

С.Л.Ярошевский

ВЫПЛАВКА ЧУГУНА

с применением
пылеугольного
топлива



• МЕТАЛЛУРГИЯ •

С.Л.Ярошевский

ВЫШЛАВКА ЧУГУНА с применением пылеугольного топлива



МОСКВА "МЕТАЛЛУРГИЯ" 1988

УДК 669.22

Рецензент: докт. техн. наук, проф. *Е.Ф. Вегман*

УДК 669.22

Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. Я р о ш е в с к и й С.Л.
М.: Metallurgy, 1988. 176 с.

Показаны возможности значительного сокращения удельного расхода кокса за счет применения пылеугольного топлива. Изучены энергетические ресурсы углей и перспективы их применения. Описаны технологические условия и ход освоения технологии доменной плавки на Донецком металлургическом заводе. Рассмотрена конструкция новых зарубежных установок для вдувания пылеугольного топлива. Приведена комплексная оценка эффективности замены части кокса пылеугольным топливом.

Для инженерно-технических работников металлургической промышленности. Ил. 50. Табл. 41. Библиогр. список: 140 назв.

Я $\frac{2602000000 - 244}{040(01) - 88}$ 40-88

ISBN 5-229-00044-9

© Издательство "Металлургия", 1988

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
1. Опыт применения и эффективность дополнительных видов топлива в доменной плавке	7
1.1. Энергетические ресурсы черной металлургии	7
1.2. Сравнительная оценка эффективности выплавки чугуна при применении пылеугольного топлива	12
1.3. Опыт применения пылеугольного топлива для выплавки чугуна	19
2. Теоретическое обоснование и расчет оптимальных технологических режимов доменной плавки с применением природного газа и пылеугольного топлива	31
2.1. Теоретический анализ особенностей технологического режима с применением природного газа и пылеугольного топлива	31
2.2. Особенности температурного режима горна и расчет оптимального технологического режима доменной плавки при вдувании пылеугольного топлива	50
3. Исследование особенностей технологического режима доменной плавки при вдувании в горн пылеугольного топлива и природного газа	66
3.1. Разработка и совершенствование методики исследования теплового режима доменной плавки	66
3.2. Исследование особенностей теплового режима доменной печи при вдувании в горн дополнительного топлива	75
3.3. Исследование особенностей металлургических процессов в фурменных зонах при вдувании пылеугольного топлива	84
3.4. Баланс нефтепродуктов и масел	96
3.5. Оперативное регулирование теплового режима доменной плавки	98
4. Разработка и освоение технологии выплавки чугуна с применением пылеугольного топлива	103
4.1. Условия и ход освоения технологии доменной плавки	109
4.2. Разработка и оптимизация технологии выплавки чугуна с вдуванием пылеугольного топлива с использованием опытно-промышленной установки	108
4.3. Совершенствование технологии выплавки чугуна при вдувании пылеугольного топлива с использованием промышленной установки	140
4.4. Совершенствование технологии выплавки чугуна при работе доменных печей с применением дополнительных топлив	155
5. Экономическая эффективность замены части кокса пылеугольным топливом	156
5.1. Комплексная оценка эффективности применения пылеугольного топлива в доменном производстве	157
5.2. Эффективность внедрения промышленных установок для вдувания пылеугольного топлива в доменные печи Ждановского "Азовсталь" и Коммунарского металлургического комбинатов	165
5.3. Эффективность замены кокса пылеугольным топливом на примере эксплуатации опытно-промышленной и промышленной установок	166
Библиографический список	168

ПРЕДИСЛОВИЕ

На XXVII съезде КПСС подчеркивалось, что в области черной металлургии стоит задача довести в 1990 г. выпуск готового проката до 116—119 млн. т без роста производства чугуна и при существенном снижении расхода кокса.

Кокс является наиболее дорогим и дефицитным компонентом доменной шихты: на его долю приходится до 40—50 % себестоимости чугуна. Поэтому снижение расхода кокса — основной и определяющий путь совершенствования и повышения эффективности технологии доменной плавки. За последние 25 лет в СССР расход кокса на 1 т чугуна снизился с 785 до 501 кг, т.е. на 36 %. Однако в последние годы темпы снижения расхода кокса существенно замедлились: среднегодовое снижение расхода кокса на выплавку 1 т переделного чугуна в 1976—1985 гг. составило 1—3 кг.

Низкие темпы снижения расхода кокса крайне неблагоприятно сказываются на выполнении заводами плана выплавки чугуна. Так, только в 1982 г. простои доменных печей УССР из-за отсутствия кокса составили 1,82 %, что определило снижение производительности доменных печей на 1,6 млн. т и перерасход кокса на 150 тыс. т*. Причины сложившегося положения известны:

ухудшение марочного состава угольных шихт для коксования и соответственно ухудшение качества кокса, определяющееся снижением запасов хорошо коксующихся донецких углей;

медленные темпы улучшения качества железорудной шихты, прежде всего агломерата, по содержанию железа и мелочи 5—0 мм;

снижение эффективности использования дополнительных видов топлива вследствие высокого уровня их расхода, ограниченных возможностей повышения температуры дутья, содержания в нем кислорода и других компенсирующих мероприятий.

Анализ развития доменной технологии показывает, что снижение расхода кокса в последние 25 лет обеспечено прежде всего за счет улучшения качества железорудной шихты и применения дополнительных видов топлива. По-видимому, в дальнейшем эта тенденция сохранится, поскольку потенциальные ресурсы указанных направлений экономии кокса весьма значительны.

На наш взгляд, именно параллельное интенсивное развитие указанных направлений обеспечит в будущем максимальный эффект.

* Решения партии и правительства по хозяйственным вопросам. — М.: Политиздат, 1983. Т. 14. С. 122.

Как показывает практика, улучшение качества шихты и газодинамического режима создает благоприятные предпосылки для оптимального расхода и повышения эффективности применения дополнительных видов топлива, что в конечном счете обеспечит сокращение сроков окупаемости достаточно капиталоемких мероприятий по улучшению качества шихты.

Путь значительного повышения эффективности комбинированного дутья не является однозначным. Наравне с традиционным путем увеличения расхода природного газа или мазута в сочетании с повышением температуры дутья и обогащением его кислородом перспективным представляется путь совместного применения природного газа и пылеугольного топлива. Бесспорными преимуществами пылеугольного топлива являются его минимальное воздействие на температуру горна и выход горновых газов, наличие значительных ресурсов неспекающихся углей, пригодных для приготовления пылеугольного топлива, возможности использования пылеугольного топлива для оперативного управления нагревом горна и качеством чугуна. Теоретический анализ показывает, что благодаря указанным преимуществам при сложившихся технологических условиях и параметрах комбинированного дутья пылеугольным топливом можно заменить до 20–30% кокса, обеспечив сохранение оптимальных параметров нагрева горна соответствующими изменениями расхода кислорода и природного газа.

Большая теоретическая и экспериментальная работа по применению пылеугольного топлива для выплавки чугуна проведена советскими учеными. Первые промышленные опыты по вдуванию в горн доменных печей пылеугольного топлива с целью снижения расхода кокса проведены в 1948 и 1955 г. на Днепровском им. Дзержинского комбинате и Тульском металлургическом заводе.

Вопросам разработки технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива и оборудования для ее реализации посвящены исследования ЦНИИЧермета, Института черной металлургии, Днепро-дзержинского индустриального института, Донничермета, Карагандинского, Западно-Сибирского, Запорожского "Запорожсталь" и Днепровского им. Дзержинского металлургических комбинатов, Донецкого металлургического завода.

В предлагаемой книге рассмотрен более чем 20-летний опыт Донецкого металлургического завода и Донничермета в разработке теоретических основ и путей практической реализации технологического процесса доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива, приготовленного из неспекающихся углей, обеспечивающего значительное снижение расхода кокса и себестоимости чугуна.

На основе проведенной работы создана и освоена в 1980 г. первая в СССР промышленная установка для приготовления и вдувания

пылеугольного топлива в горн доменных печей № 1 и 2 Донецкого металлургического завода, разработана и внедрена технология доменной плавки с вдуванием на 1 т чугуна 60–80 кг пылеугольного топлива, обеспечившая снижение расхода кокса на 11,4–14,3 % при сохранении на исходном уровне производительности печи и качества чугуна.

За 7 лет эксплуатации донецкой промышленной установки использовано 400 тыс. т пылеугольного топлива, выплавлено с его применением более 7,0 млн. т чугуна, сэкономлено более 350 тыс. т кокса, 70 млн. м³ природного газа. Полученные показатели надежности оборудования и эффективности технологии находятся на уровне, достигнутом в 1981–1987 гг. на лучших зарубежных промышленных агрегатах.

На основе полученного опыта ведется подготовка к строительству аналогичных промышленных установок для других металлургических предприятий СССР.

Проведенные исследования выполнены в содружестве с Донецким металлургическим заводом, Гипросталью, ДПИ, Укрэнергочермет, ВНИИ аналитического приборостроения (г. Киев), УХИНОм (г. Харьков), УкрНИИ углеобогащение (г. Ворошиловград) и другими организациями.

1. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ

Применение природного газа и пылеугольного топлива для выплавки чугуна, начатое в промышленном масштабе более 25 лет назад, вызвало существенные благоприятные изменения в доменной технологии, позволившие значительно снизить расход кокса и себестоимость чугуна. Однако потенциальные возможности применения дополнительных видов топлива далеко не исчерпаны. Их реализация в решающей мере зависит от уровня подготовки и качества железорудного сырья, вида и расхода дополнительного топлива и технологического режима плавки, степени и эффективности компенсации нарушений основных показателей технологического режима, вызываемых вдуванием топлива.

В настоящей главе на основании имеющихся теоретических исследований и промышленного опыта рассмотрены пути значительного повышения эффективности и широкого промышленного внедрения дополнительных видов топлива при выплавке чугуна, в частности, при совместном применении природного газа и пылеугольного топлива.

1.1. Энергетические ресурсы черной металлургии

Масса условного топлива, потребляемого в мире, составляет > 9 млрд. т. Предполагается, что к 2000 г. эта цифра возрастет до 25 млрд.т. Однако и в этом случае разведанных запасов энергии на Земле хватит на 150 лет [1]. Более 90 % энергетических запасов Земли приходится на минеральные источники — газообразное, жидкое и твердое топлива. Около 95 % энергии в мире получают за счет использования химического и минерального топлива. В пределах настоящего столетия химическое топливо останется основным и определяющим источником энергии.

Перераспределение доли перечисленных видов минерального топлива вызвано обстоятельствами, связанными с меньшей стоимостью и лучшей транспортабельностью жидкого и газообразного топлив. Прошедшие изменения находятся в резком противоречии с ресурсами перечисленных видов топлива. Это противоречие явилось следствием непланового развития капиталистического общества и стало причиной глубокого энергетического кризиса, разразившегося в 1973—1975 гг. Возникшие противоречия могут стать в ближайшие годы причиной качественного роста добычи угля и увеличения доли его потребления во всех основных отраслях промышленности.

На основании статистических данных рассмотрим перспективы каждого из рассмотренных видов минерального топлива.

Природный газ

Достоверные запасы природного газа равны 54 823 млрд. м³ [1].

В 1985 г. добыча природного газа в капиталистических странах составила 992,4 млрд. куб. м. в год. При сохранении прежних темпов прироста добычи оставшихся ресурсов природного газа в капиталистическом мире хватит только на 20–30 лет. Несмотря на значительное увеличение добычи, дефицит природного газа за рубежом возрастает.

Это объясняется принятием в ряде стран новых законов по защите окружающей среды, поскольку в сложившихся условиях единственным видом топлива, обеспечивающим допустимые нормы загрязнения воздуха, остается природный газ. Причиной значительного дефицита природного газа является также широкое его использование для бытовых нужд и в химической промышленности. В настоящее время в США и Японии проблему дефицита природного газа решают путем значительного расширения его импорта, форсирования программ разработки технологии получения синтетического горючего газа. По мнению специалистов устранение дефицита природного газа за счет решения этих задач возможно не ранее чем через 10–20 лет. В силу изложенных выше причин за рубежом в черной металлургии природный газ применяют в ограниченных количествах.

Наша страна занимает первое место в мире по запасам природного газа. В 1986 г. добыто 686 млрд. м³ природного газа, годовой прирост составил 7 %.

В СССР массовое применение получила технология выплавки чугуна с применением природного газа. Так, в 1981 г. с использованием данной технологии выплавлено 100 млн. т чугуна, т.е. 93 % всей его выплавки. Для этой цели было израсходовано ~ 11 млрд. м³ природного газа, что позволило снизить расход кокса на 10–15 % и себестоимость чугуна на 150–200 млн. руб. Следует отметить, что на большинстве заводов достигнуты оптимальные расходы природного газа. Дальнейшее увеличение его расхода и эффективности применения требуют осуществления капиталоемких компенсирующих мероприятий: повышения температуры дутья и содержания в нем кислорода и т.д.

В ближайшие годы можно ожидать значительного увеличения потребности в природном газе для нужд энергетики в связи с усилением борьбы за чистоту воздушного пространства, увеличением его экспорта.

Изложенные обстоятельства требуют изучения путей повышения эффективности применения природного газа, поиска менее ценных и недефицитных видов дополнительного топлива для выплавки чугуна.

Нефть и мазут

Достоверные запасы нефти в капиталистических и развивающихся странах составляют 84,3 млрд.т. Обеспеченность разведанными запасами нефти рассчитана на 45 лет. Мировой энергетический кризис вызвал повышение цен на нефть в 3,5–4 раза в течение 1973–1974 гг., а к 1982 г. — в 15–18 раз.

В настоящее время жидкое топливо является незаменимым в ряде массовых производств, в частности, в транспорте, авиации, нефтехимии и т.д. Использование мазута и нефти в энергетике возрастает ежегодно более чем на 5 %. В последние 15 лет мазут начали широко использовать для замены кокса в доменных печах. Так, в Японии в 1973 г. расход мазута в черной металлургии составил 13,82 млн.т, в том числе в доменном производстве — 5,41 млн.т. Расход мазута на 1 т чугуна повысился до 60 кг/т чугуна, а в ряде случаев на больших доменных печах до 90–100 кг/т чугуна. В последние годы, однако, за рубежом отмечена тенденция к значительному сокращению использования мазута для выплавки чугуна, прежде всего вследствие значительного повышения его стоимости [2–4].

Мировой энергетический кризис оказал определенное влияние на энергетику Советского Союза: дефицит жидкого топлива значительно увеличился вследствие исчерпания ресурсов в западной части страны.

В нашей стране мазут для замены кокса в доменной плавке стали применять впервые на металлургических заводах Урала, однако эта технология не нашла широкого распространения вследствие наличия более технологичного топлива — природного газа. Только в последние годы на Украине из-за дефицита природного газа и на Востоке из-за отсутствия газопроводов природного газа на ряде металлургических заводов стала развиваться технология с вдуванием мазута [5, 6]. Однако масштабы применения ее незначительны: в последние годы систематически вдувают мазут лишь в доменные печи Карагандинского металлургического комбината, использующие для этой цели ежегодно 200–250 тыс. т мазута.

В результате можно сделать вывод о том, что в ближайшие 10–20 лет металлургическим заводам Украины нельзя рассчитывать на значительное расширение использования жидкого топлива для выплавки чугуна. На наш взгляд, максимально возможное количество мазута необходимо использовать для выплавки чугуна в качестве резервного топлива, особенно в случаях дефицита природного газа в зимний период.

Твердое топливо

Запасы твердого топлива составляют $> 80\%$ разведанных мировых ресурсов минерального топлива. В 1974 г. они составили 11200 млрд. т. Из них извлекаемые запасы — 2900 млрд. т. При сохранении достигнутых темпов добычи этих запасов достаточно на 2000 лет [1].

Недостатками угля как топлива являются относительно высокие стоимость добычи, сернистость, наличие золы, плохая транспортабельность. Сжигание угля требует более сложных и дорогих устройств и, самое главное, вызывает значительное загрязнение атмосферы. Добыча угля наиболее экономичным открытым способом сопровождается нарушением ландшафта. Так, в США, где с 1971 г. $> 50\%$ угля добывается открытым способом, в 1974 г. имелось $> 8 \cdot 10^9$ м² земли, не пригодной для использования, т.е. без верхнего слоя почвы. Указанные причины определили резкое снижение участия угля в энергетике большинства капиталистических стран [7, 8].

В настоящее время конкурентоспособность угля значительно возросла, что объясняется прежде всего меньшей его стоимостью по сравнению с нефтью или природным газом. Значительное повышение конкурентоспособности твердого топлива объясняется также тем, что уголь в настоящее время является единственным массовым сырьем для получения искусственных восстановительного газа, жидкого топлива и т.д.

Следствием изложенных выше причин является интенсификация работ по восстановлению и расширению угольной промышленности в США, Франции, ФРГ, Японии и других странах, в частности, интенсификации работ по применению пылеугольного топлива для выплавки чугуна.

Советский Союз занимает первое место в мире по ресурсам твердого топлива — $> 42\%$ мировых запасов. Ресурсы твердого топлива в СССР составляют 92,4 % от общих запасов минерального топлива [1]. При установившихся темпах добычи этих ресурсов достаточно на 2000—3000 лет. В 1986 г. в СССР добыто 751 млн.т угля, к 2000 г. добыча угля в СССР может возрасти вдвое.

Наиболее перспективными являются новые угольные бассейны на Востоке СССР. К ним относится Канско-Ачинское месторождение бурых углей. На базе месторождения возможно создание комплекса с годовой мощностью по добываемому углю до 1 млрд. т при стоимости добычи (открытым способом) немного выше 1 руб. за 1 т [9].

Несмотря на огромные запасы твердого топлива, ресурсы коксующихся углей очень ограничены. Так, в Донбассе при общих ресурсах 250 млрд. т только 15,7 % приходится на коксующиеся марки углей. Основную массу углеместорождения составляют плохо спекающиеся газовые (41,8 %) и энергетические (тощие, антрациты, длин-

нопламенные) — 25,8 %. Коксующиеся угли являются наиболее дорогими и труднодоступными, поскольку залегают тонкими слоями. В настоящее время в Донбассе экономичной считается добыча коксующихся углей из слоев 0,5 м. Темпы добычи коксующихся углей в 1,5—2 раза превышают их долевое участие в месторождении, вследствие чего в ближайшие годы возможна их выработка, что обесценит месторождение. В связи с изложенным в последние годы на Украину для коксохимзаводов завозят коксующиеся угли Кузнецкого, Печорского и других месторождений. В то же время добыча энергетических марок углей в Донбассе не увеличивается, несмотря на благоприятные перспективы для значительного расширения их добычи.

