая инструкция, которая предписывает действия обслуживающего персонала доменной печи в период стационарных или нестационарных условий ее работы [7].

Из всех операций, которые выполняются на доменных печах, наиболее опасными, наименее изученными и регламентированными являются задувка и выдувка печей. Ниже приводятся данные исследований и

имеющегося опыта по технологическим операциям, обеспечивающим достижение оптимальных результатов и промышленной безопасности при задувке и выдувке доменной печи.

Опыт выдувки и задувки доменных печей

Причины и категории остановок доменных печей разнообразны. Остановить доменную печь – значит, прекратить загрузку в нее шихтовых материалов и подачу дутья и отделить печь от газовой сети. Специфика доменного процесса устанавливает определенную очередность работ по остановке и пуску во избежание аварий или тяжелых расстройств хода ДП. Остановка доменных печей на все виды капитальных ремонтов осуществляется, как правило, в действующем цехе. Остановки на капитальные ремонты 1-го, 2-го и 3-го разрядов ДП обуславливаются, как правило, их эксплуатационным состоянием. По данным статистики основной причиной остановок ДП на капитальные ремонты 1-го и 2-го разрядов является износ футеровки колошника, шахты, заплечиков, распара, лещади и горна. В результате использования в шахте, распаре и заплечиках новых огнеупорных материалов и новой технологии восстановления футеровки – торкретирования в сочетании с эффективной системой охлаждения длительность кампании печи не лимитирует в основном состояние горна или целесообразность реконструкции печи.

Для проведения капитальных ремонтов 1-го и 2-го разрядов необходима выдувка ДП, при которой рабочее пространство печи освобождается от шихтовых материалов путем их сжигания и проплавки, при подаче воздуха через фурмы, без загрузки новых порций шихты. Все работы по остановкам ДП с частичной или полной их выдувкой согласуются с правилами безопасности. Разрешение на начало опускания уровня засыпи для выполнения капитального ремонта дается только при условии ровного, устойчивого хода печи, соблюдении установленного на этот период графика отработки продуктов плавки и физическом нагреве чугуна до 1450–1500⁰С. Режимы дутья и загрузки шихтовых материалов должны обеспечивать постепенное опускание шихты, а температура газов на колошнике не должна превышать 500⁰С [8,9].

Выдувка ДП, и особенно печей большого объема (3000–5500 м³), представляет собой ответственную и сложную операцию, которая должна быть тщательно подготовлена и требует от эксплуатационного персонала определенных производственных навыков. Перед началом выдувки все охлаждающие приборы печи должны быть проверены. При обнаружении течи поврежденные холодильники заменяют или отключают. Проверяют поступление пара в пылеуловители, газопровод грязного газа, скруббер, работу атмосферных клапанов печи и пылеуловителей, исправность отсечного клапана. Проверяют и устраняют обнаруженные неисправности в контрольно-измерительных приборах. Для подачи воды в печь через колошник к каждому газоотводу подводят водопроводные трубы диаметром не менее 50 мм, проверяют работу насоса для подачи воды на колош-

ник. Подача воды в печь должна осуществляться разбрызгиванием ее в виде дождя. До начала выдувки из шихты выводят марганцевую руду и металлодобавку, увеличивают расход кокса (из расчета 0,9–1 т на 1 т чугуна) и снижают основность шлака до 1,0–1,15. Во время выдувки печи через каждый час контролируют состав колошникового газа (содержание водорода должно быть не выше 12%, а кислорода – не выше 1%). Началом выдувки считается прекращение загрузки печи.

Основные операции и последовательность их выполнения при выдувке ДП следующие [10]:

перед началом выдувки в печь загружают 10–15 холостых подач кокса;

из пылеуловителя выпускают пыль, а перед отключением печи от общего газопровода его полностью очищают от пыли;

печь переводят на нормальное давление, уменьшают на 10–12% количество дутья и прекращают ввод в дутье природного газа и кислорода;

отключают уравнильный газопровод, открывают на печи уравнильные клапаны и подвергают тщательной вентиляции с предварительной продувкой паром;

открывают атмосферные клапаны печи и пылеуловителя, отделяют печь от газовой сети секторной задвижкой, выключают подачу воды в скруббер, включают подачу пара под колошник, в пылеуловитель, газопровод и скруббер;

включают подачу воды в печь и прекращают загрузку шихты;

температуру колошника регулируют количеством подаваемой воды, так чтобы она не превышала 500⁰С;

количество дутья постепенно уменьшают по мере опускания столба шихты, так чтобы к концу выдувки уровень шихты достиг оси воздушных фурм, а избыточное давление дутья не превышало 0,25–0,3 ати;

контролируют уровень засыпи шихты с помощью зондовых и радиометрических уровнемеров;

последний выпуск чугуна и шлака через чугунную летку производят при подходе уровня шихты к зоне заплечиков;

при потемнении фурм (что свидетельствует об отсутствии кокса на фурмах, т.е. завершении выдувки) избыточное давление дутья понижают до 0,1–0,15 ати, прекращают подачу воды в печь;

прекращают подачу газа в воздухонагреватели, перекрывают газопровод чистого газа, пропаривают его и тщательно вентилируют;

производят выпуск «козловой» чугуна через заранее подготовленную «козловую» летку;

производят другие операции согласно инструкции по остановке печи.

