

И.Г.Товаровский

КОКСОЗАМЕЩАЮЩИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

В Институте черной металлургии разработан комплекс технологий замещения кокса и природного газа другими энергоносителями, в т.ч. технология замены природного газа коксовым, частичной замены кокса кусковым антрацитом. Созданы предпосылки для «прорыва» в область нетрадиционных технологий, включая перестройку доменной плавки на малококсовое и бескоксовое получение металла.

Решение задачи сокращения расхода кокса, являющегося наиболее дорогостоящей составляющей шихты для выплавки чугуна, осуществляется по двум направлениям: сокращение теплопотребности плавки за счет подготовки шихты и улучшения организации технологии; замещение кокса менее дорогими энергоносителями. Эффективность второго из указанных направлений зависит от свойств замещающего энергоносителя и его стоимости, а его реализация всегда связана с необходимостью использования первого направления.

В доменной плавке кокс выполняет функции комплексного энерготехнологического материала. В процессах его превращений у фурм выделяется основная часть необходимой для процессов плавки теплоты и образуется основная часть восстановительного газа, к которому в вышерасположенных горизонтах добавляется дополнительная часть газа от прямого восстановления. Кроме указанных энергетических функций кокс выполняет функцию твердой насадки в зоне размягчения и плавления железосодержащих материалов, обеспечивающей противоток шихты и газов в печи, а также функцию регулятора газораспределения по площади поперечного сечения агрегата.

В силу сложности указанных функций замещение кокса в доменной плавке другими топливными компонентами не может рассматриваться только с термохимических позиций, а требует комплексного анализа всей технологии с целью выявления режимов, обеспечивающих эффективное решение задачи. Поэтому решение задачи замещения кокса каждым специфическим топливным компонентом (твердым кусковым, твердым пылевидным, жидким, газообразным) разного состава приводит в итоге к необходимости разработки новой технологии, важнейшими компонентами которой являются выбор рациональных режимных параметров и управление распределением материалов при их загрузке в доменную печь.

Ретроспектива и решение актуальных проблем

Проблемы замещения кокса другими энергоносителями возникли еще в XIX веке, и первой из них была проблема сокращения расхода кокса за счет нагрева дутья, осуществляемого сжиганием колошникового газа [1–

3]. Активное решение этой проблемы имело место в течение всего XX века.

Другой важнейшей проблемой коксозамещения, решение которой началось в середине XX века, является вдувание топливных добавок через фурменные устройства. В решении этой проблемы наиболее обстоятельной и плодотворной была выполненная под руководством академика З.И. Некрасова разработка технологии доменной плавки на комбинированном дутье (природный газ и кислород), получившей дальнейшее развитие в отрасли и ставшей традиционной во всем мире [4, 5]. Последующие работы Института черной металлургии в значительной мере связаны с совершенствованием этой технологии и направлены на увеличение расходов природного газа и кислорода, оптимизацию параметров комбинированного дутья при их сочетании с другими параметрами плавки, разработку рациональных условий и конструкций узлов ввода природного газа в фурменные приборы и распределения его по окружности печи, а также организации дренажа продуктов плавки в горне при понижении содержания монооксида железа в первичных шлаках [6–9]. При вдувании природного газа (до $150 \text{ м}^3/\text{т}$) сокращение расхода кокса составляет 15–20%.

Начатые под руководством академика З.И. Некрасова разработки технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ) [10] и коксового газа [11] также получили промышленное развитие. Первая после многочисленных испытаний стала традиционной во всех странах. Вторая продолжена сотрудниками Института черной металлургии и Макеевского меткомбината, реализована в промышленном масштабе и может использоваться на любом предприятии с заменой до 100% природного газа при дополнительной экономии кокса 5–8% [12].

В последние годы поиск эффективных заменителей кокса привел к разработке технологии доменной плавки с частичным (до 100 кг/т чугуна) замещением его антрацитом [13–15]. Разработка выполнена специалистами Института черной металлургии им. З.И. Некрасова, Национальной металлургической академии Украины, Научно–производственного центра «Экосфера» (г.Луганск), ОАО «Криворожсталь» (теперь ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог»). В отличие от известных решений, позволяющих замещать антрацитом 20–30 кг кокса/т чугуна, авторами использованы новые решения, включающие: обоснованный выбор сортамента антрацита и его специальную подготовку; загрузку антрацита в смеси с железорудной шихтой для окисления оксидами шихты мелочи, которая образуется при разрушении угля; увеличение размера подачи для сохранения необходимой толщины коксовых слоев и площади «коксовых окон» в вязкопластичной зоне при уменьшении расхода кокса. Это позволило увеличить расход антрацита до 70–87 кг/т чугуна при эквиваленте замены 0,8–1,1 кг/кг.