Освоение в условиях Украины технологии доменной плавки с вдуванием 100—200 кг/т чугуна пылеугольного топлива из неспекающихся марок углей определит снижение расхода кокса на 20—30 % и позволит добывать коксующиеся угли в соответствии с геологическими ресурсами, расширить добычу наиболее дешевых и доступных неспекающихся углей.

Рассмотрим другие важные аспекты применения пылеугольного топлива для выплавки чугуна.

Сера кокса и угольной пыли поглощается в доменной печи чугуном и шлаком на 95—97 %. При сжигании угля в энергетических установках практически вся сера попадает в атмосферу. В 1980—1985 г. на Украине > 90 % чугуна выплавляли с применением природного газа, расход которого составил 113 м³/т чугуна. При замене природного газа антрацитом и тощим углем, содержащим 2,0 % S, использование освободившегося природного газа в энергетических установках позволит сократить ежегодный выброс в атмосферу 60—80 тыс. т S.

Приготовление пылеугольного топлива сопровождается значительно меньшим загрязнением атмосферы и водного бассейна, чем производство кокса [10—12]. Значительное расширение использования пылеугольного топлива для выплавки чугуна позволит увеличить производство чугуна без строительства новых коксохимических заводов.

Широкое применение пылеугольного топлива будет сопровождаться значительным повышением производительности труда, рассчитанной на комплекс доменных и коксохимических цехов: по данным Донничермета и Укрэнергочермета производство 1 млн. т угольной пыли в год требует 100—200 рабочих, а производство 1 млн. т кокса ~ 1000 рабочих. Следовательно, при коэффициенте замены кокса углем 1:1 вдувание в горн 1 млн. т угольной пыли будет сопровождаться высвобождением для народного хозяйства 800—900 высококвалифицированных рабочих.

Установки для приготовления угольной пыли занимают значительно меньше места, чем коксохимический завод соответствующей мощности, и требуют для строительства меньших капитальных затрат [13].

1.2. Сравнительная оценка эффективности выплавки чугуна при применении пылеугольного топлива

Основными дополнительными видами топлива, которые успешно освоены в доменных цехах СССР и могут в ближайшие годы широко применяться для выплавки чугуна, являются природный газ, мазут и пылеугольное топливо. Они различаются прежде всего содержанием горючих компонентов — углерода и водорода, что определяет изменение величины отношения С/Н от 3–7 для природного газа и мазута до 17–35 для каменных углей (табл. 1).

Следствием низкого значения С/Н для природного газа и мазута являются высокие затраты тепла на диссоциацию углеводородсодержащих соединений, большой выход продуктов горения, относительно низкая теоретическая температура горения, определяющая необходимость значительной температурной компенсации. В то же время пылеугольное топливо, имеющее в обычных условиях минимальную влажность (< 0,5 %), при выходе летучих до 10 % требует в 2–4 раза меньше тепла на его подготовку к сжиганию. Это определяет принципиальные технологические преимущества пылеугольного топлива.

Рассмотрим аналитические и экспериментальные работы, посвященные сопоставлению эффективности применения газообразного, жидкого и твердого топлива для выплавки чугуна.

Т а б л и ц а 1. Основные характеристики природного газа, мазута, топлива

Показатель	Природный газ	Мазут	Пылеугольное топливо из концентрата тощего угля
Химический состав, %:			
углерод	76	85,4–87,4	76,49
зола	—	0,1–0,3	11,0
сера	—	0,8–1,3	1,71
летучие	100	—	7,49
влажность	—	3,6–7,8	0,38
Выход водорода м ³ /м ³ , м ³ /кг .	2,01	1,28	0,46
Снижение теоретической температуры горения (°С) при увеличении расхода дополнительного топлива на 1 г/м ³			
С/Н	3	6–7	17–35

Т а б л и ц а 2. Показатели работы доменных печей при обогащении дутья до 25 % O₂, постоянной температуре дутья и различных видах добавок к дутью

Показатель	Исходные данные	Вид добавок					
		нефть	уголь	антрацит	пар	метан	коксовый газ
Расход добавок, кг/т чугуна	—	69	119	167	49,3	36	47,6
Расход кокса, кг/т чугуна	657	540	530	460	650	570	569
Экономия кокса, кг/т чугуна	—	118	129	194	3,5	86,5	88
Коэффициент замены, кг добавки/кг кокса	—	0,59	0,92	0,86	13,09	0,41	0,53
Коэффициент замещения, кДж кокса/кДж добавки	—	0,90	0,97	0,98	—	0,81	0,82
Состав колошникового газа, %:							
CO ₂	15,5	18,1	18,0	17,9	18,4	18,4	18,4
CO	25,9	26,6	27,4	27,5	28,0	26,0	25,9
H ₂	1,0	3,5	2,8	2,7	2,7	3,9	4,3
CO/CO ₂	1,67	1,47	1,52	1,54	1,52	1,42	1,41
Возможное увеличение производительности, %	—	12,8	12,0	13,5	9,3	13,1	14,1

В работе, выполненной фирмой Бисра (Англия), аналитическим путем определена эффективность применения различных добавок к дутью. В качестве условия расчета было принято, что при вдувании топлива сохраняются на исходном уровне теоретическая температура горения и интенсивность шлавки по выходу горновых газов. Расчет выполнен для случая повышения температуры дутья на 100 °С и обогащения его до 25 % O₂ (табл. 2).

Как в первом, так и во втором случаях максимальное снижение расхода кокса определяет применение антрацита, допустимый расход которого оказался в 2—4 раза выше, а получаемая экономия кокса в 1,2—1,7 раза больше, чем при вдувании коксового газа, метана или мазута. В обоих случаях применению антрацита соответствует почти максимальное повышение производительности печи (13,5 %), улучшение использования восстановительной энергии горновых газов [17].

В работе французских исследователей, выполненной для металлургического завода в г. Шассе, в качестве условий расчета приняты неизменными теплосодержание горновых газов, выход горновых газов в единицу времени, степень использования окиси углерода и водорода, температура колошниковых газов и потери тепла с водой и в окружающее пространство [17]. Из данных, приведенных в табл. 3 видно, что максимальное количество тепла на единицу массы

Т а б л и ц а 3. Эффективность вдувания в горн доменной печи нефти и различных сортов углей

Топливо	Тепло, выделяемое в горне, кДж/кг топлива	Оптимальное количество добавки, кг	Экономия кокса, кг	Коэффициент замены, кг кокса на 1 кг топлива
Кокс	8359	—	—	—
Нефть	6034	46	66,7	1,45
Антрацит	7508	110	116	1,05
Жирный уголь	6788	85	90	1,06
Газовый уголь	6541	81	79	1,06
Пламенный уголь	5313	73	73	1,0
40 % нефти + 60 % газового угля.	6021	73	73	1,18

или объема добавки выделяет антрацит, затем следуют угли с повышенным содержанием летучих и нефть. Экономический эффект от вдувания этих видов топлива пропорционален их теплоте сгорания. Аналогичные выводы получены в работе, выполненной английскими исследователями для условий завода в г. Стентоне [20].

Полученные аналитическим путем выводы о технологических преимуществах применения пылеугольного топлива подтверждаются опытными плавками. Так, в ряде работ приведен анализ относительной эффективности применения мазута и природного газа [15—17, 21]. Из данных табл. 4 следует, что существенных преимуществ то или иное топливо не имеет, что объясняется незначительным различием их физико-химических свойств.

В табл. 5 приведены результаты применения природного и коксового газов, мазута и пылеугольного топлива на различных металлургических заводах. Исходный относительный расход кокса в приведенных исследованиях составил 571—620 кг/т чугуна. Главные же факторы, определяющие эффективность применения дополнительных видов топлива, — температура, влажность дутья, а также содержание в нем кислорода — существенно не изменились. Это свидетельствует о том, что полученный экономический эффект определяется прежде всего видом дополнительного топлива. Применение коксового, природного газов и мазута позволило при отсутствии существенной компенсации снижения нагрева горна сократить расход кокса на 6,3—12,0 % при увеличении производительности печи на 0,2—2,2 %. Применение пылеугольного топлива в данных условиях позволило снизить расход кокса на 23,2 % при расходе топлива 132 кг/т чугуна. Таким образом, в соответствии с теоретическими выводами рассмот-

Т а б л и ц а 4. Показатели работы доменных печей при использовании мазута и природного газа [17]

Показатели	Вдувание мазута		Вдувание природного газа	
	ММК	НТМК	ММК	НТМК
Исходный расход кокса, кг/т чугуна	596–607	620–598	595–607	607
Расход топлива.	22	20–30	50,0	62,7
Снижение расхода кокса, кг/т чугуна.	39	31–53	56	56
То же, % к исходному	6,5	6,3–7,4	9,6	9,2–9,75
Изменение производительности печи, %	–1,8	+ (0,2–1,2)	+0,6	+ (0,5–0,7)
Изменение температуры дутья, град.	(–23) – (+23)	+ (50–91)	+4	+ (90–105)
Изменение содержания кислорода в дутье, %	0	0	0	+0,1
Коэффициент замены топлива, кг кокса/кг топлива	1,8	1,40–1,56	1,03–1,16	0,9–1,09

Т а б л и ц а 5. Эффективность применения дополнительного топлива при незначительных изменениях температурно-дутьевого режима

Показатели	Дополнительное топливо			
	коксовый газ	природный газ	мазут	пылеугольное топливо
Расход дополнительного топлива*	40,9	80–85	20–30	132
Исходный расход кокса, кг/т чугуна	607	572	598–620	571
Снижение расхода кокса, кг/т чугуна.	42	65–70	31–53	132
То же, % к исходному	6,9	11,2–12,0	6,3–7,4	23,2
Коэффициент замены, кг/м ³	1,03	0,86	1,40–1,56	1,0
Изменение производительности печи, %	+0,5	0+2,2	0,2–1,2	Нет св.
Изменение температуры дутья, °С.	–20	+6	50–91	0
Изменение влажности дутья, г/м ³	+6,5	(–9,5) – (+2,2)	Нет св.	0
Изменение содержания O ₂ в дутье, %	+0,8	0	0	0

* Природный и коксовый газы приведены в м³/т чугуна, мазут и пылеугольное топливо – кг/т чугуна.

ренные опытные плавки подтвердили, что при отсутствии компенсирующих изменений температурно-дутьевого режима снижение расхода кокса за счет вдувания угля оказалось вдвое большим, чем за счет вдувания других видов топлива.

Вывод о существенных экономических преимуществах вдувания пылеугольного топлива по сравнению с вдуванием мазута или природного газа получен после проведения длительных промышленных плавки на металлургическом заводе в Ашленде (США) [10, 11, 23, 24]. Авторы утверждали, что выгода от вдувания угольной пыли в 5—9 раз выше, чем от вдувания мазута или природного газа. Относительная доля замены кокса угольной пылью в 2—3 раза превышает аналогичную величину при замене кокса природным газом или мазутом. Следует отметить, что соотношение цен для условий металлургического завода в Ашленде, являющегося центром угледобывающей промышленности, благоприятствует применению пылеугольного топлива.

В условиях Украины большой интерес представляет анализ эффективности применения природного газа в сочетании с мазутом или пылеугольным топливом. Расчет выполнен исходя из условия сохранения на исходном уровне теоретической температуры горения. При сохранении на исходном уровне параметров дутья максимальную эффективность обеспечивает замена природного газа пылеугольным топливом. Вдувание на 1 т чугуна 100 кг пылеугольного топлива может обеспечить дополнительное снижение расхода кокса на 60 кг/т чугуна при сокращении расхода природного газа на 50 м³/т чугуна. Замена природного газа мазутом в аналогичных условиях сопровождается дополнительным снижением расхода кокса на 43 кг/т чугуна и расхода природного газа на 80 м³/т чугуна.

В 1970 г. выполнена работа по оценке эффективности применения природного газа в сочетании с пылеугольным топливом для условий Донецкого металлургического завода. По условиям расчета приняли, что при вдувании пылеугольного топлива возможности компенсации его охлаждающего влияния за счет изменения температурно-дутьевого режима отсутствуют, единица углерода кокса заменяется единицей углерода пыли, приход водорода на единицу шихты сохраняется постоянным.

Ниже приведен химический состав углей, применяемых для вдувания в горн доменной печи, %:

	C	H ₂	S	O ₂	N ₂	Зола	Влага
Марка угля:							
длиннопла-							
менный	62,1	4,50	2,37	9,55	1,31	17,3	1,0
тощий	72,3	3,37	1,84	1,12	1,20	18,3	1,0
антрацит	76,8	1,64	1,23	1,23	0,65	16,3	1,0

Как видно из рис. 1, замена части природного газа пылеугольным топливом экономически выгодна: при вдувании на 1 т чугуна 100 кг пылеугольного топлива расход кокса снижается на 90–130 кг, а стоимость топлива — на 0,9–3,0 руб.

На металлургических заводах Донецка и Запорожья, а также на заводе Гута Флориан в Польше проведены промышленные плавки, полностью подтвердившие высокую экономическую эффективность применения природного газа в сочетании с пылеугольным топливом. При вдувании в горн 20–80 кг угольной пыли на 1 т чугуна расход кокса снизился на 3,5–15,0 %, природного газа на 5,5–18 м³ и стоимость топлива на 1–3 руб. Коэффициент замены кокса пылеугольным топливом, как правило, был равен или превышал 1, производительность печи и качество чугуна существенно не изменились. Фактическая эффективность применения комбинированного дутья увеличилась вдвое по сравнению с применением одного природного газа [26–29].

Рассмотрим вопрос об экономических и технологических преимуществах вдувания в горн доменной печи различных сортов каменного угля.

По данным работы [24], максимальное снижение расхода кокса наблюдалось при применении углей с максимальным содержанием углерода. В частности, вдувание антрацита обеспечивало на 30 % больше экономию кокса по сравнению с вдуванием газовых углей.

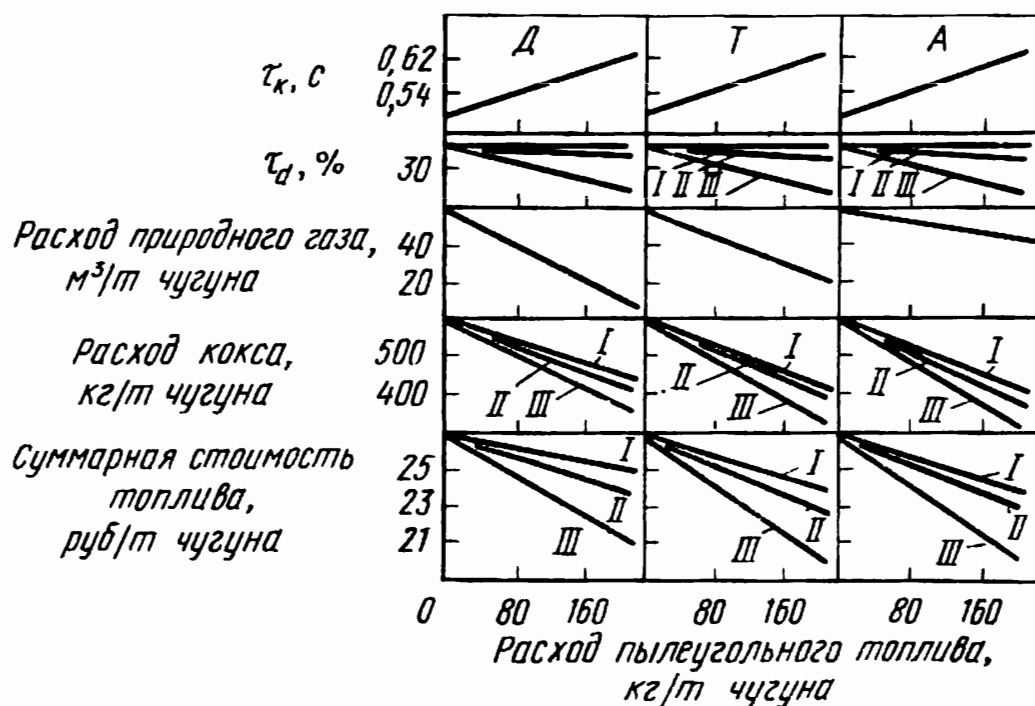


Рис. 1. Зависимость технико-экономических показателей плавки от расхода длиннопламенного (Д); тощего (Т) углей и антрацита (А) при снижении $\tau_d, \%$: I — 0; II — 2; III — 5 на каждые 100 кг пылеугольного топлива, вдуваемого на 1 т чугуна

По данным расчета английских исследователей, выполненного для условий металлургического завода в Стентоне, замена тощих углей с содержанием 6,2–6,9 % летучих углями с содержанием летучих 27,2–33,3 % сопровождалась сокращением замены кокса углем от 87,5–86,5 до 69,5–77,0 кг/т чугуна при практически постоянной производительности печей [20]. Вывод об экономическом преимуществе вдувания углей с минимальным содержанием летучих подтверждается и другими исследователями [31].

При работе доменных печей с вдуванием природного газа и пылеугольного топлива предпочтительность пылеугольного топлива с минимальным содержанием летучих становится очевидной. Для экономической оценки можно принять, что водород летучих угля по тепловым затратам эквивалентен водороду природного газа, так же, как и углерод кокса эквивалентен углероду угольной пыли. Данное предположение сделано на основании анализа опыта применения пылеугольного топлива в СССР и за рубежом [20; 33, 42].

Длительный опыт применения природного газа для выплавки чугуна показал наличие экстремальной зависимости между расходом природного газа и кокса [33, 34]. В связи с этим в выполненном авторами расчете принято условие сохранения на исходном уровне прихода водорода на единицу шихты. Таким образом, по условиям расчета меньшая часть пылеугольного топлива (летучие) расходуется в горне на замещение водорода природного газа, а большая часть (нелетучий углерод) — на замещение углерода кокса.

При сложившемся соотношении цен на природный газ, каменный уголь и кокс, а также работе доменной печи с применением природного газа максимальное снижение расхода кокса и себестоимости чугуна может быть получено при вдувании углей с минимальным содержанием летучих и максимальным содержанием нелетучего углерода (см. рис. 1).