Выдувка имеет свои особенности в зависимости от вида предстоящего ремонта, конструкции газового хозяйства, места расположения вспомогательных сооружений и ряда других условий. Поэтому в каждом отдельном случае печь выдувают по специальной инструкции, составленной

начальником доменного цеха и утвержденной главным инженером предприятия. Выдувка печи сопровождается опасностью образования взрывоопасной смеси газа и воздуха в освобождающемся рабочем объеме. В период выдувки возникают большие и резкие колебания давления газов в печи. Особенно опасное положение возникает в газовой системе при подвисаниях, осадках и обрывах шихты. Другим опасным фактором, сопровождающим выдувку, является подача воды в печь для охлаждения газов. Если вода вводится в печь только сосредоточенными струями, то масса шихты, охлаждаясь, затвердевает и закрепляется на стенках профиля печи, создавая угрозу обрывов и толчков в газовой системе [11].

Указанные причины могут приводить к таким, например, авариям при выдувках ДП [12,13]. Доменная печь (объемом 982 м³) останавливалась на капитальный ремонт 2-го разряда с выдувкой до уровня воздушных фурм. Во время остановки печи в первичном пылеуловителе произошел взрыв, разрушивший конический купол пылеуловителя. Силой взрыва разорванные части купола забросило на расстояние около 20 м на перекрытие литейного двора. Аварийная ситуация развивалась по следующему сценарию. Перед началом выдувки ход печи был неровный и односторонний из-за настыли в шахте. За 25 дней до остановки печи вышел из строя вращающийся распределитель шихты, работа его не была восстановлена и, поэтому распределение газового потока и шихтовых материалов было дезорганизовано. Вскоре после начала выдувки печь пошла обрывами с резкими колебаниями давления газа. Руководством цеха было принято решение: для предупреждения обрывов делать через каждые 25–30 мин искусственные осадки. Через 3,5 ч такого режима работы при давлении дутья 0,6 ати произошел произвольный обрыв шихты с повышением давления газа в печи до 3000 мм вод.ст. (0,3 ати), который сопровождался большим шумом в печи, сотрясением фундамента, конструкций печи и поддоменника. Обрушилась настыль. В этот же момент под первичным пылеуловителем возникло пламя взрыва с разрушением купола. Зарегистрированное избыточное давление дутья при этом было 1,65 ати.

Другой пример, на выдутой для капитального ремонта 1-го разряда ДП производилась подготовка к выгребке обрушенной футеровки шахты через проем, сделанный в заплечиках, перед которым находилась бригада ремонтников [13]. В печи произошел взрыв с выбросом на поддоменник пламени на расстояние 10 м с тяжелым травмированием людей. Авария развивалась следующим образом. Согласно инструкции обрушение кладки неохлаждаемой зоны шахты следовало произвести после демонтажа засыпного аппарата. Демонтаж был задержан по организационным причинам, и удаление кладки осуществили взрывным способом при закрытом колошнике. Детального осмотра сегментов колошника и их крепления не сделали, массу углеродистой пыли, скопившейся в районе сегментов, не удалили. Продолжительность заливки печи составила всего 4,5 ч, полнота ее, как выяснилось позже, была недостаточной. Газ, взятый на уровне

фурм незадолго до аварии, содержал до 10,7% водорода и 26,3% моноокси углерода. Он адсорбировался на поверхности материалов, находившихся на 1,3 м выше горизонта фурм (дефект выдувки). Вентиляция горна для удаления из него газа была недостаточной. Непосредственной причиной аварии и группового несчастного случая послужил взрыв пылегазовоздушной смеси, образовавшейся при внезапном обрушении оставшихся сегментов колошника, с горячей дисперсной сажистой пылью. Выделявшийся из горна газ снизил нижний концентрационный предел взрываемости смеси и минимальную температуру ее воспламенения. Максимальное по расчету избыточное давление в эпицентре взрыва составило не менее 0,3 МПа, что и послужило причиной выброса пламени на большое расстояние.

Причины аварийных ситуаций при выдувках ДП следующие [8,12,13]:
неправильное ведение выдувки, т.е. отсутствие технологической согласованности между количеством дутья, его давлением и уровнем засыпки;

недостаточное количество и давление пара в пылеуловителе для нейтрализации взрывоопасной смеси;

недопустимое ведение печи с обрывами на ходу и осадками;

недостаточный уровень выдувки шихты и ее заливки для охлаждения горна печи;

нарушение правил по надзору за состоянием системы охлаждения и предупреждения попадания воды в печь; прогар фурменных приборов;

образование взрывоопасной смеси газа с воздухом;

отсутствие на ДП радарных уровнемеров, позволяющих контролировать по всей высоте шахты печи положение и скорость опускания шихты.