Таким образом, разработан широкий арсенал технологий замещения кокса различными энергоносителями, позволяющих на каждом отрезке

времени реализовать наиболее эффективный вариант. Каждая из рассмотренных технологий характерна специфическими особенностями, которые определяются характером замещающих кокс энергоносителей (твердые кусковые или пылевидные, жидкие, газообразные) и их составом, в том числе содержанием вредных примесей.

Твердые кусковые замещающие кокс энергоносители в виде каменных углей подаются в печь через загрузочное устройство по тем же трактам, что вся шихта. Однако, отличаясь от кокса по физико–механическим и термохимическим свойствам, они загружаются по специальным программам, формируемым на основе требований специально организованной технологии, учитывающей указанные свойства. Капитальные затраты на реализацию технологии практически отсутствуют, а эффективность определяется соотношением свойств углей и их цены.

Пылеугольное топливо (ПУТ) вдувается через фурмы доменной печи. Для реализации технологии требуется решить комплекс проблем, связанных с полнотой сжигания угля у фурм, выбором рациональных дутьевых параметров и реорганизацией всего технологического режима плавки. Для организации вдувания необходимо соорудить капиталоемкий комплекс оборудования для получения, транспортировки и дозирования ПУТ. Эффективность технологии зависит от состава углей, их стоимости, работы комплекса оборудования и выбора технологического режима. При вдувании ПУТ (120–160 кг/т) совместно с природным или коксовым газом расход кокса сокращается на 30–35%.

Из возможных газообразных замещающих кокс энергоносителей реально используемыми являются природный и коксовый газы, вдуваемые через воздушные фурмы.

Организация вдувания природного газа требует некоторых вложений для сооружения газопроводов и устройств дозирования. Величина замещения кокса природным газом зависит от состава газа, полноты конверсии углеводородов у фурм и выбора технологического режима плавки, а экономическая эффективность определяется соотношением цен на кокс и природный газ.

Коксовый газ является альтернативой природному. В его составе меньше углеводородов, чем в природном, и содержится до 60% свободного водорода, что улучшает условия в фурменных очагах, в результате чего при замене природного газа получается дополнительная экономия кокса. Однако наличие нафталина, бензольных углеводородов, сероводорода и оксидов азота, а также необходимость компримирования коксового газа, требуют сооружения комплекса его подготовки к вдуванию в доменные печи. Экономическая эффективность технологии зависит от величины капитальных затрат на сооружение комплекса очистки и газопередачи, а также оценки стоимости коксового газа как вторичного энергоресурса.

Концепция коксозамещения

В настоящее время при резком подорожании природного газа (ПГ) в Украине реальное сокращение расхода кокса может быть получено при вдувании ПУТ, освоенном в широких масштабах. При этом, как показано в [16], наиболее высокий эффект достигается при сочетании ПУТ и природного газа. Но перспективы дальнейшего подорожания природного газа осложняют решение проблемы и выдвигают на первый план задачу его замены коксовым.

Замена природного газа коксовым была экономически эффективной еще при прежних более низких ценах на природный газ. В настоящее же время реализация этой технологии приобретает значимость одной из первоочередных задач. При этом величина капитальных затрат, необходимых для реализации технологии вдувания коксового газа, меньше в 3–4 раза, чем для реализации технологии вдувания ПУТ, меньше и срок их окупаемости [15].

Проблема дальнейшего снижения себестоимости чугуна в этих условиях может быть решена вдуванием ПУТ – технологии, освоенной на Донецком металлургическом заводе [16]. Реализация этой технологии в широком масштабе требует больших инвестиций и длительного времени, в течение которого доменные печи Украины будут работать в неэкономичных режимах.

Выход из сложившейся кризисной ситуации возможен путем постепенной замены ПГ коксовым газом (КГ) и использования кускового антрацита для замены кокса. Первая из этих технологий освоена на Макеевском металлургическом заводе [12], вторая наиболее полно разработана на меткомбинате «Криворожсталь» (теперь «Арселор Миттал Кривой Рог») [15] и широко используется на многих предприятиях Украины. Реализация вдувания КГ требует для сооружения комплекса тонкой очистки и транспортировки КГ не столь больших инвестиций, как ПУТ (30–40 млн. грн. против 150–250 млн грн. для доменного цеха), а использование кускового антрацита не требует капитальных вложений.