Вопрос об оптимальном содержании золы в углях, вдуваемых в горн, является дискуссионным, несмотря на успешный опыт вдувания в горн углей с содержанием золы от 3,5 до 40 % [35, 36]. Расчетные и практические данные работы печей подтверждают технологическую целесообразность применения углей с минимальным содержанием золы и максимальным содержанием углерода. Экономическая эффективность применения низкозольных углей в значительной мере определяется их стоимостью [11, 37–42].

В силу минимального влияния пылеугольного топлива на снижение нагрева горна и изменение выхода горновых газов применение данного вида топлива является предпочтительным и даже единственно целесообразным в некоторых конкретных условиях доменной плавки. Так, пылеугольное топливо может обеспечить значительное снижение

расхода кокса при выплавке специальных видов чугуна, требующих высоких нагрева горна и относительного расхода кокса.

Имеется успешный опыт практического применения пылеугольного топлива для выплавки ферромарганца на Ново-Тульском заводе, ферросилиция — на металлургическом комбинате им. Дзержинского, литейного чугуна — на металлургических заводах в Стентоне (Англия) и Уиртоне (США). В то же время применение, например, природного газа в тех же условиях нецелесообразно или малоэффективно, что подтверждается как теоретическими, так и практическими данными работы печей [17, 34, 43, 44, 57].

При работе доменной печи на частично металлизированной шихте отмечается значительное сокращение потребности в газе-восстановителе. Вдувание природного газа в данных условиях становится нецелесообразным, а применение пылеугольного топлива является единственно возможным и эффективным, поскольку не вызывает существенного изменения выхода восстановительных газов и температурного режима горна. Условия использования восстановительной энергии горнового газа при этом улучшаются благодаря снижению расхода кокса и, следовательно, увеличению времени контакта газа-восстановителя с железорудной частью шихты.

1.3. Опыт применения пылеугольного топлива для выплавки чугуна

Разработка и совершенствование оборудования для приготовления и вдувания пылеугольного топлива в доменные печи

Одна из причин медленного промышленного внедрения технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива заключается в отсутствии надежного, автоматизированного и удовлетворяющего требованиям технологии оборудования для приготовления и вдувания топлива. Одним из недостатков его является высокая стоимость, в 7–10 раз превышающая стоимость оборудования для вдувания мазута.

Фирма "Армко Стил" (США) оценивает стоимость оборудования для использования пылеугольного топлива для одной печи в 10 млн. долл. [45]. Из них на узел приготовления топлива приходится 60–70 %.

В последние годы большое распространение получила система оборудования для приготовления и вдувания пылеугольного топлива фирмы "Армко Стил". Разработка и совершенствование данного оборудования начаты в 1963 г. [10, 11, 23, 24, 31] (рис. 2). Сырой уголь поступает в шаровую барабанную мельницу 3, из которой готовое топливо выносится горячим воздухом в бункер запаса 5.

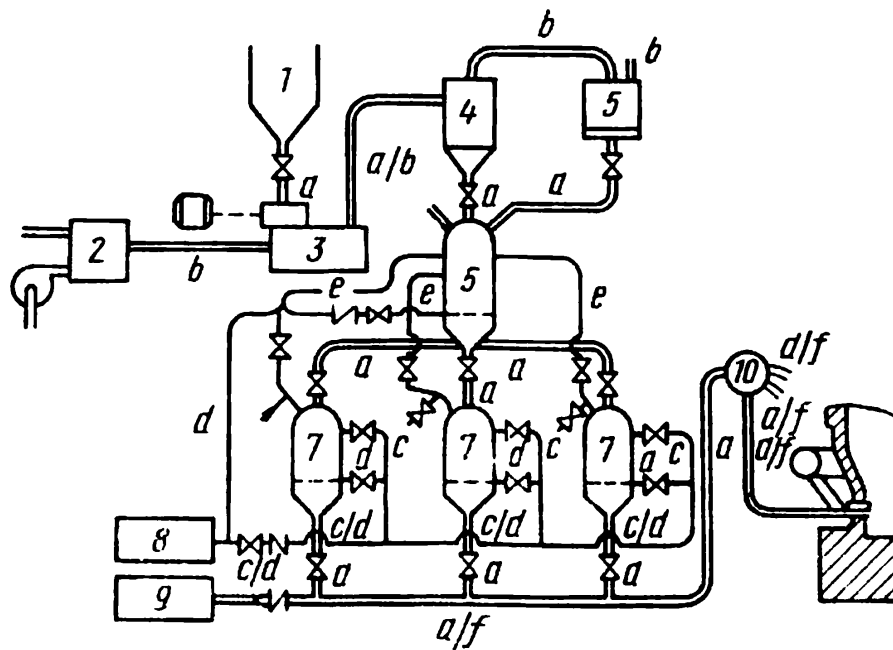


Рис. 2. Установка для вдувания пылеугольного топлива в доменную печь конструкции фирмы "Бабкок энд Вилькокс":

1 — бункер запаса для рядового угля; 2 — подогреватель; 3 — мельница; 4 — циклон-сепаратор; 5 — рукавный фильтр; 6 — бункер запаса для угольной пыли; 7 — дозировочный бункер; 8 — подвод сжатого инертного газа; 9 — подвод сжатого воздуха; 10 — распределитель угля; *a* — трубопроводы для транспортировки угля; *b* — трубопроводы для транспортировки горячего первичного воздуха для подсушивания угольной пыли; *c* — трубопроводы для подачи сжатого инертного газа; *d* — трубопроводы для разрыхления угольной пыли в бункерах инертным газом; *e* — уравнивательные трубопроводы (для выравнивания давления); *f* — трубопроводы для подачи воздуха-носителя

Отделение пылеугольного топлива от воздуха происходит в циклоне 4 и фильтрах 5. Из бункера запаса топливо поступает в один из питающих резервуаров 7. В работе участвуют 2 резервуара: по одному на наполнении и выдувке, третий — резервный.

Выдача пылеугольного топлива в печь проводится инертным газом по общему пылепроводу, который в дальнейшем с помощью специального устройства 10 делится по числу воздушных фурм. Промышленная установка по указанной схеме успешно работает на двух доменных печах металлургического завода в Ашленде (США).

Указанная система, являющаяся одной из совершенных, нашла промышленное применение в ряде капиталистических стран [10, 40, 41, 45–47].

Узел приготовления топлива рассматриваемой системы выполнен в соответствии с многолетней практикой энергетической промышленности: до настоящего времени шаровые барабанные мельницы остаются надежными и автоматизированными агрегатами, обеспечивающими приготовление пылеугольного топлива из углей любых марок.

Вопросы взрывопожаробезопасности решались на протяжении 15

лет, и в настоящее время по данному показателю достигнута достаточная надежность при работе на углях с высоким содержанием летучих [39]. Решение вопроса, полученное после трех реконструкций основного оборудования и разработки ряда оригинальных технических решений, было обеспечено прежде всего за счет применения нейтрального газа-носителя для наполнения бункера запаса и пневмотранспорта пылеугольного топлива в доменную печь.

В ходе этой работы в соответствии с новыми нормами и законами защиты окружающей среды успешно решены также вопросы экологии. Не отрицая надежности предложенных решений, необходимо отметить их высокую капиталоемкость: решение вопросов взрывопожаробезопасности определило повышение стоимости основного оборудования на 20–30 %.

Принципиальной особенностью распределительно-дозировочного отделения (РДО) системы фирмы "Армко Стил" является выдача топлива общим аэрационным питателем в пылепровод, который с помощью делителя потока обеспечивает его подачу в отдельные фурмы. Условно такая схема может быть названа "питающий резервуар—питатель—делитель потока—фурмы". Принципиальными недостатками такой схемы являются ее сложность, невозможность воздействия на расход топлива по отдельным фурмам и, следовательно, управления его расходом по окружности печи. Периодическое отключение выдачи пылеугольного топлива при переключении одного резервуара на другой создает значительные колебания расхода топлива во времени.

Таким образом, при высокой надежности и взрывобезопасности промышленной установки в США в ней недостаточно полно решены вопросы, обеспечивающие удовлетворение требований технологии доменной плавки, что решающим образом может отразиться на величине оптимального расхода топлива и эффективности новой технологии.

Исходя из имеющегося опыта на опытно-промышленной и промышленной установках Донецкого металлургического завода непрерывную подачу топлива во времени, контроль и перераспределение его во времени и по фурмам обеспечили за счет использования схемы питающий резервуар—аэрационный питатель — фурма. Из питающего резервуара, пополняемого через шлюзовую емкость, т.е. без снижения давления и прекращения вдувания пылеугольного топлива, через индивидуальные на каждую фурму питатели и трассы топливо подается в фурмы доменной печи [48–50].

Одним из наиболее ответственных узлов РДО является узел дозирования топлива. В ряде установок для дозирования топлива предложено использовать механические дозаторы. В 1968–1971 гг. механические дозаторы использовали на опытно-промышленной установке в Донецке. В Запорожье для опытно-промышленной установки ИЧМ Минчермета СССР предложен групповой роторный дозатор, обеспечи-

вающий выдачу пылеугольного топлива одновременно в несколько фурм [27, 51, 52]. Общим недостатком механических питателей является их громоздкость, наличие вращающихся деталей в сильно запыленной среде. Слабыми узлами в питателе являются сальники и электродвигатели постоянного тока. В связи с этим указанные питатели не нашли широкого промышленного применения.

Аэрационный принцип дозирования, успешно примененный и внедренный в СССР, США и Японии, имеет преимущества перед механическим прежде всего за счет большей надежности, меньших размеров, стоимости и т.д. Основной задачей представлялось дальнейшее повышение эксплуатационных характеристик данного питателя, прежде всего в части их идентификации и воспроизводимости, повышения абразивной стойкости и ремонтоспособности [104, 108]. Выбор схемы РДО и метода дозирования пылеугольного топлива определяют и метод решения в одной из основных задач данного оборудования — обеспечение равномерной по фурмам подачи пылеугольного топлива.

В схеме фирмы "Армко стил" эту задачу решают за счет выравнивания гидравлических сопротивлений отдельных трасс путем калибровки. По мнению авторов надежное решение задачи таким путем представляется очень сложным из-за изменения гидравлических сопротивлений трасс под влиянием абразивного износа, изменения сопротивления выходу топлива в печь — давления в доменной печи. Измерение гидравлических сопротивлений и ввод дополнительных сопротивлений являются сложными, трудоемкими и эмпирическими операциями. При использовании схемы питающий резервуар — аэрационный питатель — фурма создают предпосылки для оперативного управления расходом топлива на каждую фурму изменением параметров работы питателя. В данном направлении и совершенствовали промышленную установку на Донецком металлургическом заводе. Решение задач достигали за счет разработки и совершенствования конструкции индивидуальных аэрационных питателей: исследования характеристик индивидуальных питателей; разработки и внедрения приборов контроля расхода топлива по фурмам; разработки и внедрения автоматической системы управления расходом топлива по фурмам.

Указанную выше работу проводили на базе освоения и внедрения комплекса автоматических систем:

пересыпки топлива в питающий резервуар и поддержания его постоянного уровня;

перепада давления питающий резервуар — горн доменной печи;

расхода транспортного и аэрационного воздуха.

Решение вопросов полного удовлетворения оборудованием для вдувания пылеугольного топлива требований технологии невозможно без наличия объективной, точной и простой методики оценки фактического расхода пылеугольного топлива по фурмам, а также коли-

чественной оценки полноты сгорания пылеугольного топлива в горне доменной печи. В технической литературе отсутствует информация о методиках и оборудовании для измерения указанных показателей, в связи с чем публикуемые зарубежные данные, в частности, о неравномерности распределения топлива по фурмам, представляются субъективными [40]. В связи с изложенным разработка специальных оборудования и методик для выполнения перечисленных экспериментов представляется актуальной.

Ответственными элементами оборудования являются тракт подачи и узел вдувания пылеугольного топлива в горн доменной печи. В практике известны случаи низкой абразивной стойкости тракта подачи пылеугольного топлива в доменную печь. Как правило, подобные результаты определялись применением пылеугольного топлива крупного помола, его высокими абразивными характеристиками (полукокс) и скоростями пневмотранспорта [47].

Наиболее рациональными путями повышения абразивной стойкости тракта подачи являются:

снижение тонины помола до уровня, определяемого необходимостью его полного сгорания в фурменных зонах;

оптимизация режима пневмотранспорта, прежде всего в части снижения скоростей движения потока по длине трассы в пределах 5–15 м/с;

разработка специальных конструкций поворотов трасс, а также их усиление. Использование указанных мероприятий позволило повысить абразивную стойкость тракта подачи топлива диаметром 100 и 25 мм до 1 года и более.

Предложены различные варианты устройства ввода пылеугольного топлива в горн доменной печи [10, 17, 51, 53]. Большое распространение за рубежом получил способ ввода через боковую стенку сопла, что обеспечило достаточное удаление места ввода топлива от носка фурмы и соответствующую предварительную его подготовку к сгоранию. Использование данного метода в США, в частности, способствовало достижению полного сгорания пылеугольного топлива на расстоянии 300–400 мм от носка фурмы [2]. Однако условия применения пылеугольного топлива и данного устройства в США не были типичными для современной технологии доменной плавки: естественное содержание кислорода в дутье, температура дутья 950 °С. Испытание подобного принципа ввода топлива в условиях металлургического комбината "Запорожсталь", работающего в современных технологических условиях, подтвердило наличие принципиальных недостатков устройства: в условиях высоких температуры дутья и обогащения его кислородом горение пылеугольного топлива начиналось уже в пределах фурмы, что вызывало появление перегретых частиц золы и зашлаковывание воздушных фурм, значительное нарушение условий

поступления в печь дутья и снижение производительности доменной печи. Применение данного способа ввода топлива не исключает также и абразивного износа внутренней поверхности воздушных фурм, что определяет преждевременный выход их из строя.

Поскольку изложенные недостатки представляются существенными и трудноустраняемыми, на Донецком металлургическом заводе был усовершенствован известный ранее способ ввода топлива через воздушную фурму [17, 35, 36, 51–53]. При этом были поставлены и решены следующие задачи:

- сохранение подвода через фурму природного газа;

- обеспечение максимального контакта с дутьем и предварительной подготовки топлива к сгоранию в пределах фурмы;

- повышение абразивной стойкости тех участков внутренней поверхности фурмы, с которыми возможен контакт топлива;

- освоение серийного промышленного производства воздушных фурм для подачи в горн пылеугольного топлива и природного газа.

Промышленные испытания подтвердили высокие технологические и эксплуатационные показатели разработанных воздушных фурм при вдувании в горн на 1 т чугуна до 100 кг пылеугольного топлива.

Бесспорной является высокая перспективность вдувания в горн пылеугольного топлива в смеси с шлакоразжижающими и другими добавками (топливные смеси). Однако оборудование для приготовления таких смесей не разработано, в связи с чем отсутствует опыт их применения.

На основании проведенного анализа можно отметить следующие тенденции в разработке надежного, удовлетворяющего требованиям технологии доменной плавки оборудования для приготовления и вдувания пылеугольного топлива;

- комплексное и надежное решение вопросов взрывопожаробезопасности и экологии;

- механизация и автоматизация работы механического оборудования установки;

- создание принципиально новых приборов контроля режима пневмотранспорта, а также систем автоматизации и оптимизации режима пневмотранспорта;

- развитие и совершенствование аэрационного принципа дозирования пылеугольного топлива;

- разработка оборудования для приготовления многокомпонентных топливных смесей (пылеугольное топливо + шлакоразжижающие добавки и т.д.).

Технология доменной плавки с применением пылеугольного топлива

Технология доменной плавки с применением пылеугольного топлива известна с 1831 г.

Затяжной период промышленного освоения технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива можно объяснить необходимостью разработки сложного и дорогостоящего оборудования для обработки и вдувания топлива, недостаточной четкостью требований к данному оборудованию, успешной конкуренцией со стороны мазута и природного газа. В то же время многочисленные теоретические работы на всех этапах освоения нового процесса неизменно показывали его высокую экономическую и технологическую эффективность [20, 42, 54, 57, 62, 65, 66].

Наиболее важным определяющим требованием новой технологии является обеспечение полного сгорания топлива в пределах фурменной зоны доменной печи. Выход частиц пылеугольного топлива за пределы фурменных зон вызывает ухудшение коэффициента замены кокса топливом, вязкости шлаков и газопроницаемости горна.

Имеется промышленный опыт, убедительно подтверждающий сказанное: в ряде опытных плавков при повышенном расходе топлива отмечалось массовое горение воздушных фурм, снижение производительности печей, загромождение горна, увеличение суммарного расхода топлива. Прямым свидетельством неполного сгорания топлива явилось значительное увеличение содержания углерода в колошниковой пыли и шламе газоочисток [57]. Полное сгорание пылеугольного топлива в фурменных зонах определяется прежде всего его фракционным составом.

В литературе описан опыт использования топлива различного фракционного состава: от 0–3,0 и даже 0–6,0 до 0,022–0,032 мм [11, 17, 38, 57]. Анализ этого опыта показывает четкую обратную связь между степенью измельчения топлива и эффективностью его применения. За последние 10 лет на основе теоретических расчетов и успешного промышленного опыта показано, что в пределах фурменных зон могут полностью сгорать частицы $\leq 0,20$ – $0,100$ мм, т.е. только пылеугольное топливо такого фракционного состава и лучше может быть успешно использовано в современных технологических условиях работы печей.

По-видимому, дальнейшее совершенствование технологии использования пылеугольного топлива в доменной плавке потребует снижения степени измельчения как с целью обеспечения полноты сгорания, так и повышения надежности и автоматизации работы оборудования для приготовления и вдувания пылеугольного топлива: снижение степени измельчения обеспечивает улучшение его текучести и подвижности, постепенно приближая свойства азрированного потока топлива к

свойствам жидкости. Негативной стороной остаются значительно повышающиеся затраты энергии и стоимость приготовления топлива, увеличение потерь угля, снижение производительности помольных средств и т.д. До настоящего времени остается недостаточно изученным влияние формы частиц топлива на скорость его сгорания в условиях фурменной зоны доменной печи. Известно, что при прочих равных условиях увеличение удельной поверхности частиц пылеугольного топлива интенсифицирует их сгорание. Из изложенного следует, что одной из актуальных задач разрабатываемой технологии является оптимизация фракционного состава и формы частиц топлива исходя из условий обеспечения его полного сгорания, уменьшения стоимости приготовления и обеспечения надежной работы основного оборудования, в первую очередь, по абразивному износу. Частной задачей является разработка методики определения фракционного состава топлива при величине помола 80–100 % менее 0,08–0,1 мм.