Сочетание дутьевого режима с контролем уровня шихты в печи, замедленном на всем протяжении выдувки, необходимо для ее безопасного ведения. Наиболее опасными являются режимы, когда при выдувке печи на капитальный ремонт 1 разряда нарушается баланс между весом столба шихты и напором дутья. Установленные на ДП традиционные средства контроля уровня засыпки – механические зонды, позволяют контролировать положение опускающейся поверхности шихты до уровня 4–5 м. При этом текущий контроль этого параметра, прогноз подвисаний и обрывов шихты, а также корректировка дутьевых, тепловых параметров и режима загрузки невозможны. Для непрерывного контроля ровности схода шихты при выдувке ДП–9 «Криворожстали» в 2003 г. по рекомендации Института черной металлургии впервые в отечественной практике применен радиолокационный измеритель дальности, установленный на куполе печи и обеспечивший измерение скорости схода шихты на глубину более 30 м. Это позволило обеспечить безопасность интенсивной выдувки печи перед капитальным ремонтом [14]. Анализ результатов выдувки ДП «Северстали» позволил установить еще один достаточно эффективный метод определения характера схода шихтовых материалов, основанный на получении

нии непрерывной информации о составе газа. По характеру кривых CO_2 , CO и H_2 можно достаточно точно определить как опускается шихта – ровно или с подстоями, а при достижении уровня засыпи 1,0–1,5 м происходит быстрое перераспределение содержания CO_2 и CO . Содержание CO уменьшается практически до 1,0–1,5 %, а CO_2 увеличивается до уровня горнового газа. Это однозначно свидетельствует об окончании процесса выдувки печи и обеспечивает ее безаварийное ведение. Примером успешного завершения 16-летней кампании на ДП-6 компании «Cogus Ijmuide» (объем 2678 м³), оснащенной бесконусным загрузочным устройством (БЗУ), за время которой было выплавлено 34,3 млн.т чугуна, является ее выдувка на капитальный ремонт 1-го разряда в 2002 г. За несколько дней до выдувки понизили основность шлака, периферийный газовый поток увеличили для очистки профиля печи, расход кокса повысили до 400 кг/т чугуна (с учетом вдувания пылеугольного топлива (ПУТ)), уровень кремния увеличили до 0,55%, для ускорения выдувки уровень засыпи шихты снизили на 5 м. ДП была выдута за 10 ч. Верхние разбрызгивающие сопла контролировали индивидуально для равномерного распределения охлаждающей воды и осуществления наблюдения за температурой в 4-х восходящих газоотовах. Во время выдувки температура колошникового газа поддерживалась в пределах 300–350⁰С, уровень водорода увеличился до 8,5%. В соответствии с графиком выдувки подача ПУТ была постепенно уменьшена и в конечном итоге отключена. Выпуск чугуна из печи за время выдувки осуществлялся 3 раза с температурой на уровне 1480⁰С, а кремний не падал ниже 0,45%. ДП отключили от газоочистной системы, когда содержание CO упало ниже 20%, а содержание CO_2 увеличилось до более 10%. Спустя 15 ч после остановки печи последовательно с двух сторон произвели выпуск «козлового» чугуна, по расчетам ожидаемый в размере 1200 т, из которых удалось выпустить 240 т. Оставшиеся 940 т можно было объяснить затвердевшей насталью, которую удалили с помощью взрывчатки. ДП охлаждали водой в течение 36 ч [15].

Работа вновь построенной, реконструированной или капитально отремонтированной по 1-му разряду доменной печи начинается с задувки. От тщательного ее выполнения в значительной мере зависит продолжительность кампании ДП, а также безаварийная и высокопроизводительная работа печи, получение расчетных по составу и свойствам жидких продуктов плавки и наиболее быстрое достижение проектных технико-экономических показателей. При задувках ДП необходимо: во-первых, сохранить футеровку горна и лещади, во-вторых, не допустить резкого повышения температуры в горне и образования взрывоопасной газовой смеси в газозаходах. Перед задувкой ДП осуществляют проверку всего комплекса сооружений печи на плотность и прочность, опробование и регулировку механизмов и системы охлаждения, сушку огнеупорной кладки ДП и воздухонагревателей, составление задувочной

шихты, загрузку печи шихтовыми материалами.

Сушку огнеупорной футеровки печи и воздухонагревателей выполняют по утвержденному графику постепенным увеличением температуры в течение нескольких суток так, чтобы не нарушить целостности огнеупорной кладки. Разогрев кладки при сушке печи позволяет избежать резкого повышения температуры поверхности футеровки в области горна и лещади после пуска горячего дутья в горн. Наибольшее распространение получила сушка печи нагретым дутьем путем подачи его в печь через воздушные фурмы (значительно меньшее – коксовым газом и дровами). Количество и температуру дутья поддерживают такими, чтобы температура газа в газопроводах не превышала 450°C . Сушка воздухонагревателей производится раньше сушки ДП, так как для ее сушки необходим подъем температуры под куполом воздухонагревателей до $900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ [10].

Следует отметить, что, по данным зарубежной доменной практики, четкого мнения об оптимальной продолжительности сушки нет. Обычно сушку ДП проводят в течение 10–20 сут., иногда сокращают до 7–9 сут. Так, футеровку ДП–1 в Торонто, Италия, подвергали сушке в течение 9 суток дутьем, нагретым до $300\text{--}450^{\circ}\text{C}$. Первые 3 суток дутье подавали через чугунные летки с целью доведения температуры кладки в районе леток до 300°C , в следующие 3 суток – через все воздушные фурмы, подвергая сушке остальную часть футеровки печи, в последние 3 суток сушку осуществляли при несколько пониженной температуре дутья [16]. Важное значение при сушке футеровки имеет дутьевой режим. Например, на ДП–6 завода в Тибо, Япония, в период сушки в рабочее пространство печи подавали до $3500\text{ м}^3/\text{мин}$ дутья, нагретого до 430°C . При этом, чтобы защитить механизмы БЗУ от воздействия высоких температур, в него подавали холодное дутье и температуру отходящих газов поддерживали на уровне 350°C [17]. На заводе в Фос–сюр–Мере, Франция, кладку двух ДП сушили в течение 6–7 суток дутьем, нагретом до 200°C , сначала в количестве $80\text{--}90\text{ тыс. м}^3/\text{ч}$, а затем – $120\text{ тыс. м}^3/\text{ч}$, после чего печи 2 суток охлаждали [18]. На некоторых металлургических заводах в Японии ДП подвергают сушке в течение 5–7 суток.