Расчетно–аналитическое исследование проблемы выполнили по разработанной в ИЧМ методике [17] применительно к одной из доменных печей ОАО «Криворожсталь» полезным объемом 2000 м³ (среднегодовые показатели). В табл. 1 приведены прогнозные показатели плавки для ряда периодов: База 1 – при фактических параметрах с вдуванием ПГ и подачей 11% кускового антрацита в состав загружаемого твердого топлива; База 2 – то же, но с повышением температуры дутья до 1200⁰С, т.к. рассматриваются перспективные режимы; КГ=2·ПГ – замена ПГ двойным объемом КГ; КГ=3·ПГ – замена ПГ ~ тройным объемом КГ с увеличением доли антрацита в загружаемом топливе до 20% (освоено на меткомбинате «Криворожсталь»); ПУТ+КГ – вдувание ПУТ совместно с КГ (доля антрацита 11%). Цены материалов и другие затраты приняты по данным меткомбината «Криворожсталь» за 2005 год, а цены на топливо следующие:

щие (грн/т; грн/1000 м³): кокс – 800; антрацит – 500; ПГ – 600; КГ – 150; ПУТ – 300.

Таблица 1. Прогнозные показатели доменной плавки при замене природного газа (ПГ) (База 1, 2) коксовым (КГ) с добавкой кускового антрацита и вдувании ПУТ совместно с КГ.

Показатели	База 1	База 2	КГ=2·ПГ	КГ=3·ПГ	ПУТ+КГ
Производство, т/сут.	2796	2899	2929	2891	3017
Расход тв. топлива, кг/т	495,7	469,7	468,5	443,6	335,3
В т.ч. кокс	441,2	418,0	417,0	354,9	298,4
Антрацит	54,5	51,7	51,5	88,7	36,9
Дутье: температура, °С	1043	1200	1200	1200	1200
кислород, %	25,5	25,4	25,8	26,8	25,9
Расход кислорода, м ³ /т	84,2	78,1	81,5	96,6	76,1
Расход ПГ, м ³ /т	89,1	88,7	0,0	0,0	0,0
% к дутью	6,9	7,4	0,0	0,0	0,0
Расход КГ, м ³ /т	0,0	0,0	182,0	254,5	101,6
% к дутью	0,0	0,0	15,7	22,2	9,6
Расход угля, кг/т	0,0	0,0	0,0	0,0	152,4
кг/м ³ к дутью	0,0	0,0	0,0	0,0	144,0
Колошниковый газ: температура, °С	279	264	264	282	256
содержание, % СО	23,94	23,62	23,51	23,36	22,33
СО ₂	18,67	19,36	19,06	18,11	21,75
Н ₂	5,43	5,58	6,91	9,59	5,03
Расход материалов, кг/т:					
агломерат КГМК	806	806	806	806	808
агломерат НКГОК–1	782	783	783	783	784
агломерат НКГОК–2	107	107	107	108	108
окатыши СевГОК	9	9	9	9	9
руда	36	36	36	36	36
известняк	36	32	32	29	15
конв. шлак об. + скрап	36+13	36+13	36+13	36+13	36+13
Железо в шихте, %	53,8	53,9	53,9	53,9	54,2
Вынос пыли общ, кг/т	65	64	64	63	61
Количество шлака, кг/т	480	478	477	475	469
Расход дутья, м ³ /т	1289	1198	1159	1149	1058
Объем влажн. газа, м ³ /т	1966	1853	1846	1905	1654
Теор. темпер. гор., °С	2071	2151	2139	2020	2169
Кол. сух. кол. газа, м ³ /т	1854	1740	1714	1735	1549
Прямое восст. Fe, %	24,1	25,9	23,5	16,4	26,0
Степень использования газов, %: общая	44,63	45,91	45,81	44,95	50,30
Производственная себестоимость, грн/т	826,7	804,5	777,65	761,5	707,2

Из результатов расчета следует (табл. 1), что технология КГ=3·ПГ позволяет снизить расход твердого топлива с 495,7 до 443,6 кг/т, а кокса с – 441,2 до 354,9 кг/т. Себестоимость чугуна уменьшается на 65 грн/т (8%), что создаст условия для формирования инвестиций в реализацию технологии ПУТ+КГ. Последняя позволит совершить дальнейший сдвиг в снижении расхода кокса (еще на 56,5 кг/т) и соответственно уменьшение себестоимости чугуна (еще на 54,3 грн/т).