Опыт показал, что применяемые для этой цели сита "РОТАП" не обеспечивают получения надежной и количественной информации из-за значительных потерь тонких фракций – выплывания, а также слипания частиц.

Неблагоприятное влияние на полноту сгорания пылеугольного топлива и показатели доменной плавки оказывает его неравномерное поступление по фурмам. Ориентировочные расчеты показывают, что даже неравномерность поступления по фурмам в пределах $\pm 10\%$ (при расходе пылеугольного топлива 100 и кокса 400 кг/т чугуна) определяет разницу в приходе тепла в фурменные зоны на 3–4 %, что может обеспечить неравномерность содержания в чугуне до 0,3–0,5 % Si и его температуры до 20–30 °С. Соответственно колеблются выход горновых газов и протяженность фурменных зон. Основным недостатком неравномерной подачи топлива является значительное отклонение от оптимального уровня основных физико-химических условий в фурменных зонах, что нарушает сход шихты и ход восстановительных процессов, чем объясняется ухудшение основных показателей плавки и значительное снижение эффективности использования топлива.

Практика применения пылеугольного топлива показала, что в большинстве случаев показатель неравномерности поступления топлива по фурмам не контролировался, методы управления и уменьшения данной неравномерности отсутствовали, что в итоге и определило высокое значение данного показателя в реальных условиях плавки (до $\pm 50\text{...}100\%$). . Необходимо отметить, что в некоторых работах и рекламных материалах указывалось на снижение неравномерности поступления топлива по фурмам до $\pm(4\text{--}3\%)$ и даже $\pm 1\%$ (фирмы "Поль Вюрт", Люксембург; "Армко стил" США).

На наш взгляд, достоверность приведенных показателей недоста-

точно: в указанных работах не описывается методика определения неравномерности, не приводятся экспериментальные данные и условия их получения. . Более того, в последних публикациях указанные фирмы не подтверждают приведенные выше показатели неравномерности.

В последние годы был представлен метод фирмы "Поль Вюрт", при котором пылеугольное топливо распределяли по фурмам пропорционально расходу дутья.

Не отрицая определенной эффективности данного мероприятия, следует, однако, признать, что оно не решает вопрос по существу: не устраняет неравномерности работы доменной печи по окружности, не создает возможности для оптимизации физико-химических условий в фурменных зонах и, таким образом, оптимизации технологического режима доменной плавки в целом.

Как показывает практика доменного производства, наиболее эффективным путем решения данных вопросов является обеспечение равных и оптимальных физико-химических условий в фурменных зонах, что может быть обеспечено прежде всего за счет максимально равномерной по окружности печи подачи дутья и дополнительных видов топлива. В связи с этим вопросы обеспечения равномерного распределения топлива по фурмам, наравне с разработкой приборов и методов контроля фракционного состава топлива и неравномерности распределения его по фурмам, являются актуальными и эффективными.

В ряде случаев мировой практики экспериментально показана возможность полного сгорания значительных количеств пылеугольного топлива в пределах фурменной зоны.

Так, в США с помощью скоростной киносъемки установлено, что последние частицы пылеугольного топлива сгорают на расстоянии 300—400 мм от носка фурмы [2]. Аналогичные результаты получены в Китае при вдувании в горн до 270 кг пылеугольного топлива на 1 т чугуна [38]. Применяемая в США аппаратура для определения полноты сгорания очень сложна и обеспечивает лишь качественную оценку. Большинство исследователей полнота сгорания топлива оценивалась качественно по показателям работы печи: величине коэффициента замены, изменению интенсивности плавки и состоянию горна.

Очевидно, что разработка надежного метода количественного определения полноты сгорания пылеугольного топлива является актуальной задачей, решение которой будет способствовать развитию и совершенствованию разрабатываемой технологии.

Согласно экспериментальным данным величина коэффициента замены K_3 при изменении зольности топлива от 3,5 до 40 % изменялась в интервале 0,5—1,34 [36, 38, 40, 52, 68]. Как расчетные, так и экспериментальные работы подтверждают независимость коэффициен-

та замены от расхода пылеугольного топлива и доли заменяемого им кокса.

Товаровским И.Г. был рассчитан для пылеугольного топлива из антрацита, содержащего 19 % золы, коэффициент замены, равный единице, причем по мере увеличения расхода топлива коэффициент увеличивался [65].

В Китае при вдувании топлива из антрацита с содержанием 12–14 % золы коэффициент замены составил 0,8 и существенно не изменялся при увеличении расхода топлива до 270 кг/т чугуна [38]. Однако и теоретически, и экспериментально зависимость K_3 от зольности пылеугольного топлива изучена недостаточно. Полученные на практике данные не нашли четкого объяснения: так, в США обработка результатов экспериментов, проведенных на промышленной печи, позволила получить зависимость:

$$K_3 = 1,48 - 0,66 (A_y^c / A_k^c), \quad (1)$$

где A_y^c и A_k^c – зольность пылеугольного топлива и кокса.

Согласно этой зависимости в интервале зольности пылеугольного топлива от 3 до 8 % 1 кг углерода топлива, введенный в горн за счет снижения его зольности, заменяет 5 кг углерода кокса. По другим данным, эффективность углерода пылеугольного топлива значительно ниже [40, 47, 63, 64]. Недостаточная ясность в данном принципиальном вопросе создает трудности в оценке эффективности применения пылеугольного топлива из наиболее дорогих низкозольных углей, выборе ресурсов углей для пылевдувания.

Расчеты показали, что при вдувании в горн пылеугольного топлива степень использования восстановительной способности газов улучшается прежде всего благодаря уменьшению доли кокса в шихте и соответственному увеличению времени контакта восстановительных газов с оксидами железа [36]. Соответственно изменяется и степень прямого восстановления FeO: экспериментальными данными подтверждено снижение степени прямого восстановления r_d на 1–5 % на каждые 100 кг пылеугольного топлива на тонну чугуна [25, 38].

Большинство экспериментов с вдуванием пылеугольного топлива проводили без существенного изменения параметров температурно-дутьевого режима, что не препятствовало достижению высоких показателей. Ориентировочное снижение теоретической температуры горения составило 30–200 °С [11, 38–40]. Интервал теоретической температуры горения, при котором доменные печи работали с вдуванием пылеугольного топлива, весьма значителен: так, в Китае и Стентоне он был ниже 1800 °С; в США при замене пылеугольным топливом 28,5 % кокса этот уровень составил 1900 °С; в Японии при вдувании в горн 52 кг топлива на 1 т чугуна и расходе кокса 396 кг/т чугуна

теоретическая температура горения составила 2300 °С [10, 38, 40, 41, 57].

Вопрос об оптимальном уровне теоретической температуры горения, зависимости этого показателя от технологических условий плавки является актуальным и недостаточно изученным, что препятствует расчету и освоению наиболее эффективных режимов с вдуванием пылеугольного топлива.

В качестве компенсирующих мероприятий были предложены и испытаны в промышленных условиях повышение температуры дутья и снижение его влажности, а также обогащение дутья кислородом [7, 17, 27, 52, 57].

При совместном использовании пылеугольного топлива и природного газа компенсация теплового режима горна достигалась за счет некоторого снижения расхода природного газа (0,2–0,3 м³/кг пылеугольного топлива), что способствовало сохранению на исходном уровне или повышению теоретической температуры горения [25, 26].

Как расчетные, так и экспериментальные данные подтвердили значительное увеличение эффективности вдувания пылеугольного топлива в сочетании с компенсирующими изменениями параметров дутья. Так, вдувание в горн на 1 т чугуна 250 кг пылеугольного топлива в сочетании с обогащением дутья кислородом до 29 % позволило снизить расход кокса до 263 кг/т чугуна — рекордно низкий расход при проплавке в доменной печи окисленной шихты [140].

Согласно расчетным данным изменение производительности доменных печей при вдувании пылеугольного топлива может быть как положительным, так и отрицательным. Некоторые авторы считают, что вдувание более 50 кг пылеугольного топлива на 1 т чугуна неизбежно определяет снижение производительности. Анализ имеющихся теоретических и экспериментальных данных подтвердил ухудшение газопроницаемости шихты при замене части кокса пылеугольным топливом. Сохранение производительности печи в таких условиях может быть обеспечено за счет полного сгорания пылеугольного топлива и сохранения нормального состояния горна, высокого коэффициента замены, применения компенсирующих мероприятий: повышения температуры дутья и содержания в нем кислорода и т.д.

В связи с изложенным следует отметить нерешенность вопросов комплексной компенсации нарушений технологического режима, вызываемых вдуванием в горн пылеугольного топлива и соответственным снижением расхода кокса: снижение уровня температур горения, газопроницаемости, условий сгорания пылеугольного топлива (в связи со снижением температуры и содержания кислорода в газовой фазе). Представляется крайне актуальным обоснование мероприятий, обеспечивающих комплексное восстановление оптимальных условий плавки и, таким образом, возможность значительного увеличения

Т а б л и ц а 6—7. Показатели работы доменных печей с применением пылеугольного топлива в СССР и за рубежом

Показатели	СССР, ДМЗ (опытно-промышленная плавка)	США, Кентукки, Ашленд, фирма "Армко"	Китай, фирма "Шоуду"	Японская фирма "Сан-Ниппон Сентани"	ФРГ, завод в Уганже
Объем печи, м ³	1033	2039	1200	4158	710
Количество фурм, шт.	14	24	12	38	14
Вид сырья железорудного, %:					
агломерат	69,0	18—20	95,5	85,1	Подготовленное сырье
окатыши	31,0	80—83	Нет св.	10,6	
Выход шлака, кг/т чугуна	524	348—334	640	313—317	300
Содержание кислорода в дутье, %	23,5	21,0	23,3	20,5—24,2	23,0
Расход пылеугольного топлива, кг/т чугуна	120,4	85,0	144,0	52,3	73,0
Расход кокса, кг/т чугуна:					
исходный	519	600	587	469,3	Нет св.
с вдуванием пылеугольного топлива	436,4	486	380	394,4	380
Снижение расхода кокса:					
кг/т чугуна	83	114	207	74,9	Нет св.
%	15,0	19,0	35,3	15,7	15,0
Коэффициент замены кокса пылеугольным топливом	0,87	1,34	0,90	1,21	0,85
Марка угля для приготовления пылеугольного топлива	Концентрат из тощего угля	Концентрат из тощего угля, длиннопламенный	Антрацит	Концентрат из тощего угля	Тощий длиннопламенный, жирный
Зольность пылеугольного топлива, %	10,4	3,18	13,5	6,6	7,0
Тонина помола пылеугольного топлива, мм	90 % < 0,08	80 % < 0,074	100 % < 0,05	100 % < 0,075	67 % < 0,08
Температура дутья, °С	1073	874	1090	1290	995—1017

оптимального расхода пылеугольного топлива без снижения производительности печи и качества чугуна.

На основании анализа работ [11, 37–42] и табл. 6–7 можно отметить ряд принципиальных особенностей, характерных для развития технологии плавки с применением пылеугольного топлива в последние годы и, на наш взгляд, решающим образом определившими ее высокую надежность и эффективность;

применение для приготовления пылеугольного топлива низкозольных углей (2,0–14 %);

измельчение топлива до 0,022–0,075 мм;

вдувание топлива в фурмы;

равномерная подача топлива во времени и по фурмам (неравномерность по фурмам ± 4 –10 %);

использование в качестве компенсирующих мероприятий повышения температуры дутья и содержания в нем кислорода, снижения влажности дутья;

использование пылеугольного топлива в доменных печах, работающих на подготовленном высококачественном сырье, определяющем низкий исходный расход кокса;

частичная или полная замена пылеугольным топливом мазута и природного газа.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИРОДНОГО ГАЗА И ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

2.1. Теоретический анализ особенностей технологического режима с применением природного газа и пылеугольного топлива

Принципиальным недостатком многих методических работ по оценке эффективности применения пылеугольного топлива является необоснованность принимаемых исходных условий расчета [19, 30, 42, 64]. К таким условиям относятся прежде всего сохранение на исходном уровне таких параметров, как теоретическая температура горения, выход горновых газов в единицу времени, степени использования восстановительной энергии газов.

Как показал опыт, при вдувании различных видов дополнительного топлива перечисленные показатели обычно существенно изменяются, вызывая изменение работы печи и эффективности нового

технологического режима. В настоящей главе исследовано и оценено влияние пылеугольного топлива на температурный, газодинамический и другие режимы плавки, а также предложены параметры, определяющие максимальные расход и эффективность применения топлива в конкретных технологических условиях.

Распределение температур по высоте доменной печи

На основании анализа уравнений Б.И. Китаева, основанных на завершенности теплообмена в горне, введено понятие необходимой теоретической температуры горения, при которой в новых технологических условиях обеспечивается сохранение исходной температуры продуктов плавки* [70].

Принимая, что конечная температура шихты в исходных ($t_{ш0}$) и новых ($t_{ш1}$) технологических условиях не изменяется, находим, что

$$t_1 = t_H + \frac{W_{ш1} K_0 V_0}{W_{ш0} K_1 V_1} (t_0 - t_H), \quad (2)$$

где t_H — температура газа и шихты в зоне замедленного теплообмена, °С; t_0 ; t_1 — исходная и необходимая теоретические температуры горения, °С; $W_{ш0}$; $W_{ш1}$ — водяные эквиваленты шихты, кДж/т; V_0 ; V_1 — относительный выход горновых газов, м³/т кокса; K_0 ; K_1 — расход кокса, кг/т чугуна.

При замене части кокса пылеугольным топливом можно принять, что коэффициент замены кокса углем равен 1, а выход газа из массовой единицы кокса равен выходу газа из массовой единицы угля, тогда

$$t_1 = t_H + \frac{W_{ш1}}{W_{ш0}} (t_0 - t_1). \quad (3)$$

Следовательно, в этом случае необходимая теоретическая температура горения определяется изменением теплосодержания поступающей в нижнюю зону теплообмена шихты, которое определяется изменением степени прямого восстановления оксида железа. Уравнение (2) можно выразить с учетом степени прямого восстановления:

$$t_1 = t_H + (1 - A \frac{r d_0 - r d_1}{r d_0}) (t_0 - t_1) \frac{K_0}{K_1} \frac{K_0}{V_1}, \quad (4)$$

* В дальнейшем для удобства данный термин будем называть "необходимая теоретическая температура".

где $A = (1 - \frac{0,9}{W_0}) \approx 0,7 = \text{const}$; r_{d_0}, r_{d_1} — начальное и конечное значения степени прямого восстановления.

Таким образом, при вдувании в горн пылеугольного топлива, близкого по химическому составу коксу, уровень необходимых теоретических температур определяется изменением степени прямого восстановления оксида железа. При прочих равных условиях снижение степени r_d на 1 % определяет снижение необходимой теоретической температуры горения на 15–25 °С. При вдувании тощих углей необходимая температура горения снижается на 20 °С на каждые 100 кг пылеугольного топлива, введенного на 1 т чугуна. Относительно малый темп изменения необходимой теоретической температуры объясняется значительным сокращением расхода природного газа, рассчитанным исходя из условия сохранения на исходном уровне прихода водорода на единицу шихты, снижением расхода дутья и выхода горновых газов на единицу чугуна вследствие прихода с летучими угля кислорода, заменяющего часть водорода дутья.

Снижение теоретической температуры при вдувании длиннопламенных углей меньше, чем при вдувании тощих углей или антрацитов, что объясняется повышенным выходом летучих и, следовательно, большим сокращением расхода природного газа. При благоприятных условиях плавки (снижение r_d на 2–4 % на каждые 100 кг угольной пыли на 1 т чугуна) необходимая и теоретическая температуры горения различаются незначительно. Таким образом, как и при вдувании природного газа, вдувание в горн пылеугольного топлива сопровождается снижением необходимой теоретической температуры, причем тем более значительным, чем значительнее снижение степени r_d [66, 74, 78]. Это обстоятельство определяет наличие минимальной разности между теоретической и необходимой температурами горения. Следовательно, при вдувании углей с высоким содержанием углерода дополнительная компенсация охлаждающего влияния топлива не является обязательной или может быть минимальной.

По данным ряда исследований оптимальная теоретическая температура горения при выплавке передельного чугуна в современных технологических условиях составляет 1950–2150 °С. При повышении теоретической температуры до оптимального уровня отмечается улучшение условий сгорания дополнительного топлива, стабилизация схода шихты, улучшение условий нагрева продуктов плавки.

При вдувании пылеугольного топлива полная и избыточная компенсация охлаждающего влияния добавки за счет изменения температурно-дутьевого режима так же эффективна и экономична, как и при вдувании других топлив. Оценим влияние пылеугольного топлива на высоту зон теплообмена.

Высота нижней зоны теплообмена определяется уравнением [70]:

$$H_{\text{H}} = 3 \rho \frac{C_{\text{Ш}}(1 - f)}{\alpha_{\text{в}} [(W_{\text{H}} / W_{\text{Г}}) - 1]}, \quad (5)$$

где ρ — напряжение сечения шахты, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент внешней теплоотдачи, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot \text{К})$; $C_{\text{Ш}}$ — теплоемкость 1 м^3 шахты, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; f — порозность шихты.

Зависимости, рассчитанные по уравнению, показывают, что для принятых в расчете условий доменной печи ДМЗ высота нижней зоны теплообмена изменилась незначительно.

Высота верхней зоны теплообмена

$$H_{\text{В}} = 3 \rho \frac{C_{\text{Ш}}}{\alpha_{\text{в}} [1 - (W_{\text{Ш}} / W_{\text{Г}})]}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что высота верхней зоны теплообмена зависит от величины отношения водяных эквивалентов шихты и газов. Расчеты показывают, что величина отношения $W_{\text{Ш}} / W_{\text{Г}}$ снижается при вдувании пылеугольного топлива в среднем на 5 % на каждые 100 кг угольной пыли, вдуваемой на 1 т чугуна, что определяется сокращением расхода кокса. Соответственно высота верхней зоны теплообмена сокращается на 0,20–0,25 м.

Температуру колошниковых газов можно определить по уравнению [70]:

$$t_{\text{к}} = t_0 \left(1 - \frac{W_{\text{Ш}}}{W_{\text{Г}}}\right) + \frac{W_{\text{Ш}}}{W_{\text{Г}}} \cdot \Delta t_{\text{к}}, \quad (7)$$

где $\Delta t_{\text{к}}$ — разность между температурой шихты и газов на уровне засыпи.