Загрузке доменной печи предшествует расчет задувочной шихты, который ведут, как правило, на получение литейного чугуна, содержащего 2,0–3,0% Si, 0,3–0,8% Mn и $<0,1\%$ S. Существуют приближенные методики расчета задувочной шихты, основанные на практике задувки ранее введенных в эксплуатацию ДП. Задувочную шихту рассчитывают на большой расход кокса: 2,2–2,5 т на 1 т чугуна вместо 0,6–0,7 т при выплавке литейного чугуна в нормальных условиях. Высокий расход кокса в задувочной шихте вызывается необходимостью нагрева холодных футеровки печи и столба шихтовых материалов, а также повышенным расходом тепла на восстановление оксидов железа. В связи с этим первые подачи задувочной шихты состоят только из кокса и небольшого количества флюса, необходимого для ошлакования золы кокса. В последующих по-

дачах по мере загрузки печи увеличивают количество железосодержащих материалов так, чтобы в последних порциях шихты расход кокса не превышал 1,2–1,3 т/т чугуна. Поэтому задувочная шихта состоит из нескольких шихт с различным расходом горючего. На некоторых заводах Украины задувочная шихта состоит из двух отдельных шихт: первая шихта – только кокс и известняк, вторая – кокс, известняк, сортированная железная руда и марганцевая руда. Постепенное увеличение рудной нагрузки достигается изменением соотношения между холостыми и содержащими руду подачами. К физико–химическим свойствам материалов, идущих в задувочную шихту, предъявляют повышенные требования. Кокс должен быть механически прочным (показатель $M_{40} > 82\%$) во избежание образования большого количества мелочи при падении с большой высоты во время загрузки печи. В задувочной шихте используют кусковую сравнительно бедную ($Fe=45–50\%$), но легко восстанавливаемую гематитовую железную руду, для получения большего количества шлака (650–800 кг) на единицу чугуна с тем, чтобы улучшить его десульфурацию и обеспечить нормальный процесс восстановления в столбе шихты после задувки. Разработанная в работе [19] методика расчета задувочной шихты применительно к ДП объемом 2014 м³, предполагает разделение по высоте ее столба шлакообразующего материала с тем, чтобы процесс шлакообразования начинался через заданное время после подачи в печь дутья. Это исключает раннее шлакообразование при задувке и предотвращает быстрое закрытие шлаком труб, заложенных в чугунные летки, что позволяет длительное время нагревать лещадь горячим дутьем и предотвращать «закозление» горна холодным шлаковым расплавом, а также исключает приход в горн не восстановленных оксидов железа и похолодание плавки.

В последние годы на некоторых заводах задули мощные ДП на шихте, железосодержащая часть которой состояла из прочного, отсеянного от мелочи офлюсованного агломерата с основностью 1,27–1,3. Этот опыт показал, что задувка печи на агломерате значительно упрощает подготовку шихты и облегчает ведение печи в задувочном периоде. На некоторых металлургических предприятиях Украины, России, Японии при загрузке задуваемых ДП выше горизонта фурм сооружают помост из бревен, который способствует более полному выгоранию кокса в нижней части горна, прогреву кокса над помостом, а также создаются условия для равномерного распределения газового потока в нижних зонах рабочего пространства печи, что в дальнейшем обуславливает стабильный ход доменной плавки. После обрушения помоста на лещадь опустится раскаленный кокс, что значительно улучшит работу горна, облегчит выпуск первых жидких продуктов плавки. Горн и заплечики печи загружают обычно только коксом и известняком, а остальной объем – загрузочной шихтой в соответствии с предварительным расчетом. Начиная с момента загрузки ДП, в целях безопасности, все электросварные и другие огневые работы на всех горизонтах вокруг печи недопустимы.