Сочетание вдувания коксового газа с использованием кусковых углей для замещения кокса, не требующим существенных капитальных вложений, является технологически наиболее удачным и экономически приоритетным. Его широкая реализация позволит совершить существенный положительный сдвиг в кокосбережении и снижении себестоимости металла в условиях прогрессирующего подорожания природного газа в Украине.

Параллельно по мере накопления капиталов будут созданы возможности вложений в сооружение комплексов для вдувания ПУТ. К тому времени проблема замены природного газа коксовым в значительной мере будет решена, что обеспечит более эффективное функционирование технологии вдувания ПУТ.

С целью высвобождения коксового газа, необходимого для вдувания в доменные печи, Институтом черной металлургии НАН Украины разработаны основы технологии газификации углей и утилизации отходов в освобожденных от производства чугуна по балансу металла доменных печах [18]. Полученные в этих печах продукты газификации углей могут быть использованы для отопления коксовых печей и других энергетических нужд наряду с более полным использованием доменного газа при рационализации структуры топливного баланса предприятия.

Изложенная программа рационализации топливоиспользования в доменном производстве Украины позволит в сложившихся условиях инвестиционного дефицита перейти к ритмичному развитию отрасли, а в перспективе – к реализации новых технологий.

Перспективные технологии

Ограничение использования природного газа по экономическим критериям определило приоритетность технологии вдувания пылеугольного топлива в большинстве стран мира. Однако количество угля, вдуваемого через фурмы, ограничено неполнотой его сжигания, а также размягчения и ожигания зольного остатка угля в дутьевом потоке и фурменном очаге. Последнее ограничивает также сортамент используемых углей, в частности – по зольности (до 10% золы).

Определяющей проблемой этой технологии является полнота газификации угля в фурменном очаге. В рамках существующего фурменного прибора возможно лишь частичное ее решение. Для полного решения проблемы необходимо вынести процесс газификации угля за пределы фурменного очага и существующего фурменного прибора с подачей в печь готовых восстановительных газов. При этом решается не только соб-

ственно проблема газификации, но появляется возможность повышения зольности вдуваемых углей и офлюсования золы.

Работы в этом направлении, начатые нами в 70–х годах 20–го века и поддержанные академиком З.И. Некрасовым, нашли отражение и признание уже в начале 80–х годов [19]. Созданные предпосылки развития данного направления положили начало планомерному изучению процессов придоменной газификации углей и применения продуктов газификации для вдувания в доменную печь. В ходе изучения показана принципиальная возможность и экономическая целесообразность создания новой технологии с заменой природного газа и части кокса низкосортным углем.

Комплекс совместных работ с Институтом высоких температур Академии наук СССР (ИВТАН) позволил создать и испытать на стенде в натурных условиях прифурменный газификатор пылеугольного топлива (на каждую фурму) для вдувания продуктов газификации в доменную печь, а совместные разработки с Днепропетровским металлургическим институтом (ныне НМетАУ) и Всесоюзным (ныне Всероссийским) теплотехническим институтом – разработать научные основы создания центрального высокопроизводительного газогенератора для доменной печи (в т.ч. на базе выводимой из эксплуатации доменной печи) [18].

Указанный комплекс работ с 1992 года продолжен в рамках тематики НАН Украины и при поддержке ГКНТ Украины. Из двух предложенных схем подачи продуктов газификации угля (ПГУ) в доменную печь – с установкой реактора – газификатора на каждом фурменном приборе и из центрального газогенератора, более продвинутой оказалась первая. В сотрудничестве с ИВТАН и АК «Тулачермет» удалось изготовить и частично испытать на одном фурменном приборе газификатор пылеугольного топлива, а также оценить ожидаемые результаты реализации новой технологии, которая квалифицируется как малокочковая. В табл.2 приведены результаты расчетной оценки использования новой технологии применительно к условиям МК «Запорожсталь».