Расчеты, выполненные по уравнению (7), показали, что при вдувании пылеугольного топлива в количестве 100 кг на 1 т чугуна $t_{\text{к}}$ повышается на 8–15 К.

Опыт работы доменных печей с применением природного газа показал, что отмечаемое в ряде случаев повышение температуры колошниковых газов не препятствует значительному снижению расхода кокса. Это объясняется тем, что нежелательные явления повышения температуры колошниковых газов полностью компенсируются улучшением условий прохождения реакций косвенного восстановления оксида железа, определяемых увеличением протяженности зоны замедленного теплообмена и повышением температуры шихты и газов в верхней части доменной печи.

Таким образом, высота зоны замедленного теплообмена увеличивается на 0,3–0,4 м на каждые 100 кг угольной пыли, подаваемой на 1 т чугуна, прежде всего за счет сокращения высоты верхней зоны теплообмена.

В условиях ДМЗ, т.е. при работе печей с высоким исходным расходом кокса, данное изменение может способствовать некоторому улучшению использования восстановительной энергии газов в печи и соответственно снижению степени прямого восстановления железа.

Температура газов в зоне замедленного теплообмена при значительном сокращении доли кокса в шихте и сокращении его реакционной поверхности на 1 т чугуна может возрасти, что также будет способствовать повышению интенсивности реакции косвенного восстановления оксида железа и соответственно снижению $W_{ш}$.

Следовательно, при работе доменных печей в современных технологических условиях применение пылеугольного топлива в количестве до 200 кг на 1 т чугуна может быть эффективным при минимальных компенсирующих изменениях температурно-дутьевого режима, что определяется, в частности, сопутствующим снижением степени прямого восстановления оксида железа (r_d).

Повышение теоретической температуры горения, в первую очередь за счет повышения температуры дутья и сокращения его влажности, будет способствовать внесению в горн дополнительного физического тепла, улучшению условий нагрева шихты, использованию восстановительной энергии газа и, в конечном счете, повышению эффективности применения пылеугольного топлива.

В реальных технологических условиях большинства металлургических предприятий расход природного газа является основным параметром, сокращая который можно обеспечить необходимый уровень теоретической температуры горения при вдувании в горн значительного количества пылеугольного топлива.

При выполнении расчетов рациональных соотношений расхода природного газа и пылеугольного топлива (нормы компенсации) принимали, что при изменении указанных показателей расход тепла на 1 т чугуна и интенсивность плавки по выходу горновых газов сохранились на исходном уровне. Это позволило рассчитать основные показатели технологического режима [75, 76].

Выход фурменных газов

$$V_{г} = (1 + 0,01 \omega + 0,00248 \varphi) V_{д} + 2 V_{п.г} + 0,6 Q_{п} \quad (8)$$

Теоретическая температура горения

$$T = \frac{(31,42 \omega - 1,385 \varphi + C_{д} t_{д}) V_{д} - 1200 V_{п.г} - 600 Q_{п}}{V_{г} C_{г}} \quad (9)$$

где ω — содержание кислорода в дутье, %; φ — содержание влаги в дутье, г/м³; $V_{д}$ — расход дутья, м³/мин; $t_{д}$ — температура дутья, °С; $V_{п.г}$ — расход природного газа, м³/мин; $Q_{п}$ — расход пылеугольного топлива, кг/мин; $C_{д}$ — теплоемкость дутья, ккал/(м³·°С);

C_{Γ} — теплоемкость фурменных газов, ккал/(м³·°С); Q_{Γ} — приход тепла в горн доменной печи, ккал/мин.

$$Q_{\Gamma} = V_{\Gamma} T C_{\Gamma}. \quad (10)$$

Относительное изменение производительности доменной печи

$$P_1 = P_0 (Q_{\Gamma 1} / Q_{\Gamma 0}), \quad (11)$$

где $Q_{\Gamma 0}$, $Q_{\Gamma 1}$ — приход тепла в горн печи в базовом и опытном периодах, ккал/мин; P_0 — производительность печи в базовом периоде, %.

$$Q_k = \frac{C_{k1}}{C_{k0}} \frac{Q_{\Gamma 0}}{Q_{\Gamma 1}}. \quad (12)$$

где C_{k0} , C_{k1} — количество углерода кокса, сгорающего у фурм в базовом и опытном периодах, кг/ч.

Общее количество углерода кокса и пылеугольного топлива, сгорающего у фурм:

$$C_{\phi} = (0,0107 \omega + 0,000667 \varphi) V_{\text{д}} - 0,575 V_{\text{п.г}}. \quad (13)$$

Количество углерода кокса, сгорающего у фурм:

$$C_k = C_{\phi} - C_{\phi.п}, \quad (14)$$

где $C_{\phi.п}$ — количество углерода пылеугольного топлива, сгорающего у фурм, кг/мин.

Расчет норм компенсации выполнен для условий работы доменной печи полезным объемом 1033 м³ в Донбассе для диапазона изменения расхода природного газа 0–7,0 тыс. м³/ч (0–100 м³ на 1 т чугуна) и низкосоляного пылеугольного топлива из угля марки Т — 0–15 т/ч (0–200 кг/т чугуна) при неизменном значении других показателей температурного, дутьевого и шихтового режимов плавки (рис. 3).

Приведенные диапазоны изменения расхода дополнительного топлива принципиально могут быть реализованы в рассматриваемых технологических условиях плавки, характеризующихся прежде всего относительно низким (до 23–25 %) содержанием кислорода в дутье, нагревом его до 1000–1100 °С, исходным расходом кокса 550 кг/т чугуна.

Вдувание в горн пылеугольного топлива при сохранении за счет компенсирующего изменения расхода природного газа теоретической температуры горения в пределах 1950–2150 °С, соответствующем обычным условиям работы доменной печи, создает предпосылки для изменения в значительных пределах расхода кокса (104–68 %)

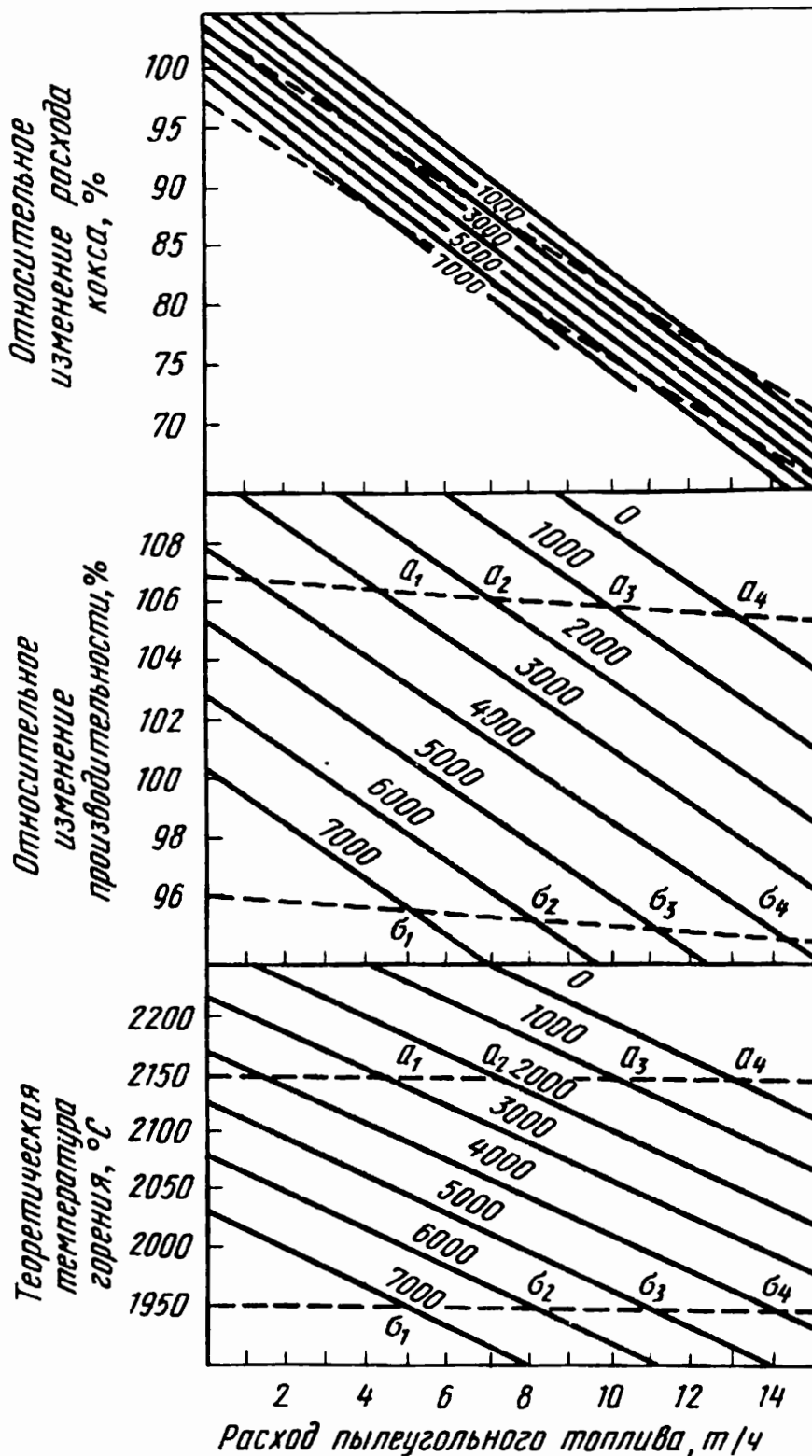


Рис. 3. Зависимость основных показателей доменной плавки от расходов природного газа и пылеугольного топлива

и производительности доменной печи (96–106 %), выбора технологического режима в соответствии с состоянием печи и необходимостью решения текущих задач (см. рис. 3).

При расходе 20–40 кг пылеугольного топлива на 1 т чугуна компенсирующее изменение расхода природного газа применять нецелесо-

сообразно из-за незначительных изменений теоретической температуры горения и других показателей.

Расчет норм компенсации проводили исходя из условий поддержания максимальной производительности печи (линия a_1a_4) или минимального расхода кокса (линия b_1b_4). Из рис. 3 видно, что первое условие может быть выполнено при нормах компенсации пылеугольного топлива природным газом от $-1,0$ до $-0,55$ м³/кг (точки a_1, a_2, a_3, a_4), что позволяет получить повышение производительности печи до 106 % и снижение расхода кокса до 93–76 %. При обеспечении минимального расхода кокса нормы компенсации уменьшаются соответственно до $0 - (-0,2)$ м³/кг (точки b_1, b_2, b_3, b_4), что обеспечивает дополнительное снижение расхода кокса (по сравнению с линией a_1a_4) на 3–8 % при снижении производительности печи до 96–95 %.

При одинаковых условиях более предпочтительными представляются технологические режимы с высокими нормами компенсации и повышенным расходом пылеугольного топлива и, следовательно, повышенными теоретическими температурами горения и производительностью печей. Конечной задачей улучшения качества пылеугольного топлива, совершенствования режима вдувания топлива и технологии доменной плавки с его применением, по-видимому, следует признать увеличение расхода пылеугольного топлива до уровня, исключающего необходимость вдувания природного газа при условии сохранения ровного схода шихты и максимально допустимого уровня теоретических температур.

В конкретных технологических условиях ДМЗ такой режим может быть осуществлен при расходе пылеугольного топлива 170 кг/т чугуна (точка a_4), обеспечивающих поддержание теоретической температуры на уровне 2150–2200 °С, снижение расхода кокса до 76 % и повышение производительности печи до 106 %. Норма компенсации пылеугольного топлива природным газом для данного варианта составляет 0,57 м³/кг.

Опробованные в 1972 и 1983 гг. на ДМЗ технологические режимы с увеличением расхода пылеугольного топлива до 100–110 кг/т чугуна характеризовались низкой степенью компенсации топлива природным газом (0,1–0,3 м³/кг). Последнее обстоятельство, на наш взгляд, и явилось одной из причин того, что указанные технологические режимы оказались неэффективными и поэтому не были внедрены.

Время горения пылеугольного топлива

Расчеты времени воспламенения и сгорания частиц тощего угля выполнены по эмпирическим уравнениям, полученным при исследовании процесса выгорания частиц из различных марок углей [77].

Результаты исследования, приведенные в работе [77], показали,

что процесс горения угольной частицы может быть разделен на четыре стадии: нагрев частиц до воспламенения летучих; горение летучих; нагрев коксового остатка до его воспламенения; горение коксового остатка.

Четырехстадийное развитие процесса горения угольных частиц имеет место в широком диапазоне размеров частиц и температуры газовой среды.

Время нагрева частиц до воспламенения летучих ($\tau_{в.л}$) в секундах возрастает линейно с увеличением размера частиц и уменьшается пропорционально температуре газовой среды в четвертой степени [77]:

$$\tau_{в.л} = 2,5 \cdot 10^{15} T_{г}^{-4} d, \quad (15)$$

где d — среднегеометрический размер частиц, м; $T_{г}$ — температура газовой среды, К.

Выгорание летучих не зависит от температуры газовой среды и описывается уравнением:

$$\tau_{г.л} = 0,45 \cdot 10^{-6} d^2. \quad (16)$$

Прогрев коксового остатка до его воспламенения наступает после окончания выгорания летучих. Температура коксового остатка в этот период возрастает со скоростью 1500–2000 К.

Длительность этой стадии описывается уравнением:

$$\tau_{п.к} = 5,36 \cdot 10^4 T_{г}^{-1,2} d^{1,5}. \quad (17)$$

Длительность завершающей стадии горения коксового остатка при различных диаметрах частиц d и температуре газовой среды описывается уравнением:

$$\tau_{г.к} = 3,09 \cdot 10^6 \frac{100 - A_{к}^{к}}{100} \frac{\rho_{к} d^2}{T_{г}^{0,9} O_2}, \quad (18)$$

где O_2 — объемная концентрация кислорода в дутье, %; $\rho_{к}$ — кажущаяся плотность коксового остатка, кг/м³

$$\rho_{к} = \rho_{уг} \frac{100 - W^P - V^P - A^P}{100}, \quad (19)$$

где $\rho_{уг}$ — кажущаяся плотность тощего угля, кг/м³; W^P — влажность рабочей массы, %; V^P — содержание летучих в рабочей массе, %

$$A_{к}^{с} = A^P \frac{100}{100 - W^P}, \quad (20)$$

где A_k^c — содержание золы в коксовом остатке, %; A^p — содержание золы в рабочей массе, %.

Из уравнения (18) следует, что время горения коксового остатка пропорционально количеству горючей массы, кажущейся плотности, квадрату диаметра частиц и обратно пропорционально температуре среды и степени обогащения дутья кислородом.

Результаты расчета времени сгорания частиц топлива размером от 0,03 до 0,5 мм при температуре газовой среды 1200–2400 К по уравнениям (15)–(20) приведены на рис. 4. Из данных рис. 4 следует, что скорость полного сгорания частицы пылеугольного топлива определяется прежде всего ее величиной, содержанием в топливе летучих, температурой газовой фазы и содержанием в ней кислорода.

Очевидно, что для ускорения процесса сгорания частиц пылеугольного топлива первые 3 стадии, занимающие 20–50 % общего времени сгорания и не вызывающие появления жидких и пластических масс, целесообразно осуществлять в сопле и фурме, т.е. до выхода потока в фурменную зону.

Выгорание коксового остатка должно завершаться в пределах фурменной зоны. Принимая во внимание завершенность первых трех фаз горения до поступления топлива в фурменные зоны, а также физические условия в этих зонах — температуру, содержание кислорода, протяженность, скорость движения газа и топлива, можно оценить максимальный размер частицы пылеугольного топлива, которая сгорит в пределах фурменных зон. Эта величина составляет 0,03–0,05 мм.

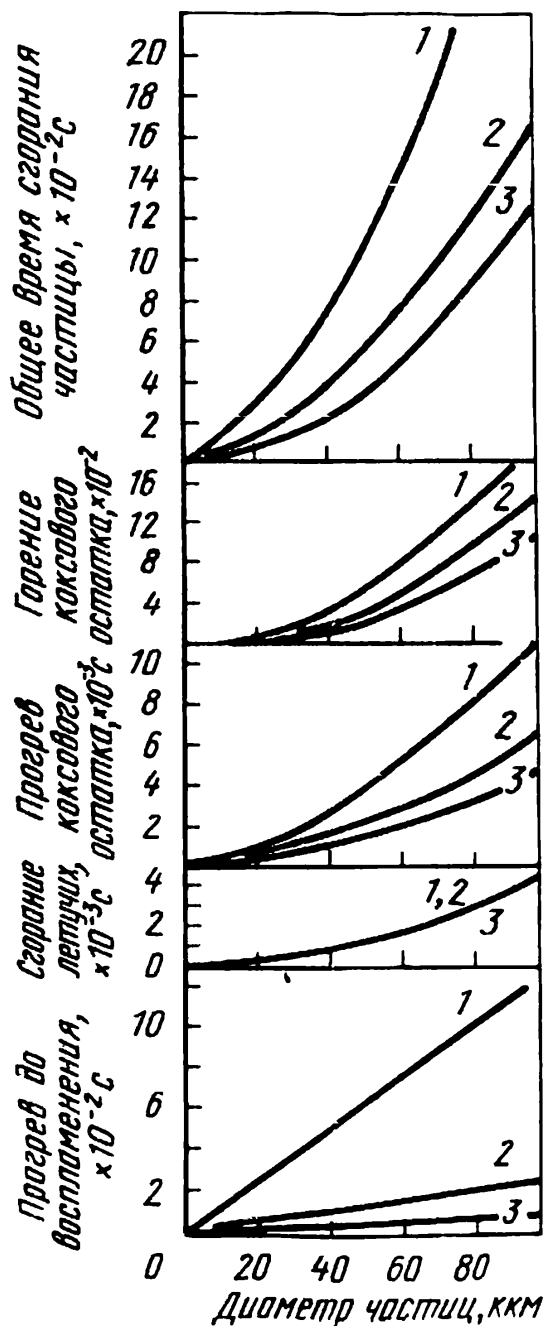


Рис. 4. Зависимость времени сгорания частицы пылеугольного топлива от ее размера и температуры газовой фазы, К: 1 — 1200; 2 — 1800; 3 — 2400

Очевидно также решающее влияние на оптимизацию и совершенствование процесса горения частиц пылеугольного топлива равномерного распределения его по фурмам, постоянства химического и фракционного состава топлива.