Специалисты (Японии и Италии) считают, что при составлении задувочной шихты на период первых часов работы ДП важнейшими параметрами являются масса и число коксовых подач, загруженных в печь на уровень воздушных фурм, и соотношение в шихте массы кокса и железорудной составляющей. В качестве главных критериев при расчете этих параметров принимается содержание кремния в чугуне первой плавки и его температура. Так, при задувке ДП-6 завода в Тибо, оснащенной БЗУ, первая плавка была выпущена через 23 ч 45 мин в количестве 357 т чугуна при температуре 1415⁰С с содержанием кремния 4,25%, серы – 0,08% и 45 т шлака с содержанием 12,8% Al₂O₃ и основностью (СаО:SiO₂) 1,11. Величину коксовой подачи в задувочной шихте этой печи поддерживали на уровне 31 т, а железорудная часть шихты включала 80% агломерата, 15% окатышей и 5% руды. Рудная нагрузка была доведена до 2,1 т/т кокса. Следует отметить, что сразу же с момента начала загрузки на этой печи стали отрабатывать оптимальный загрузочный режим (наиболее эффективным оказалось распределение шихты, обеспечивающее в дальнейшем работу ДП с преимущественным осевым ходом) [17]. В задувочной шихте доменных печей завода в Фукуяме (Япония) рудную нагрузку изменяли от 0,05 в нижних зонах шахты до 1,89–1,90 т/т кокса на уровне поверхности засыпи. Таким образом, в пределах этих отметок рабочее пространство печи заполняли шихтой, в которой соотношение железорудных материалов и кокса изменялось на 10 ступенях. По результатам наблюдений 10 задувок доменных печей, проведенных на этом заводе, было определено, что угол естественного откоса руды составляет 26–28°, кокса 30–32° при загрузке конусным аппаратом и 32,5 и 35–35,5° (соответственно) в случае с БЗУ [20]. При разработке задувочной шихты ДП объемом 4000–5000 м³ японскими специалистами было определено, что при задувке таких печей потребуется 18 тыс.т кокса и 800 т рудных материалов, рудную нагрузку вначале нужно поддерживать на уровне 0,4, постепенно повышая до 2,0 [21].

Перед задувкой ДП (после строительства или капитального ремонта 1–го разряда) при достижении заданного уровня загрузки на колошнике проверяют профиль засыпи материалов, что имеет важное значение для регулирования распределения газов, проверяют поступление пара по паропроводам во все взрывоопасные участки печи (под большой конус и в межконусное пространство, в шлюзовое пространство БЗУ) и пылеуловители, подают воду во все охлаждаемые элементы фурменных и шлаковых приборов, а также систему охлаждения печи. Момент поступления горячего воздуха в горн ДП считается началом ее задувки. Задувают печь через все фурмы. На некоторых заводах в первый период задувки для увеличения кинетической энергии дутья в фурмы вставляют керамические кольца, тем самым, уменьшая их сечение, с целью отодвинуть фокус горения от стен горна и предохранить кладку от действия высокой температуры. То же достигается закрытием части фурм, что часто практикуется в

СНГ и Японии [20,22]. Температура дутья в момент подачи его в горн составляет 700–800⁰С, количество дутья примерно равно половине его количества при нормальной работе печи. Через 20–30 мин после задувки, чтобы уменьшить интенсивность нагрева огнеупорной кладки и скорость опускания материалов в горн печи (при меньшей скорости движения шихта придет в горн более прогретой и восстановленной), первоначальное количество дутья уменьшают, устанавливая его избыточное давление в пределах 0,15–0,25 ати. О нормальном опускании шихтовых материалов свидетельствуют показания зондовых и радиометрических уровнемеров шихты, в начальном периоде задувки первое увеличение количества дутья производят примерно через 6–8 ч работы так, чтобы давление горячего дутья возросло не более чем на 0,1 ати. В дальнейшем количество дутья увеличивают (при ровном ходе шихты) через каждые 3–4 ч на 50–100 м³/мин в зависимости от теплового состояния и хода ДП. Повышение температуры и увеличение количества дутья в раздувочный период должны производиться так, чтобы избежать подвисаний шихты. Частые подвисания и осадки шихты приведут к резкому похолоданию и загромождению горна, массовому горению воздушных и шлаковых фурм, затруднению выпуска жидких продуктов плавки, в результате чего раздувочный период может затянуться на несколько недель и оказать неблагоприятное влияние на всю кампанию ДП. При нормальной задувке первый чугун выпускают через 16–24 ч после задувки, а первый шлак – через 10–15 ч. При благоприятном протекании раздувочного периода количество дутья, численно равного $\approx 2V_n$, достигают на 5–6 сут после задувки печи, постепенно переводят печь на повышенное давление, дутье обогащают кислородом, включают подачу углеводородсодержащих добавок к дутью. Проектной производительности печи достигают на 7–8 сут. Печь подключают к газовой сети, когда давление газа на колошнике достигает уровня 150–200 мм вод.ст.

Термический удар на кладку печи, особенно горна, неизбежный при задувке, полное отсутствие гарнисажа, выделение из швов кладки остаточной влаги (установлено, что полный прогрев периферийной зоны горна и лещади, со стабилизацией в них теплового режима, наступает после задувки в течение соответственно 6–10 и 25 сут.) предопределяет особенности задувочного режима мощных доменных печей, который отличается от задувки печей малого объема. Отличие заключается в том, что доменные печи большого объема имеют значительно меньшую площадь фурменного кольца относительно площади горна, а расстояние от оси воздушных фурм до поверхности лещади намного больше. Поэтому ДП большого объема в течение первых 24 ч с момента задувки до первого выпуска плавки требуется разогревать более быстрыми темпами (т.е. количество дутья увеличивать более интенсивно), чем это требуется при задувке печей малого и среднего объема. Примером может служить опыт задувки ДП большого объема заводов в Оито и Фукуяме [20–22].