Расход кокса снижается на 41–46%, а производительность агрегата возрастает в 1,53–1,56 раза. Снижение себестоимости составляет в разных вариантах 9–12 УДЕ/т, а окупаемость затрат во всех вариантах – менее 1 года. Уменьшение выбросов: пыли – на 420–700 т/год; газов – на 970–1800 млн м³/год; вредных веществ – на 960–1100 т/год. По сравнению с вдуванием в доменную печь сырого ПУТ разрабатываемая технология имеет следующие преимущества:

1. Вовлечение в топливный баланс низкосортных углей при увеличении количества вдуваемых углей и соответственно заменяемого кокса.
2. Упрощение схемы подготовки и подачи угля в ДП за счет возможности вдувания зернистого угля (0–3 мм) вместо порошкового (50–60 мкм).
3. Полный вывод из процесса природного газа при одновременной возможности увеличения температуры дутья до максимального по усло-

виям службы оборудования уровня, а также интенсификация плавки путем подачи кислорода.

Таблица 2. Показатели доменной плавки при замене природного газа продуктами газификации угля (ПГУ)

Показатель	Базовый период	ПГУ с $t_d=1000^{\circ}\text{C}$	ПГУ с $t_d=1200^{\circ}\text{C}$
Удельная производительность ДП, т/м ³ сут.	1,32	2,03	2,06
Расходы: кокса, кг/т	565	334	305
природного газа, м ³ /т	71	–	–
угля, кг/т	–	290	300
кислорода, м ³ /т	38	180	150
дутья, м ³ /т	1630	675	700
Температура дутья, $^{\circ}\text{C}$	1011	1000	1200
Теоретическая температура горения, $^{\circ}\text{C}$	2025	2030	2020
Количество ПГУ, м ³ /т	–	990	1020
Состав ПГУ, % CO	–	32,5	32,5
CO ₂	–	0,5	0,5
H ₂	–	12,4	12,4
H ₂ O	–	0,5	0,5
N ₂	–	54,1	54,1
C _{тв} , г/м ³	–	19,7	19,7
Температура ПГУ, $^{\circ}\text{C}$	–	1540	1650
Степень прямого восстановления, %	38	30	32
Количество влажн. колошникового газа, м ³ /т	2290	1490	1465
Теплотворность колошникового газа, КДж/м ³	3520	4770	4600

Рассматриваемая нетрадиционная технология с заменой части кокса низкосортным углем может квалифицироваться как новый этап реформации доменной плавки на пути сокращения расхода кокса до минимально возможных величин. Предполагается замена на первой стадии более половины кокса некоксующимся углем (в пределе – снижение расхода кокса до 180–200 кг/т [18]), а на второй – создание новой технологии бескоксвого получения первичного металла.

Энергетически возможна полная замена кокса продуктами газификации угля, однако необходимость функционирования коксовой насадки в зоне размягчения и плавления материалов требует сохранения части кокса. Задача перехода к бескоксвой технологии решается путем радикальной перестройки технологии и агрегата с использованием идей Д.К.Чернова [20].

Предлагается перестройка доменной плавки на бескоксвую технологию путем реконструкции традиционной доменной печи (рис.1) с подачей горячих восстановительных газов через установленные по окружности горна прифурменные реакторы – газификаторы (ПРГ) измельченного угля–10 и разделением печного пространства на зону твердофазного восстановления (шахту)–1 и плавильно – восстановительный горн–3 со сводом–

4, который для шахты является днищем. Перегруз материалов из шахты в горн осуществляется шнеками—5 через течки—6, а газ из горна в шахту поступает через газоотводы—7 после охлаждения до 900°C .

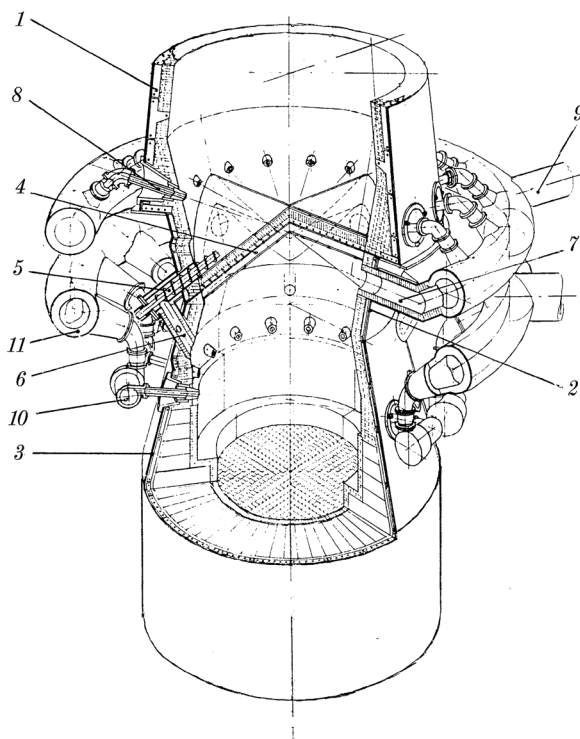


Рис. 1. Доменная печь, перестроенная в шахтно-горновой агрегат (ШГА)