Значительный, вплоть до 100 %, резерв по обеспечению полной газификации пылеугольного топлива в пределах фурменных и близлежащих зон создается благодаря прямому восстановлению оксида железа углеродом пылеугольного топлива.

Для оценки вероятности столкновения частиц пылеугольного топлива с каплей шлака приняли, что через фурменные зоны проходит 50 % шлака в виде капель средним размером 5 мм. Средний поперечный размер окислительной зоны приняли равным 0,7 м, протяженность — 1,2 м, количество фурменных зон — 14, выход шлака 700 кг на тонну чугуна (с учетом содержания 30 % оксида железа). Условно все образующиеся частицы шлака распределили по поперечным слоям, толщиной 8 мм и оценили вероятность P столкновения частицы пылеугольного топлива с каплей шлака в одном слое ($P^0 = 0,022$). Вероятность P прохождения частицы угля через все слои без столкновения определили из уравнения [55]:

$$P = C_{\Pi}^0 P^0 q^{n-0} = (0,978)^{170} \approx 0,0223, \quad (21)$$

где $q = 1 - P^0$; C_{Π} — число сочетаний попадания частицы угля в каплю шлака при прохождении всех слоев.

Исследования скорости горения частиц пылеугольного топлива в фурменных зонах показывают, что уже на расстоянии 0,5–0,7 м от носка фурмы свыше 95–98 % частиц пылеугольного топлива полностью сгорают в кислороде дутья (см. раздел 3.3). Следовательно, общая (после завершения процессов горения частиц в кислороде дутья и поглощения их чугуном и шлаком) вероятность выхода несгоревших частиц пылеугольного топлива за пределы фурменных зон равна 0,004, что так же, как и поглощение 2–5 % пылеугольного топлива чугуном и шлаком, не может оказать существенного негативного влияния на технологический процесс доменной плавки.

Как показывает теоретический анализ и исследования доменных печей, прямое восстановление углеродом кокса и пылеугольного топлива значительного избытка оксида железа, содержащегося в поступающем из фурменных зон шлаке, протекает в малом объеме горна практически полностью. Это определяет во всех технологических условиях снижение содержания оксида железа и углерода в шлаке уже на уровне шлаковой летки, расположенной на 1,6 м ниже уровня фурм, до 0,5 % и ниже.

Этому способствуют высокие удельная поверхность пылеугольного топлива (100–450 м²/кг), масса, температура и степень окисленности шлака, проходящего через фурменные зоны.

Изменение использования восстановительной энергии горновыx газов и степени прямого восстановления оксида железа

Развитие реакций восстановления вюстита оксидом углерода и водородом определяет степень использования восстановительной энергии газов и развития восстановительных процессов в шахте печи, величину коэффициента прямого восстановления оксида железа, что в конечном счете определяет и эффективность процесса восстановления — относительные расходы тепла, восстановительного газа и кокса.

Для качественной оценки влияния выхода восстановительных газов на степень их использования и величину r_d были составлены материально-тепловые балансы работы печей Донецкого и Череповецкого металлургических заводов. В результате внедрения различных мероприятий расход кокса сократился от 1050 до 600 и от 750 до 440 кг/т чугуна, а выход газов-восстановителей — от 1350 до 640 м³/т чугуна (табл. 8).

В рассматриваемых условиях решающее влияние на изменение степени использования восстановительной способности газов оказало снижение выхода газов-восстановителей от 1350 до 640 м³/т чугуна. Восстановимость шихты и температура газов в шахте при отмеченных изменениях технологии плавки изменились в более узких пределах, поэтому не могли определить существенного и однозначного их влияния на степень использования газов и r_d .

Из рис. 5 следует, что при сокращении выхода газов-восстановителей от 1350 до 750—800 м³/т чугуна отмечено снижение r_d от 0,4—

Т а б л и ц а 8. Показатели работы доменных печей Череповецкого комбината и До выплавке передельного чугуна

Показатели	ЧерМК, доменная печь № 2					
	1	2	3	4	5	6
Номер точки на рис. 8	1	2	3	4	5	6
Производство, т/сут.	2029	2237	2259	2332	2310	2347
Расход кокса, кг/т чугуна	510	484	469	453	473	470
Расход агломерата и окатыши, кг/т чугуна	1716	1705	1661	1659	1609	1613
Расход известняка, кг/т чугуна	8,5	4,8	4,3	11,0	18,2	11,0
Выход шлака, кг/т чугуна	464	397	377	377	385	385
Температура дутья, °С	1042	1033	1035	1016	1016	103,2
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	56,5	85	90,4	98,5	80,1	57,6
Содержание кислорода в дутье, %	21,0	21,0	22,2	23,5	22,6	23,5
Содержание кремния в чугуне, %	0,46	0,38	0,42	0,41	0,42	0,36

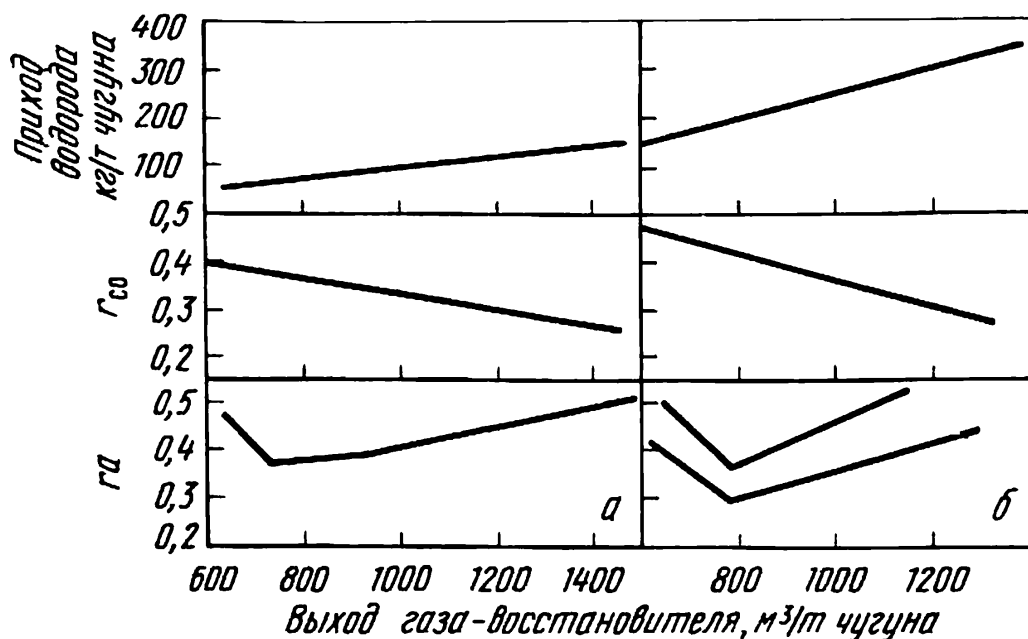


Рис. 5. Зависимость степени прямого восстановления и других показателей от выхода газов-восстановителей при работе доменных печей ЧМК (светлые точки) и ДМЗ (темные точки) на атмосферном дутье (а) и атмосферном дутье с вдуванием природного газа (б)

0,5 до 0,3–0,4. При этом степень использования оксида углерода в печи повысилась от 0,25–0,30 до 0,37–0,40. При дальнейшем снижении выхода газов-восстановителей отмечается увеличение r_d до 0,40–0,45, что можно объяснить недостатком газов-восстановителей для прохождения реакции восстановления вюстита. Величина выхода

нецкого металлургического завода в различных технологических условиях при

		ДМЗ, доменная печь № 1						ДМЗ, д.п. 2	
7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
2263	2458	1219	1290	1324	1389	1428	1493	1589	1643
456	454	816	746	690	647	649	635	595	580
1648	1607	—	—	1047	1197	967	689	1411	1612
2,3	3,8	950	831	583	479	480	476	169	164
385	331	1022	982	850	728	707	638	536	490
1002	1009	882	946	919	989	990	929	975	949
74,6	75,5	167,4	155,0	129,0	114,6	106,0	104,0	89,0	75,0
21,8	22,2	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
0,38	0,35	0,76	0,87	0,80	0,79	0,83	0,82	0,83	0,9

газов-восстановителей, обеспечивающая минимальное значение r_d , приблизительно одинакова для режимов с применением и без применения природного газа и составляет 750–800 м³/т чугуна. Расход кокса в этих режимах различался значительно и составлял 480 и 560 кг/т чугуна соответственно.

Таким образом, степень достижения равновесия газом-восстановителем для реакции косвенного восстановления оксида железа в значительной мере определяется выходом газа-восстановителя. Однако выход газа-восстановителя является лишь частным показателем, определяющим ход реакций восстановления вюстита оксидом углерода и водородом, наравне с такими показателями, как высота зоны замедленного теплообмена, интенсивность плавки, давление газов в рабочем пространстве печи, доля кокса в шихте, доля окислов железа в агломерате и др.

Обобщающим эти и другие частные показатели является универсальный показатель — время контакта газа-восстановителя с окислами железа в зоне замедленного теплообмена доменной печи*. Наравне с этим показателем равное влияние на ход восстановительного процесса могут оказывать температура газа и шихты, восстановимость окислов железа. Анализ работ по исследованию теплообмена и температурного режима в шахте печи показывает, что происшедшие за последние 20 лет изменения технологического режима не вызвали существенного изменения уровня температур в шахте доменной печи.

Таким образом, время контакта газов-восстановителей с окислами железа наиболее полно отражает влияние технологических условий на развитие восстановительных процессов в шахте печи, степень использования газов и степень прямого восстановления оксида железа.

Время контакта в секундах рассчитывали по уравнению:

$$\tau_k = \tau_{\Pi} \cdot K_I \cdot K_{II} \cdot K_{III}, \quad (22)$$

где τ_{Π} — время пребывания газов в печи, с; K_I — коэффициент, равный отношению высоты зоны замедленного теплообмена к общей высоте слоя шихты; K_{II} — коэффициент, численно равный объемной доле агломерата и других железорудных материалов в шихте; K_{III} — коэффициент, численно равный объемной доле окислов железа в объеме железорудной части шихты.

Расчет времени контакта был сделан для доменных печей Череповецкого и Донецкого металлургических заводов за период с 1957 по 1968 г. Из рис. 6 видно, что величина времени контакта в рассмотренных технологических условиях возросла в 5 раз — от 0,25

* В дальнейшем этот термин будем называть "время контакта" τ_k .

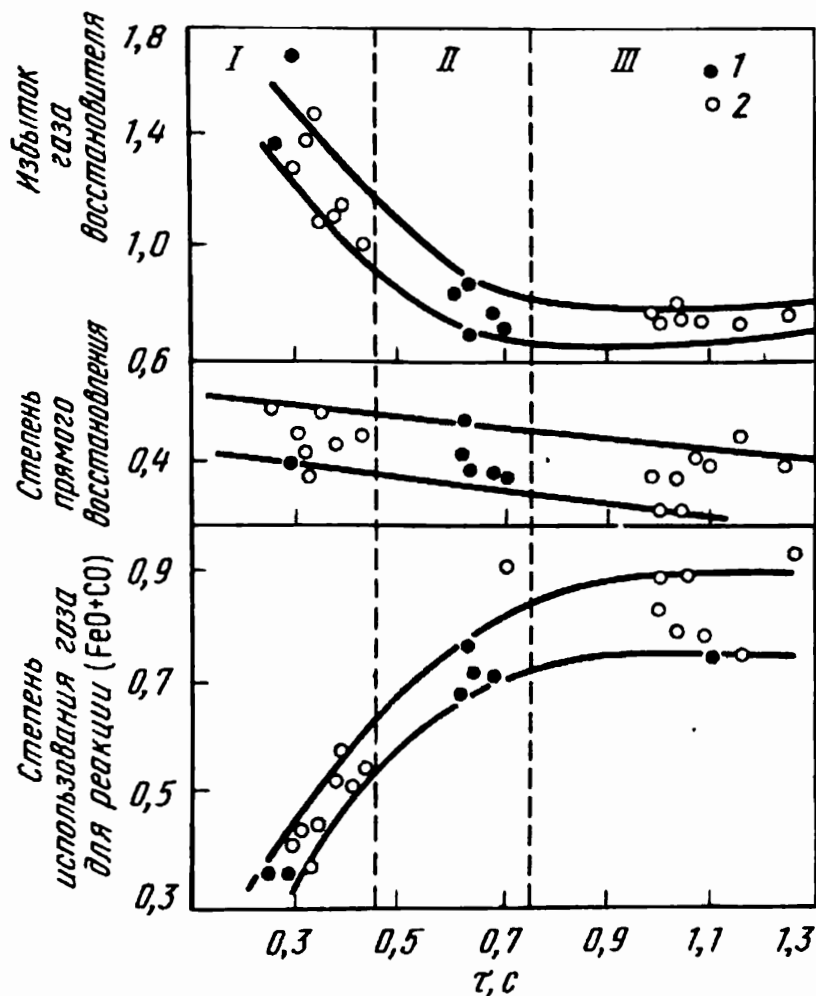


Рис. 6. Зависимость показателей доменной плавки от времени контакта газов-восстановителей с окислами железа при выплавке передельного чугуна: 1 – режим работы печи без использования природного газа; 2 – с природным газом

до 1,25 с. Одним из основных факторов, определивших это изменение, было снижение выхода газов-восстановителей на единицу шихты, выразившееся в снижении избытка газа-восстановителя для реакции восстановления вюстита оксидом углерода и водородом от 1,3–1,5 до 0,7–0,8. Наравне с этим увеличение времени контакта определено увеличением времени пребывания газа в печи и доли агломерата в шихте (табл. 8, 9).

Увеличение τ_k до 0,7 с сопровождалось увеличением относительной степени использования газа для реакции восстановления оксида железа оксидом углерода от 0,3 до 0,7–0,9. За единицу принято равновесное содержание CO_2 в горновом газе. Дальнейшее увеличение τ_k не вызывает существенного изменения степени использования газа. По-видимому, при избытке газа-восстановителя, равном 0,8–0,9, и величине времени контакта $\tau_{кр} = 0,7$ с фактический состав газа в шахте печи приближается по составу к равновесному для реакции косвенного восстановления оксида железа.

Т а б л и ц а 9. Показатели работы доменных печей Череповецкого металлургического условия (литейный чугун)

Показатели	ЧерМК, доменная печь № 1					
	1	2	3	4	5	6
Номер точки на рис. 7	1	2	3	4	5	6
Производство, т/сут . . .	1567	1594	1608	1675	1593	1574
Расход кокса, кг/т чугуна	586	565	560	530	535	593
Расход агломерата + окатыши, кг/т	1505	1449,5	1512,6	1451	1401,6	1558
Расход известняка, кг/т чугуна	—	—	—	3	—	—
Выход шлака, кг/т чугуна	415	376	384	345	317	425
Температура дутья, °С	1036	1032	1029	1031	1016	1029
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	54,7	65,9	65,0	64,9	36,96	41,0
Содержание кислорода в дутье, %	21,0	21,0	22,1	23,13	21,7	21,0
Содержание кремния в чугуне, %	2,77	2,67	2,68	2,56	2,58	2,9

Расчеты показывают, что из широко распространенных дополнительных видов топлива только вдувание высокоуглеродистого пылеугольного топлива сопровождается увеличением времени контакта τ_k благодаря сохранению или снижению выхода горновых газов и значительному снижению расхода кокса.

Особенности влияния разных видов топлива на время контакта (τ_k) дают возможность рассмотреть вопрос об оптимальном виде топлива в зависимости от технологических условий плавки.

Разделим поле (рис. 6) на участки, характеризующие определенные технологические условия работы доменных печей.

На участке I, характеризуемом высоким расходом кокса (более 900 кг/т чугуна) и избытком газов-восстановителей (выплавка ферросилиция, ферромарганца, зеркального и литейного чугунов), целесообразно применение высокоуглеродистого пылеугольного топлива с минимальным содержанием летучих.

Применение такого пылеугольного топлива обеспечит существенное увеличение времени контакта и, следовательно, значительное улучшение степени использования восстановительной энергии газов и снижение потерь тепла с колошниковым газом. Эти обстоятельства определяют получение коэффициента замены кокса углем, $\gg 1$, возможность применения угольной пыли в значительных (до 300–500 кг/т чугуна) количествах. Экономический эффект применения пылеугольного топлива в данных условиях в соответствии с известным принципом Окермана–Павлова будет максимальным по сравнению с

ДМЗ, доменная печь № 2							ДМЗ, печь № 1		
1	2	3	4	5	6	8	9	10	7
1070	1015	1028	1072	1117	1125	1173	1163	1241	1154
910	975	951	873	852	881	830	812	750	799
—	—	—	387	203	112	481	573	1070	529
902	977	1143	753	691	778	662	577	372	491
967	1073	1125	885	766	852	805	729	585	648
895	923	966	939	949	1024	955	958,5	939	929
150,3	180,8	171,2	158,2	109,6	140,6	69,0	84,0	65,0	111,0
21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
2,86	2,74	2,67	3,01	2,95	2,65	2,81	2,81	2,86	2,84

другими технологическими условиями. Применение мазута и особенно природного газа в данных технологических условиях может иметь отрицательный или при очень высокой компенсации минимальный положительный эффект.

На участке II (при выплавке литейного или передельного чугуна с расходом кокса от 900 до 600 кг/т чугуна) наибольшую эффективность может обеспечить применение пылеугольного топлива, поскольку оно обеспечит увеличение показателя $\tau_{\text{к}}$, следовательно, снижение степени r_d и получение коэффициента замены выше 1. Эффективным в данных условиях может оказаться применение газовых углей, сочетающих в себе преимущества природного газа и высокоуглеродистого пылеугольного топлива, а также высокоуглеродистого твердого топлива в сочетании с природным газом. Применение природного газа в данных технологических условиях целесообразно с полной или избыточной компенсацией охлаждающего влияния газа на температуру горна доменной печи.

При значительном отдалении фактической величины времени контакта вправо от критического значения $\tau_{\text{к,кр}}$, равного 0,7 с (участок III), наиболее целесообразно применение природного газа, мазута или угля с высоким содержанием летучих. Эти виды топлива обеспечат как значительное снижение суммарного расхода топлива, так и замену углерода кокса углеродом топлива. При этом высота резервной зоны восстановления в шахте печи сократится до минимума за

счет увеличения прихода газов-восстановителей, а величина τ_k уменьшится до критического уровня.