Институтом черной металлургии накоплен опыт задувки на ДП малого и среднего объема Украины и России с помощью нагретого азота [23,24], а первая попытка опробования этой технологии задувки на ДП–9 «Криворожстали» (объемом 5000 м³) была осуществлена в 2003 г. после капитального ремонта 1–го разряда. Задувка доменной печи с использованием нагретого азота является устойчивой технологией, позволяющей эффективно сушить и прогреть столб шихты по высоте печи, формировать центральное газораспределение на печах разного объема, уменьшить расход кокса в период раздувки в среднем на 15%, получить физически прогретый сплав, отвечающий требованиям технических условий на выплавку литейного чугуна. Сравнение результатов задувки ДП–9 «Криворожстали» и ДП–3 Западно–Сибирского металлургического комбината [24,25] с использованием нагретого азота показало, что эта технология требует высокой степени готовности комплекса ДП, и особенно литейного двора, а также прогрева по высоте насадки воздухонагревателя и просушки азотопровода.

В настоящее время, в связи с проведением модернизации и капитальных ремонтов многих доменных печей Украины, России и стран СНГ, особую актуальность приобретают вопросы повышения промышленной безопасности, разработки технологических приемов и организационных мероприятий по обеспечению безаварийного вывода ДП на стационарный режим. В момент задувки и в раздувочный период иногда возникают аварии со взрывами и пожарами, которые приводят к повреждениям и разрушениям конструкций печи, оборудования и газопроводов, значительному материальному ущербу, травмированию и гибели людей, загрязнению окружающей среды. Опасность возникновения взрывов усугубляется тем, что доменный газ в первые часы после задувки содержит повышенные количества водорода и оксида углерода. Особенно опасны в этот период обрывы шихты на ходу печи, когда в нее может поступить («засосать») воздух и образовать взрывоопасную смесь с газом. Поэтому ровный ход печи в задувочный период важен не только для нормальной задувки, но и для предотвращения опасности взрывов и пожаров.

Анализ аварий, произошедших на ДП во время задувки, позволяет выделить основные причины их возникновения [8,12,13]:

завышенная основность задувочной шихты из–за незнания химического состава агломерата и преждевременная перешихтовка в процессе задувки;

излишне форсированный дутьевой режим, повторенный неоднократно при загроможденном горне;

несвоевременное обнаружение и отключение сгоревших охлаждающих приборов;

излишние рудные нагрузки, принятые в нулевой шихте, поспешность с увеличением рудных нагрузок;

недостаточные разделка и ремонт горна на стоянке печи;

остановка печи перед капитальным ремонтом с загроможденным горном, замусоренным мелочью агломерата;

сокращение раздувочного периода с излишней интенсивностью проплавления первого объема задувочной шихты при холодном горне;

задувка на всех фурмах без уменьшения их диаметра;

потеря дренажной способности горна из-за неправильного режима раздувки, приводящего к горению фурм;

непринятие мер к своевременному выпуску чугуна, приводящее к переполнению металлоприемника;

прогар фурменных приборов;

образование взрывоопасной смеси газа с воздухом;

поступление воздуха в засыпной аппарат и пылеуловитель при работе без подачи пара в межконусное пространство и пылеуловитель.

Для скорейшей стабилизации хода доменных печей и предупреждения разрушения огнеупорной кладки под действием термического удара при их задувке важное значение имеет процесс формирования зоны размягчения и плавления шихтовых материалов в рабочем пространстве печи. В ходе исследования этих процессов японскими специалистами выделены 4 стадии: на I стадии наблюдается повышение температуры шихты; на II – начинается формирование корневой части (или основания) зон размягчения и плавления; III стадия соответствует завершению процесса формирования зон размягчения и плавления и IV – стабилизации зон размягчения и плавления. По результатам исследований было определено, что зона плавления начинает формироваться по высоте рабочего пространства печи приблизительно на расстоянии 10 м от поверхности засыпи шихты. На I стадии в течение первых 10 часов после задувки газодинамический режим доменной плавки характеризуется преимущественным развитием осевого потока газов в узком диапазоне по сечению печи. По прошествии 10–17 часов с момента задувки наблюдается появление и начальное формирование зоны плавления (II стадия). Причем в течение первых 2 часов этой стадии (т.е. 12–14 часов) начавшееся формирование зоны плавления, которая распространяется в это время преимущественно к центральной части печи, ухудшает газопроницаемость столба шихты и препятствует осевому продвижению газового потока. В результате такого изменения условий газодинамического режима поток газов начинает перераспределяться и интенсифицироваться в периферийном кольце. В последующие 5 часов работы (т.е. 12–17 часов после задувки) продолжается усиление развития периферийного хода доменной плавки и расширение зоны плавления уже по периферийной области. Этот период характеризуется активным использованием восстановительной энергии газового потока и интенсивной усадкой столба шихты. На III стадии (период от 17 до 20 часов после задувки) зона плавления достигает широкого распространения и некоторой стабилизации своих границ. Этот период сопровождается временным ухудшением газопроницаемости шихты по периферийной зоне и

некоторым повышением температуры газового потока в осевой части печи. При этом в периферийной области снова (после 19 часов с момента задувки) начинается перемещение газового потока к оси печи и приблизительно к этому времени (после 20 часов работы) формирование зоны плавления в основном завершается. С изменением режима загрузки шихтовых материалов и возрастанием рудной нагрузки уровень зоны плавления существенно поднимается, и доменная плавка идет в стабильном газодинамическом режиме с приближающимся к обычному соотношению осевого и периферийного потоков газов [21].