При опускании в шахте и заплечиках происходит восстановление оксидов железа вдуваемым в шахту восстановительным газом до степени металлизации 75–85%. В каждый из ПРГ поступает горячее, обогащенное кислородом дутье и измельченный уголь. В объеме ПРГ происходит газификация угля с ожигением золы.

Продукты газификации угля (ПГУ) с температурой $2200\text{--}2500^{\circ}\text{C}$ поступают в слой металлизированных материалов, загружаемых на поверхность расплава в горне. В слое происходит плавление материалов, довосстановление оксидов и частичное науглероживание металла за счет избыточного твердого углерода, содержащегося в ПГУ. В цилиндрической части горна происходит разделение расплава на металл и шлак с периодическим выпуском их через летки.

Горячий восстановительный газ (ГВГ), поднимаясь в сводовую часть горна, смешивается с холодным восстановительным газом (ХВГ), вдуваемым в эту область для получения температуры не более начала размягчения материалов – 900°C . Полученный газ поступает в коллектор, а из коллектора – в фурмы шахты и частично в газопровод на охлаждение для получения ХВГ.

Взамен кокса (517 кг/т, сух.) и природного газа ($97\text{ м}^3/\text{т}$) в новой технологии используется концентрат тощих углей (658 кг/т, сух.). Это позволит сократить себестоимость чугуна примерно на 20% при сокращении

общего расхода энергоресурсов (на 7,5%) и значительном уменьшении выбросов в окружающую среду (вредных веществ на 2,43 кг/т, пыли на 1,44 кг/т). Срок окупаемости затрат не превысит 1 года. Предполагается также возможность регулирования состава металла от чугуна до стали, что положительно повлияет на последующий передел.

Укрупнением по заказу комбината «Запорожсталь» разработаны проектные предложения по перестройке доменной печи №1 на новую технологию [16].

Дополнительным преимуществом технологии является возможность получения металла с регулируемым содержанием углерода (вплоть до стали).

Являясь продуктом естественной эволюции доменной плавки, бескоксовая технология в ШГА может быть организована на действующих предприятиях в ходе реконструкции доменных печей в периоды очередных капитальных ремонтов. При этом используется существующая инфраструктура производства и основная часть оборудования. Такой подход к перестройке металлургии на новую технологию бесконфликтно решает основные социально–структурные проблемы отрасли и предприятий, что является не менее весомым положительным фактором, чем все другие.

Заключение

В Институте черной металлургии разработан комплекс технологий замещения кокса другими энергоносителями при одновременном решении задач энергосбережения. Реализация этих технологий позволяет в конкретных условиях выбрать наиболее эффективный вариант.

В настоящее время в Украине в условиях инвестиционного дефицита и прогрессирующего подорожания природного газа на большинстве предприятий наиболее эффективной является технология замены природного газа коксовым при загрузке в доменную печь до 100 кг/т чугуна кускового антрацита. Она позволяет решить задачу коксозамещения при небольших единовременных затратах и создать инвестиционную и технологическую базу для широкого внедрения технологии вдувания пылеугольного топлива и перехода к новым технологиям.

Необходимость производства конкурентоспособной продукции стимулирует необходимость «прорыва» в область нетрадиционных технологий, концепция которого на основе выполняемых Институтом разработок включает: перестройку доменной плавки на малококсовое и бескоксовое получение металла на основе вдувания продуктов газификации некоксуемых углей – как генеральное направление; утилизацию металлосодержащих отходов на основе процесса жидкофазного восстановления при использовании в качестве топлива низкосортных углей; перевод отдельных доменных печей в режим газификации углей с утилизацией металлосодержащих отходов.