Таким образом, применение пылеугольного топлива расширяет возможности и повышает эффективность применения комбинированного дутья практически во всех технологических условиях. Важнейшим преимуществом применения комбинированного дутья на участке III является возможность снижения r_d до 0 за счет увеличения до оптимального уровня выхода газов-восстановителей и времени контакта τ_k , что способствует достижению максимального экономического и технологического эффекта от применения данной технологии.

Из рис. 6 видно, что увеличение времени контакта в диапазоне от 0,3 до 0,7 вызывает улучшение степени использования газа от 0,4 до 0,8, что при условии сохранения на исходном уровне выхода восстановительных газов на единицу чугуна может вызвать снижение r_d на 4 % на каждые 0,1 с времени контакта. Фактическое снижение r_d при отмеченных изменениях τ_k составляет 1 % на каждые 0,1 с времени контакта, что объясняется значительным снижением выхода газов-восстановителей. Для условий Донецкого металлургического завода применение пылеугольного топлива в количестве до 200 кг на тонну чугуна вызвало увеличение времени контакта на 0,12 с, прежде всего за счет увеличения доли агломерата в шихте на 5–10 %, увеличение высоты зоны замедленного теплообмена на 0,4–0,5 м, снижения выхода горновых газов на единицу чугуна. Отмеченное увеличение τ_k может сопровождаться снижением степени r_d на 2–4 % на каждые 100 кг пылеугольного топлива, расходуемого на 1 т чугуна, и обеспечит дополнительное снижение расхода кокса на 10–20 кг.

Дополнительное снижение расхода кокса при вдувании в горн пылеугольного топлива может быть вызвано также уменьшением непроизводительных потерь углерода.

Непроизводительные потери углерода состоят в основном из потерь кокса с продуктами плавки и колошниковой пылью. На наш взгляд, к этим потерям, прямо неконтролируемым материально-тепловым балансом, надо добавить также затраты тепла на образование цианидов, восстановление и циркуляцию щелочных металлов, образование CH_4 и т.д. Величина этих потерь составляет 25–35 кг углерода/т чугуна и прямо пропорциональна удельному расходу кокса. Как показал анализ материально-тепловых балансов, выполненных для различных технологических условий, существенное снижение расхода кокса, как правило, сопровождалось снижением затрат тепла на охлаждение печи, определенных по разности прихода и расхода тепла [78].

Материально-тепловыми балансами, выполненными с измерением потерь тепла с охлаждающей водой, показано, что фактические поте-

ри тепла оказались существенно — вдвое — меньшими, чем в случаях, когда их рассчитывали по разности. Это можно объяснить прежде всего включением во втором случае в статью "потерь" непроизводительных затрат углерода. Установлено, что в рассмотренных случаях непроизводительные потери углерода составили от 2,4 до 12,8 кг (в среднем 3—6) на каждые 100 кг расхода кокса. Снижение расхода кокса, определенное, в частности, и применением пылеугольного топлива, может сопровождаться соответственным дополнительным снижением расхода кокса.

Изменение газодинамического режима плавки и производительности доменной печи

Во многих работах изменение производительности печи при вдувании в горн дополнительного топлива рассчитывали исходя из условия сохранения на исходном уровне интенсивности плавки по выходу горновых газов. Принципиальным недостатком такого метода является то, что он не учитывает влияние на производительность печи газопроницаемости шихты, определяемой относительным расходом кокса и выходом шлака на единицу чугуна. При значительных изменениях расхода кокса влияние этих факторов на производительность печи является определяющим.

А.Н. Похвиснев и В.М. Клемперт предложили уравнения для определения насыпной массы слоя шихты в распаре и подъемной силы газового потока Δp . Взаимное уравнение действующих сил определяет предельный, критический уровень производительности:

$$\gamma_{т.ж} = (0,5 - \epsilon) \gamma_{шл} + 0,5, \quad (23)$$

где ϵ — порозность кокса в зоне плавления шихты, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\gamma_{шл}$ — удельный вес шлака, $\text{т}/\text{м}^3$; 0,5 — насыпная масса кокса, $\text{т}/\text{м}^3$.

Величина Δp в $\text{кг}/\text{м}^2$ подсчитывается по формуле:

$$\Delta p = 1,75 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \frac{3 H}{d} \frac{w^2 \gamma_{г}}{g}, \quad (24)$$

где d — диаметр куска кокса, м; g — ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; w — скорость газа, отнесенная ко всей площади поперечного сечения печи, $\text{м}/\text{с}$; H — высота слоя шихты, м. Для определения величины ϵ используются в качестве исходных величин выход шлака, удельный вес кокса и шлака, содержание углерода в коксе и др.

По уравнениям (23) и (24) выполнены расчеты применительно к условиям работы доменной печи № 3 Донецкого металлургического завода. Расчеты по описанным уравнениям показывают, что при ухудшении порозности шихты ее насыпная масса возрастает по линей-

ному закону, а увеличение подъемной силы газов — по параболической кривой. Это обуславливает пересечение двух линий при порозности кокса около $0,35 \text{ м}^3/\text{м}^3$, которая достигается при вдувании в горн 100 кг угольной пыли на 1 т чугуна. Дальнейшее снижение расхода кокса за счет вдувания угольной пыли будет сопровождаться снижением интенсивности плавки по выходу горновых газов и соответственно производительности печи.

Таким образом, из теоретического анализа следует, что при вдувании в горн до 50–100 кг угольной пыли на 1 т чугуна и при замене углем до 10–15 % кокса производительность печи может существенно не измениться, а при благоприятных технологических условиях — незначительно повыситься. Дальнейшее увеличение расхода угля, например до 200 кг на тонну чугуна, и снижение расхода кокса на 20–30 % могут сопровождаться снижением производительности печи вследствие ухудшения газопроницаемости шихты.

2.2. Особенности температурного режима горна и расчет оптимального технологического режима доменной плавки при вдувании пылеугольного топлива

Повышение температуры дутья до $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$ и обогащение его кислородом до 25–35 %, достигнутые в последние годы в передовых доменных цехах СССР, определили повышение номинального уровня (без учета влияния дополнительных топлив) теоретических температур горения до $2500\text{--}3000^\circ\text{C}$. Поэтому применение дополнительных видов топлива, вдуваемых с дутьем, создало возможность варьирования и оптимизации уровня теоретических температур в широком диапазоне.

Зависимость теоретической температуры горения от технологических условий доменной плавки

Длительное время основным условием при расчетах технологических режимов с применением комбинированного дутья было сохранение на исходном уровне теоретической температуры горения [17, 42, 57].

Указанное условие, однако, было продиктовано скорее логикой, чем теоретическими соображениями.

На практике применение мазута и природного газа часто сопровождалось снижением теоретических температур горения до уровня, допустимого условиями нагрева продуктов плавки.

Качественными посылками к выбору таких режимов были: возможность поддержания максимального расхода дополнительного топлива, уменьшение фактического объема и температурного перепада горновых газов, исключение возможности возгонки кремнезема и других материалов.

В соответствии с изложенным на многих доменных печах в СССР и за рубежом, работающих в благоприятных шихтовых условиях и с высокими расходами кислорода и дополнительного топлива, достигнуты рекордные технико-экономические показатели при уровне теоретических температур горения 1900–2100 °С [80–83].

На доменных печах, работающих в неблагоприятных сырьевых условиях, минимальный расход кокса при вдувании природного газа был получен при снижении уровня теоретических температур горения до 1700–1800 °С [94].

В то же время из теории теплообмена следует, что увеличение разности температур нагревающих газов и нагреваемого тела определяет интенсификацию теплообмена и повышение коэффициента использования тепла, что может благоприятно сказаться на использовании химической энергии газов, скорости восстановления окислов железа и, естественно, снижения потребности в тепле и коксе.

В последние 15–20 лет на ряде доменных печей в СССР и за рубежом совершенствование сырьевых и технологических условий плавки и соответственное улучшение основных показателей сопровождались повышением уровня теоретических температур горения [85–87].

Наиболее часто это наблюдается при работе печей большого объема: устойчивые технологические режимы и высокие технико-экономические показатели на таких печах были достигнуты при повышении уровня теоретических температур до 2300–2500 °С [67, 87].

Из изложенного следует, что до настоящего времени недостаточно изучено влияние технологических условий работы печей на теоретическую температуру горения, не предложено убедительных теоретических посылок для ее оптимизации, разработки и освоения технологических режимов, обеспечивающих получение максимального экономического и технологического эффекта от применения в конкретных условиях дополнительных видов топлива.

Значение необходимой теоретической температуры горения ранее было определено из уравнения (4) для теплового баланса для нижней зоны теплообмена, из которого следует, что технологические условия доменной плавки определяют уровень необходимых теоретических температур горения: снижение расхода кокса на 1 т чугуна и выхода горновых газов на единицу кокса на 1 % определяют необходимость повышения данной температуры на 20–30 и 10–15 °С соответственно, рост показателя r_d на 1 % определяет повышение температуры на 10–25 °С.

Качественное соответствие указанных закономерностей реальным условиям доменной плавки было исследовано на примере доменных печей Ждановского "Азовсталь", Череповецкого комбинатов и Донецкого металлургического завода (табл. 8–10).

Т а б л и ц а 10. Показатели работы доменных печей металлургического комбината "Азовсталь" в различных технологических условиях (передельный фосфористый чугун)

Показатели	Доменная печь № 6						Доменная печь № 5					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Номер точки на рис. 10.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Производство, т/сут	2194	2219	2215	2365	2348	2526	2440	2491	2501	2602	2644	2608
Расход кокса, кг/сут	659	704	692	656	594	536	553	546	551	531	523	511
Расход агломерата и окатышей, кг/т чугуна	1934	1844	1689	1924	2066	2053	1952	1792	1916	1975	1984	2017
Расход известняка, кг/т чугуна	280	327	426	319	22	24	5	20	10	30	4	5
Выход шлака, кг/т чугуна . . .	811,3	862	893	755	737	606	638	614	636	610	614	592
Температура дутья, °С	995	927	1020	1048	1038	1216	1218	1213	1231	1205	1303	1281
Расход природного газа, м ³ /т. .	117,7	67,3	116,7	107,0	96,2	107,2	96,4	101,2	92,6	95,2	104,0	94,8
Содержание кислорода в дутье, %	21,0	21,0	21,0	21,0	23,98	24,58	23,86	23,12	23,22	23,12	23,22	24,53
Содержание кремния в чугуне,%	0,52	0,64	0,54	0,58	0,5	0,52	0,45	0,42	0,46	0,38	0,36	0,46

Анализ показал, что снижение расхода кокса и выхода горновых газов на 1 т чугуна было обеспечено снижением потребности в угле-роде-теплоносителе: снижение выхода шлака, вывод из шихты сырого флюса, повышение температуры дутья и др. Определенные данными мероприятиями снижение выхода горновых газов от 3800 до 1700 м³/т чугуна способствовало приросту производительности печей, улучшению степени использования восстановительной способности горновых газов, повышению уровня теоретических температур горения до 2170 °С, т.е. ориентировочно на 3–5 °С на каждую единицу снижения расхода кокса (рис. 7–9).

Анализ материально-тепловых балансов для металлургического комбината "Азовсталь" показал, что снижение выхода горновых газов на 30 %, определенное сокращением расхода кокса на 21 %, способствовало увеличению степени использования восстановительной

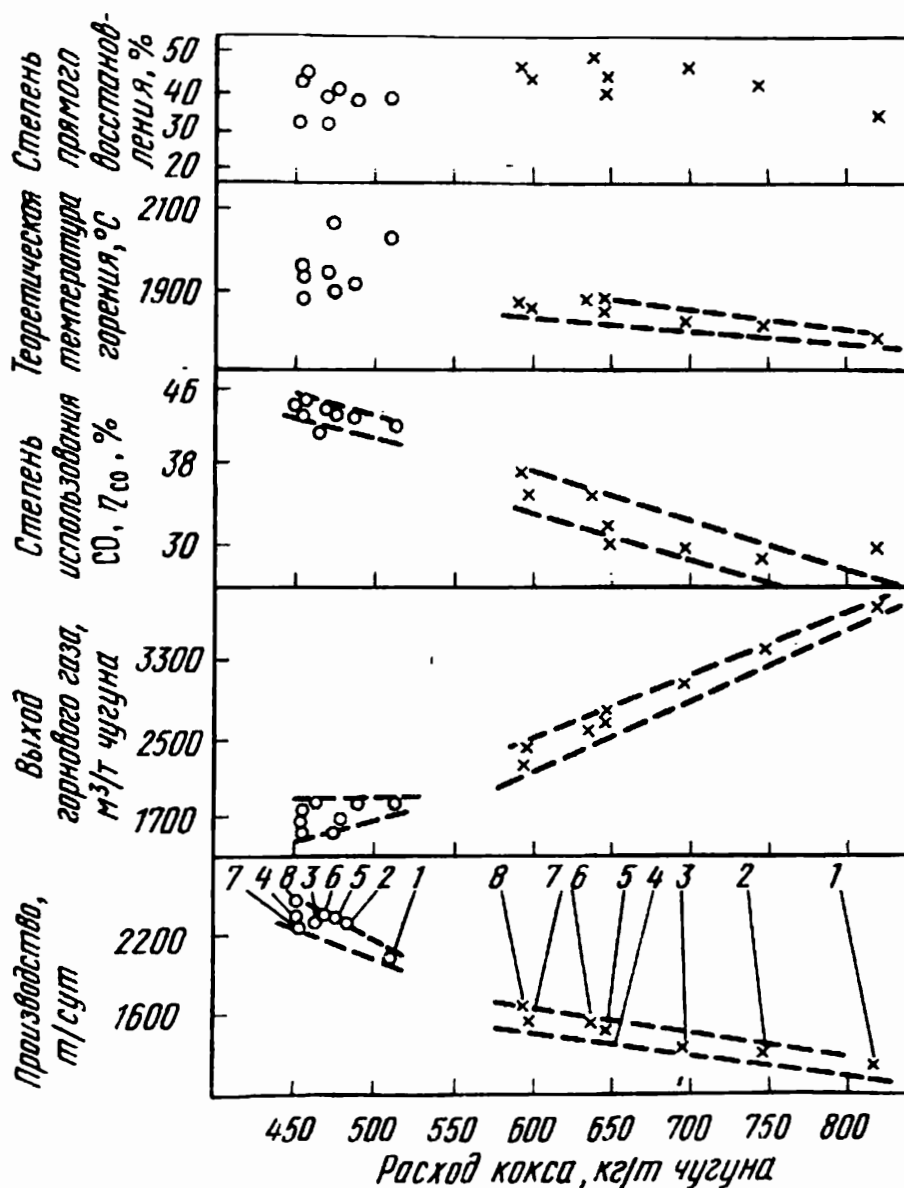


Рис. 7. Показатели работы доменных печей ЧМК (темные точки) и ДМЗ в различных технологических условиях при выплавке литейного чугуна (табл. 9)

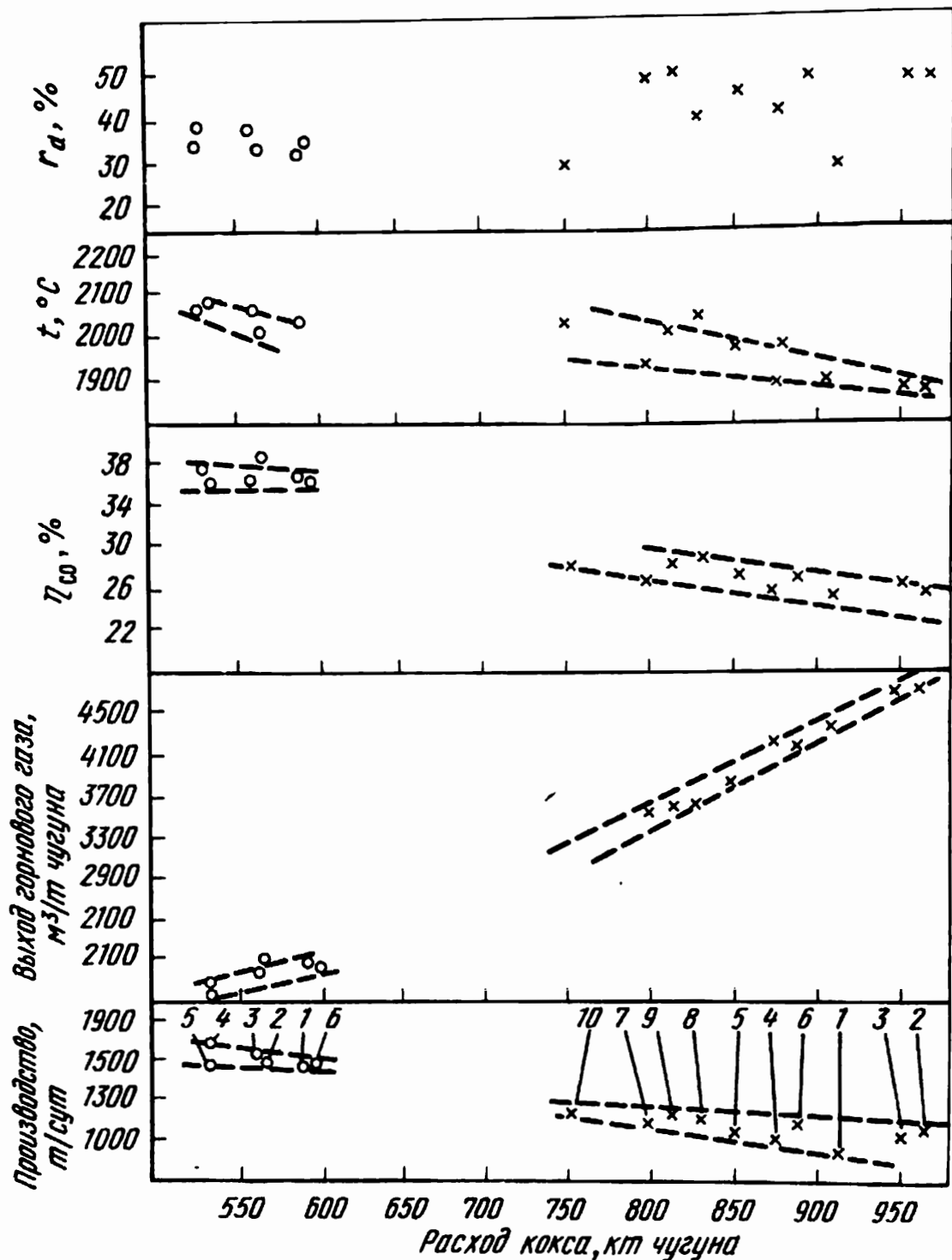


Рис. 8. Показатели работы доменных печей Череповецкого (темные точки) и Донецкого металлургических заводов в различных технологических условиях при вышлавке передельного чугуна (табл. 8)

способности газов от 31,1 до 34,9 %; коэффициента полезного действия тепла в печи от 82,3 до 88,0 % при сохранении на исходном уровне показателя r_d и интенсивности плавки по углероду и горючим газам. При этом высота нижней зоны теплообмена сократилась от 1,58 до 1,37 м, а верхней существенно не изменилась, теоретическая температура горения повысилась на 205 °C (периоды 1 и 9 табл. 10).