Загрузка шихтовых материалов, их распределение на колошнике и формирование профиля поверхности засыпи перед задувкой ДП в значительной степени определяет продолжительность ее кампании, а также безаварийную и высокопроизводительную работу печи. Установлено, что при задувке ДП после загрузки в печь шихты определяющее значение для ее безопасной и устойчивой работы имеет выбор параметров и состав дутья, а также организация тепловой работы ее фурменной зоны. Тепловой режим работы ДП, наиболее щадящий футеровку и холодильники, соответствует центральному распределению газового потока, при этом обеспечивается не только безопасная работа ограждения печи, но и экономия кокса. Результаты исследований показали резкое изменение температурного поля на стыке охлаждаемой и неохлаждаемой части шахты, которое без принятия должных технологических мероприятий приводит к образованию настылей.

Опыт Института черной металлургии по технологическому сопровождению доменных печей показывает, что проведение полномасштабных комплексных предпусковых исследований и квалифицированное применение их результатов в значительной степени способствуют успешной задувке ДП, сокращению раздувочного периода и ускоренному достижению проектных показателей плавки. Комплекс исследований, выполняемых перед задувкой печи, включает:

- определение уровня и профиля засыпи шихтовых материалов при загрузке в печь с помощью радиолокационного измерителя дальности, обеспечивающего измерение положения шихты на глубину более 30 м;
- исследование расходных характеристик шихтовых затворов;
- исследование параметров потока шихты и последовательности выгрузки компонентов порций при различной структуре смешанных порций;
- определение границ и траекторий потока шихтовых материалов;
- определение толщины слоев рудных материалов с помощью вертикального зондирования и отбора проб, а также оценку деформации исходного слоя кокса после выгрузки порции рудных материалов;
- оценку распределения вида и гранулометрического состава шихтовых материалов на поверхности засыпи;
- предварительную оценку пропускной способности системы загрузки.

Основным этапом исследований является определение границ и траекторий потока шихтовых материалов по высоте и сечению печи, на основании которых осуществляется выбор рабочих значений угловых положений лотка БЗУ для последующей разработки программ загрузки, обеспечивающих реализацию современных технологических требований к загрузке доменной печи.

Заключение

Доменное производство относится к техногенно и экологически опасным объектам металлургии. По количеству произошедших аварий в черной металлургии на первом месте стоят системы доменных печей, газоочистки и газопроводы. Из всех операций, которые выполняются на доменных печах, наиболее опасными, наименее изученными и регламентированными являются выдувка и задувка. Выдувка ДП, и особенно печей большого объема, представляет собой ответственную и сложную операцию, которая имеет свои особенности в зависимости от вида предстоящего ремонта. Порядок остановки ДП зависит также от конструкции газового хозяйства, места расположения вспомогательных сооружений и ряда других условий. Поэтому в каждом отдельном случае печь выдувают по специальной инструкции, составленной начальником доменного цеха и утвержденной главным инженером предприятия, однако, общие положения и правила, основанные на обобщении опыта всегда должны быть основой инструкции. Выдувка печи сопровождается опасностью образования взрывоопасной смеси газа и воздуха в освобождающемся рабочем объеме. В период выдувки возникают большие и резкие колебания давления газов в печи. Особенно опасное положение возникает в газовой системе при подвисаниях, осадках и обрывах шихты.

Тщательная подготовка и четкая организация задувочного периода ДП в значительной степени определяет продолжительность ее кампании, а также безаварийную и высокопроизводительную работу печи, получение расчетных по составу и свойствам жидких продуктов плавки и быстрое достижение проектных технико-экономических показателей. Технология задувочного режима мощных ДП, рассчитанных на работу с давлением газов на колошнике до 2,5 ати, имеет ряд отличительных особенностей, одной из которых является достаточно интенсивное увеличение количества дутья с первых часов после задувки, от чего в значительной мере зависит стойкость футеровки. С целью увеличения стойкости огнеупорной футеровки против растрескивания при тепловых нагрузках ДП перед их задувкой необходимо подвергать сушке. При составлении задувочной шихты важнейшими параметрами являются масса, число коксовых подач и величина рудной нагрузки. В качестве критерия для расчета этих параметров принимается содержание кремния в чугуне первой плавки и его температура. Важное значение для скорейшей стабилизации хода ДП и предупреждения разрушения огнеупорной кладки под действием термических ударов в период их задувки имеет процесс формирования зоны

размягчения и плавления шихтовых материалов по высоте рабочего пространства печи. Для быстрого и эффективного завершения пускового периода и выхода ДП на проектную производительность уделяется большое внимание обеспечению рационального распределения шихтовых материалов по сечению колошника. В первые часы задувки ДП существует опасность возникновения взрывов, т.к. в этот период доменный газ содержит повышенное количество водорода и оксида углерода, и возможность его взрыва значительно увеличивается. Особенно опасны в этот период обрывы шихты на ходу печи, когда воздух может образовать взрывоопасную смесь с газом. Поэтому ровный ход печи, контроль скорости схода шихты при выдувках печи и в задувочный период важны не только для нормальной задувки и выдувки, но и для предотвращения опасности возникновения взрывов и пожаров.