1. *Павлов М.А.* *Металлургия чугуна. Ч.2. Доменный процесс.* – Издание шестое. – М.: Metallurgizdat, 1949. – 628 с.
2. *Сборник трудов по теории доменной плавки.* // Сост. акад. М.А. Павловым. Т.1. – М.: Metallurgizdat, 1957. – 319 с.
3. *Готлиб А.Д.* *Нагрев дутья и расход кокса при выплавке чугуна.* – М.: Metallurgizdat, 1947. – 164с.
4. *Некрасов З.И.* *Первые итоги применения природного газа в доменных печах СССР* // Сб. «Опыт применения природного газа в доменном производстве», М.: Metallurgizdat, 1959. – С. 3 – 6.
5. *Некрасов З.И.* *Опыт применения природного газа в доменном производстве* // Бюллетень ЦИИН ЧМ. Москва, 1963. – №8. – С. 1 – 7.
6. *Опытная плавка в доменной печи объемом 2000 м³ при обогащении дутья кислородом до 30%* / З.И. Некрасов, П.Г. Нетребко, Ф.Н. Москалина и др. // *Сталь*, 1971. – № 10. – С. 887–894.
7. *Опытные плавки в доменной печи объемом 2000 м³ на дутье с концентрацией кислорода до 35%* / З.И. Некрасов, С.В. Колпаков, А.Ф. Андреев и др. // *Сталь*, 1973. – № 2. – С. 97–104.
8. *Первый опыт работы доменной печи объемом 2000 м³ НЛМЗ с обогащением дутья кислородом до 40%* / З.И. Некрасов, Н.С. Антипов, Н.М. Можаренко и др. // *Сталь*, 1981. – № 7. – С. 7–9.
9. *Товаровский И.Г.* *Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса.* – М.: Metallurgia, 1987. – 192 с.
10. *Освоение технологии плавки с вдуванием пылевидного топлива совместно с применением природного газа и обогащенного кислородом дутья на доменной печи завода «Запорожсталь»* / З.И. Некрасов, Л.Д. Юпко, В.Л. Покрышкин и др. // *Металлургия чугуна: Тематический отраслевой сборник.* – М.: Metallurgia, 1973. – №1. – С. 98–110.
11. *Опытная доменная плавка с применением смеси коксового и природного газов* / З.И. Некрасов, Л.Д. Юпко, Я.М. Ободан и др. // *Металлургия чугуна: Тематический отраслевой сборник МЧМ СССР (ИЧМ).* – 1973. – № 6. – С. 69–83.
12. *Доменная плавка с вдуванием коксового газа* / В.Ф. Пашинский, И.Г. Товаровский, П.Е. Коваленко и др. // Киев: Техника, 1991. – 104 с.
13. *Способ доменной плавки* / О.В. Дубина, А.В. Сокурено, В.А. Шеремет и др. // Патент Украины №67681. – 2004. – Бюл. №6.
14. *Способ доменной плавки* / О.В. Дубина, А.В. Сокурено, В.А. Шеремет и др. // Патент России №2268947. – МКИ⁷ С 21в 5/00. Опубликовано 2006.01.27. Бюл. №3.
15. *Коксозамещающие технологии в доменной плавке.* Под редакцией доктора технических наук, профессора Товаровского И.Г. / В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский, Д.А. Демчук и др. // Днепропетровск, изд. «Пороги», 2006. – 276 с.
16. *Ярошевский С.Л.* *Резервы эффективности комбинированного дутья в доменных цехах Украины: В книге Познание процессов доменной плавки. Коллективный труд.* / Под редакцией В.И. Большакова и И.Г. Товаровского. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 439 с.
17. *Товаровский И.Г., Иванов А.П.* *Прогнозная оценка показателей доменной плавки* // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. тр. Вып. 9, ИЧМ, Днепропетровск, 2004.* – С. 34–44.
18. *Товаровский И.Г.* *Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы.* – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 596 с.

19. *Товаровский И.Г., Хомич В.Н., Бояровская Г.П.* Эффективность использования продуктов газификации твердого топлива в качестве дутьевых добавок в доменной печи // *Сталь*, 1982. – № 6. – С.5–11.
20. *Чернов Д.К.* О прямом получении литого железа и стали в доменной печи // *Д.К. Чернов и наука о металлах. Сб. трудов.* – М.–Л.: ГосНТИ по черной и цветной металлургии, 1950. – С.307–327.
21. *Проблемы перестройки доменной плавки на бескоксую технологию / И.Г. Товаровский, И.И. Дышлевич, Г.В. Горлов и др.* // *Сталь*,–1999. – № 7.– С.10–17.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук. В.В.Бородулиным*