В последние годы разработаны и применяются новые приемы, способы и технические решения, обеспечивающие безаварийный вывод доменных печей на стабильный режим при задувках и выдувках и повышающие уровень промышленной безопасности доменного производства:

- использование новой технологии восстановления футеровки – торкретирования в сочетании с эффективной системой охлаждения;
- применение радиолокационного уровнемера, обеспечивающего непрерывный, стабильный контроль уровня шихты;
- контроль устойчивости схода шихты и установления окончания выдувки по характеру изменения диаграмм CO_2 и CO ;
- при опускании уровня засыпи поддержание содержания кислорода в дутье на уровне, обеспечивающем теоретическую температуру горения от 2150 до 2300⁰С;
- во время выдувки обильное орошение шихты водой струйным способом и душированием;
- остановка печи на капитальный ремонт 2–го разряда с выпуском «козлового» чугуна.

1. *Большаков В.И. Тубольцев Л.Г.* Стратегия развития энергосберегающей и экологически безопасной металлургии // *Экология и промышленность*. – №1. – 2007. – С.8–11.
2. *Справочное пособие руководителя и специалиста горно–металлургического предприятия по охране труда.* / В.А.Шеремет, А.И.Каракаш, В.Ф.Марунчак и др. – Днепропетровск: Лира, 2005. – 815 с.
3. *Стратегия системного управления промышленной безопасностью металлургических объектов* / Л.Г.Тубольцев, Н.И.Падун, Г.Н.Голубых, А.М.Шевченко // *Фундаментальные и прикладные исследования в черной металлургии*. Сб.научн.тр.ИЧМ. – 2006. – Вып.13. – С.331–343.
4. *Вернигор П.И.* Техника безопасности в газовом хозяйстве металлургических заводов. М.: Металлургия. – 1975. – 248с.

5. Волков Ю.П., Шнарбер Л.Я., Гусаров А.К., Федченко В.М. Эксплуатация современной доменной печи // М.: Metallurgia. – 1991. – 240с.
6. Тубольцев Л.Г., Голубых Г.Н., Падун Н.И., Промышленная безопасность и устойчивость функционирования металлургического предприятия // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.11. – 2005. – С.333–343.
7. Тубольцев Л.Г., Падун Н.И., Голубых Г.Н., Колесникова А.С. Определение и использование производственных показателей в управлении промышленной безопасностью // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.11. – 2005. – С.344–357.
8. Правила безопасности в газовом хозяйстве предприятий черной металлургии. ПБ 11–404–01.
9. Правила безопасности в газовом хозяйстве предприятий черной металлургии. ПБ 11–404–01.
10. Плискановский С.Т., Полтавец В.В. Оборудование и эксплуатация доменных печей. Днепропетровск: Пороги. – 2004. – 495с.
11. Овчаренко Н.Л. неполадки хода доменных печей. М.: Metallurgia. – 1972. – 192с.
12. Плискановский С.Т., Полтавец В.В. неполадки в работе доменных печей. Днепропетровск: Пороги. – 2002. – 301с
13. Жеребин Б.Н., Пареньков А.Е. неполадки и аварии в работе доменных печей. Новокузнецк. – 2001. – 275с.
14. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. – Киев: Наукова думка. – 2007. – 412с.
15. Успешное завершение 16–летней кампании на доменной печи №6 компании «Corus Ijmuiden». М. – ОАО «Черметинформация». – 2004. – Новости черной металлургии за рубежом. – Вып.4. – С.23–28.
16. Segreti F., Carignani M., Federico G. Mise en service et premiere resultants d'exploitation du haut, fourneau №1 de 10,6 m au creuset de l'usine d'Italsider a Taranto. – Revue de Metallurgie. – 1971. – V.68. – №7–8. – P.516–525.
17. Kurihara I., Takahashi H. On the starting–up and operation of Chiba №6 blast furnace. – Ironmaking Proceedings. – 1979. – V.38. – P.406–415.
18. Annichini A., Thirion C. Mice a fen et demarrage des hauts fournearux de Solmer. – Circular informa technical. – 1976. – V.33. – №4. – P.816–831.
19. Реконструкция доменной печи в Сакаи. – Тэцу то хаганэ. – 1979. – Т.56. – №1. – 41с.
20. Кутнер С.М. Доменный цех завода Фукуяма. – М. – 1977. – Экспресс-информация. Ин–т «Черметинформация». – Сер.4. – Вып.4. – 32с.
21. Кутнер С.М. Технология задувки доменных печей за рубежом. – М. – 1984. – Обзорная информация. Ин–т «Черметинформация». – Серия «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна». – Вып.1. – 43с.
22. Kawamura M., Hasegawa A. Facilities and operation of Oita №1 blast furnace. – Transactions of the iron and steel institute of Japan. – 1976.– V.16. – №10. – P.569–580.
23. Жембус М.Д., Монаршук А.П., Бородулин А.В. Тепловая работа доменной печи в период раздувки // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1987. – №6. – С.145–146.

24. Раздувка доменной печи с применением азота / А.С. Янковский, М.Ф. Марьясов, А.В. Бородулин и др. // *Металлург.* – 1988. – №11. – С.29.
25. Задувка доменной печи объемом 5000 м³ с применением нагретого азота / А.В. Бородулин, А.И. Васюченко, К.А. Дмитренко, Г.П. Костенко и др. // *Сталь.* – 2006. – №9. – С.6–9.

Статья рекомендована к печати канд.техн.наук И.Г.Муравьевой