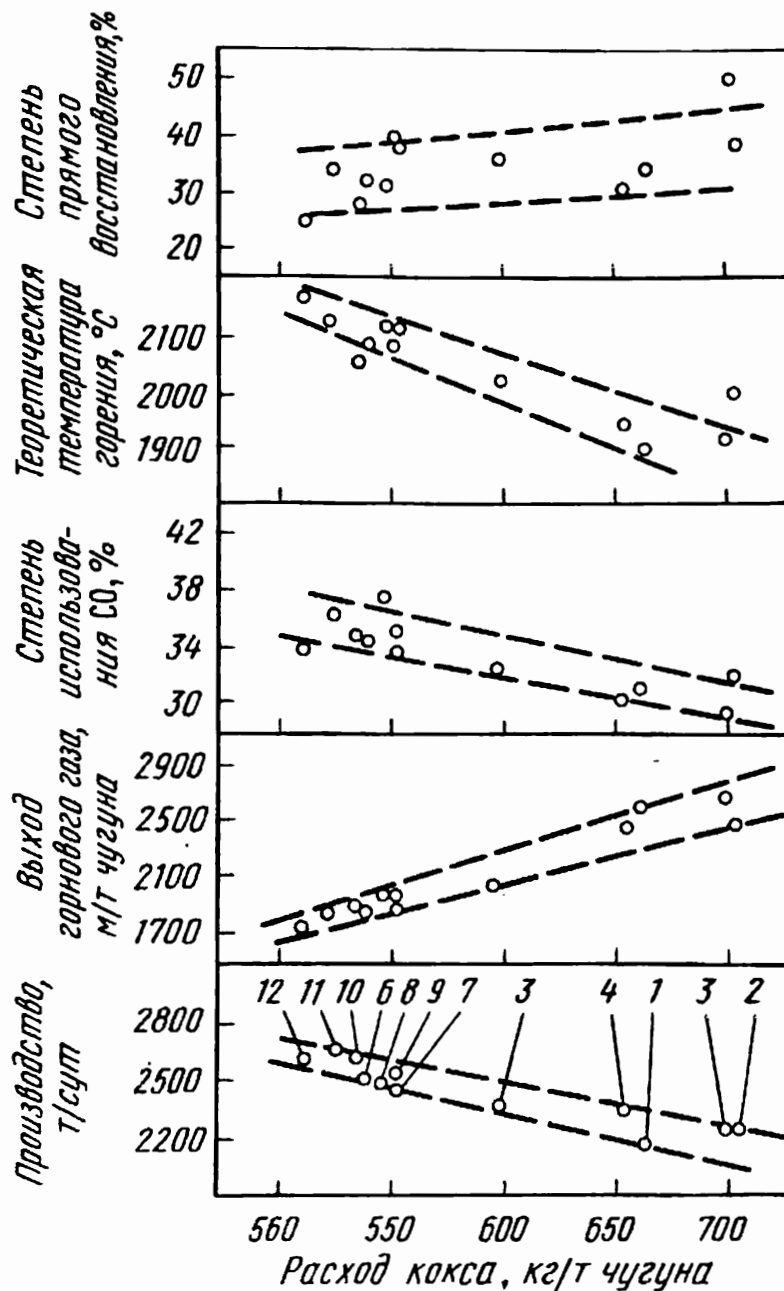


Рис. 9. Показатели работы доменных печей металлургического комбината "Азов-сталь" в различных шихтовых условиях (табл. 10)

Из зональных тепловых балансов, рассчитанных для периодов 1 и 9, следует, что сокращение общего расхода тепла от 6155376,5 до 4917411,1 кДж, т.е. на 20 % способствовало благоприятному изменению структуры потребления тепла по высоте доменной печи: относительная доля тепла, потребляемого при высоких температурах (1500°C), сократилась в 2 раза, что способствовало повышению устойчивости работы горна. Соответственно возросла относительная доля тепла, используемого в верхних горизонтах (табл. 11).

Указанные благоприятные изменения определяются прежде всего улучшением условий использования восстановительной энергии горючих газов в зоне замедленного теплообмена. Время контакта вос-

Т а б л и ц а 11. Расход тепла по зонам теплообмена в условиях комбината "Азовсталь"

Температурные зоны, °С	Расход тепла за периоды			
	кДж·10 ³	%	кДж·10 ³	%
Периоды по табл. 10	1		9	
До 900	2197,1	35,7	1810,9	36,8
900–1200	2203,4	35,8	1871,9	38,1
1200–1500	1324,5	21,5	1052,6	21,4
> 1500	4305,4	7,0	1819,4	3,7
Общий расход тепла	6155,4	100,0	4917,4	100,0

становительных газов с оксидами железа в указанной зоне в сравниваемых периодах возросло от 0,84 до 0,97 с, т.е. на 15,5 %. Указанное изменение определено уменьшением доли кокса в шихте и выхода горновых газов, сохранением на исходном уровне высоты зоны замедленного теплообмена. Таким образом, сокращение выхода горновых газов на 1 т чугуна обеспечило комплексное улучшение технологических условий плавки, что определило соответственное улучшение технико-экономических показателей.

Таким образом, уровень теоретических температур не может быть определен произвольно. Тем более он не может быть сохранен постоянным при изменении технологических условий плавки. В конкретных технологических условиях необходимый уровень теоретических температур горения определяется прежде всего выходом горновых газов, степенью завершенности теплообмена на границе промежуточной и нижней зон теплообмена.

На основании анализа уравнения (4) и рис. 7–9 можно сделать вывод о том, что сохранение или улучшение основных технологических условий плавки при применении комбинированного дутья может быть обеспечено при условии сохранения или уменьшения общего на 1 т чугуна выхода горновых газов и сохранения или повышения теоретической температуры горения [71, 72, 88].

Обоснование оптимального технологического режима и норм компенсации при вдувании в горн пылеугольного топлива

На основании вышеизложенного для каждого вида дополнительного топлива может быть определен номинальный уровень суммарного коэффициента замены ΣK_3 , при котором по мере увеличения расхода топлива не происходит увеличения выхода горновых газов,

снижения теоретической температуры горения и соответственного ухудшения технологических условий плавки¹.

Для комплексной оценки изменения технологических условий при вдувании в горн различных дополнительных видов топлива и оценки величины номинального K_3 приняли: для характеристики теплового режима горна уравнение необходимой теоретической температуры горения (4); для характеристики газодинамического режима уравнение Рамма А.Н. [89]:

$$P_I = P_0 (V_{г0} / V_{гI}) (\gamma_0 \theta_0 / \gamma_I \theta_I) (d_0 / d_I)^{0,5}, \quad (25)$$

где P_0 и P_I ; θ_0 и θ_I ; γ_0 и γ_I ; d_0 и d_I — производительность доменной печи, температура, удельный вес горновых газов, относительная газопроницаемость шихты в исходных и новых технологических условиях.

Рост фактической концентрации ($D_{\text{факт}}$) газа (CO_2) по высоте восстанавливаемого слоя железорудного материала определяли по формуле [70]:

$$D_{\text{факт}} = D_{\text{равн}} \left(1 - e^{-\frac{K_{\Sigma} F}{V} \tau} \right) \quad (26)$$

или применительно к конкретным условиям расчета

$$D_{\text{факт}} = D_{\text{равн}} \left(1 - e^{-0,63 \tau} \right), \quad (27)$$

где K_{Σ} — суммарный коэффициент скорости процесса, учитывающий химический и диффузионный факторы и представляющий собой среднюю скорость удаления кислорода через 1 см^2 наружной поверхности кусков руды, $\text{см}^3/\text{с}$; F/V — отношение реакционной поверхности 1 м^3 аппарата к коэффициенту заполнения объема; F — поверхность кусков руды в единице объема, м^2 ; $\tau = L/v_t$ — время пребывания газа в печи, с; L — длина аппарата, м; v_t — фактическая скорость движения газа, м/с.

Для расчета времени сгорания (τ_{Σ}) дополнительного топлива в фурменных зонах использовали уравнения (15)–(20) [77].

Для оценки влияния пылеугольного топлива и комплекса компенсирующих мероприятий на параметры доменной плавки рассчитывали технологические режимы, исходным для которых был реальный режим с расходом кокса 558 кг/т чугуна [25]. В качестве компенсирующих мероприятий принимали изменение зольности пылеугольно-

¹ K_3 определяли делением снижения расхода кокса, полученного за счет вдувания пылеугольного топлива и осуществления компенсирующих мероприятий, на расход пылеугольного топлива.

го топлива, температуры дутья, выхода шлака и расхода сырого флюса на 1 т чугуна.

Расчет выполняли для фиксированных значений суммарного коэффициента замены ΣK_3 в интервале 0,6—2,3.

Из анализа уравнения (27) и рис. 10; а также результатов опытных и промышленных плавов, проведенных в нашей стране и за рубежом, следует, что при величине $K_3 > 1,0 \div 1,2$ вдувание пылеугольного топлива обуславливает улучшение комплекса технологических условий плавки, определяющих по мере увеличения расхода топлива рост производительности, повышение степени использования восстановительной энергии горновых газов, сокращение времени сгорания дополнительного топлива при повышении уровня необходимых теоретических температур горения. Теоретически при величине $K_3 = 1,0 \div 1,2$ и более по мере увеличения расхода топлива не происходит негативных изменений в состоянии технологического режима, которые ограничивали бы эффективность применения пылеугольного топлива и величину его оптимального расхода.

Из вышеизложенного следует, что при высоких расходах дополнительного топлива, компенсирующими их негативное влияние на технологию, могут быть те мероприятия, которые обеспечивают увеличение суммарного коэффициента замены до номинального уровня. Таким образом, наравне с повышением температуры дутья и снижением его влажности компенсирующими мероприятиями могут быть вывод из шихты известняка, снижение выхода шлака, частичная металлизация шихты и т.д.

Можно отметить, что совершенствование технологических условий плавки, сопровождаемое снижением расхода кокса и выхода горновых газов, создает предпосылки для увеличения оптимального расхода дополнительного топлива и повышения эффективности его применения.

Величина номинального ΣK_3 может быть понижена за счет снижения расхода природного газа или обогащения дутья кислородом.

Первое мероприятие желательно применять в ограниченных масштабах и в последнюю очередь, поскольку оно повышает расход кокса, снижает величину ΣK_3 и эффективность новой технологии.

Компенсация за счет обогащения дутья кислородом при прочих равных условиях также связана со снижением прихода тепла и определяет повышение расхода кокса в меньшей степени, чем сокращение расхода природного газа.

Из рассмотренных трех видов дополнительного топлива наиболее перспективным представляется пылеугольное благодаря минимальной разности фактически получаемого (0,5—1,4) и номинального (1,0) значения K_3 [17, 57].

Решающее влияние на эффективность применения пылеугольного

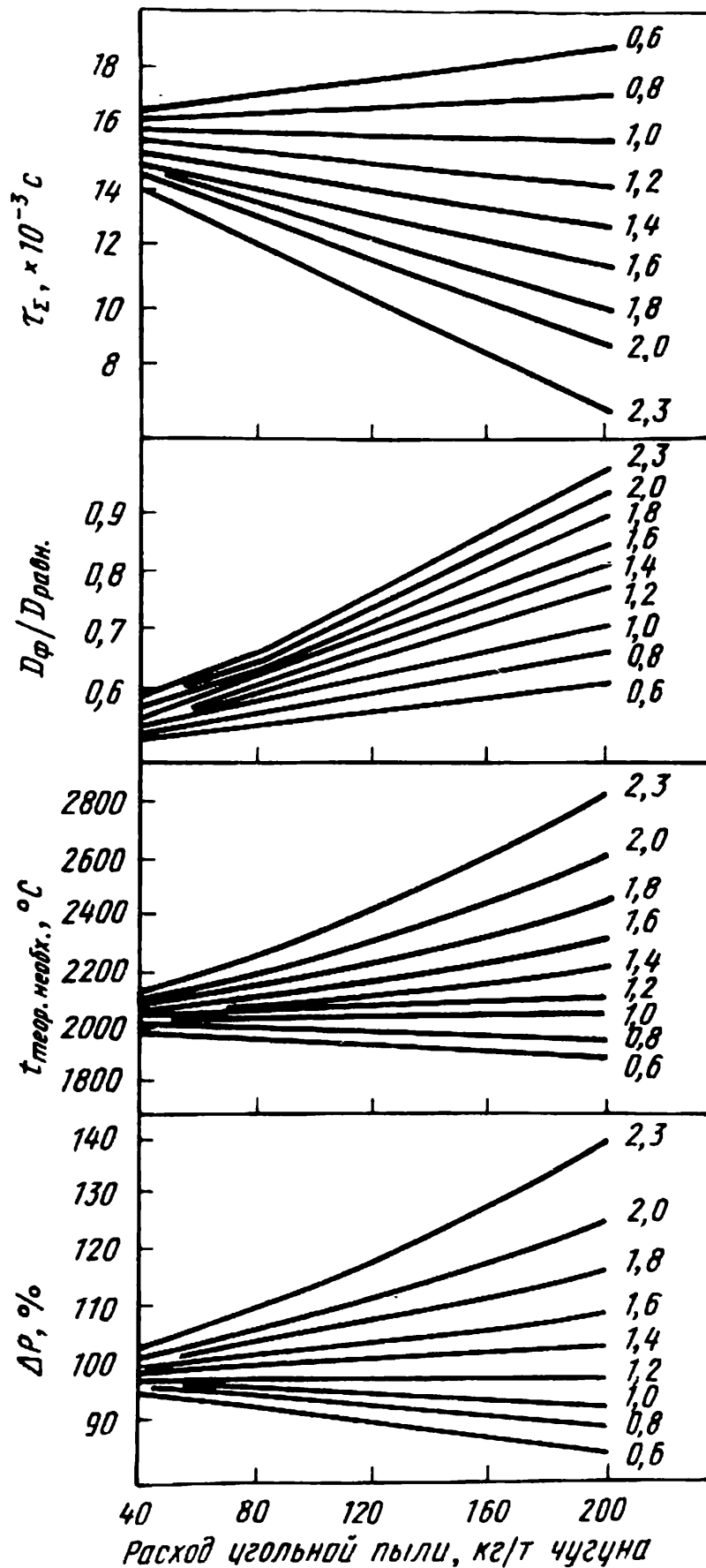


Рис. 10. Зависимость основных технологических показателей плавки от расхода пылеугольного топлива (цифры у кривых — ΣK_3 — суммарный коэффициент замены)

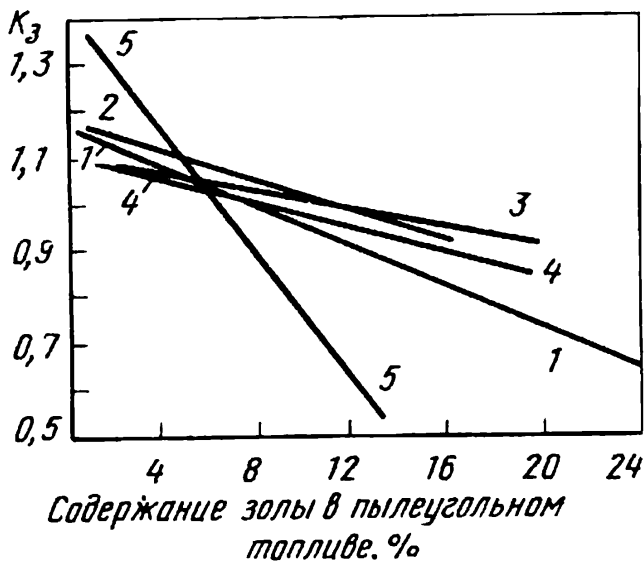


Рис. 11. Зависимость коэффициента замены (K_3) от зольности пылеугольного топлива:
 1 — экспериментальные данные [11, 38, 40, 51, 52]; 2 — расчет по методике, описанной в источнике [78]; 3 — расчет по балансу углерода; 4 — расчет по методике проф. Рамма А.Н. [89]; 5 — расчет по методике [11]

топлива в доменной плавке оказывает зольность используемых углей (рис. 11).

На основании анализа работы доменных печей было принято, что общий уровень потребности тепла и расхода кокса в основном определяют потребностью в высокотемпературном тепле, расходуемом в нижней зоне теплообмена на перегрев чугуна и шлака, восстановление оксида железа углеродом и т.д. Поскольку шлак, получаемый из золы пылеугольного топлива, нагревается до температуры продуктов плавки на выпуске только за счет высокотемпературного тепла, то отношение количества тепла, необходимого для перегрева единицы шлака, вводимого через фурмы, к количеству тепла, необходимому для перегрева такого же шлака при загрузке его через засыпной аппарат $Q_{\text{общ}}$, составит:

$$n = (Q_{\text{общ}}/q_{\text{в.т}}) - (q_{\text{в.т}}/Q_{\text{общ}}), \quad (28)$$

где $q_{\text{в.т}}$ — доля от $Q_{\text{общ}}$, приходящаяся на высокотемпературное тепло.

Вывод из состава пылеугольного топлива 1 кг шлака может обеспечить в зависимости от величины $q_{\text{в.т}}$, количества и вида вводимого для ошлакования флюса снижение расхода кокса на 0,5—1,0 кг. Введение в горн вместо 1 кг шлака 1 кг углерода в составе пылеугольного топлива позволит дополнительно снизить расход кокса на величину

$$\Delta Q_{\text{к}} = (1/C_{\text{ф}} C_{\text{к}}) K, \quad (29)$$

где K — коэффициент, учитывающий влияние на расход кокса разности температур кокса и пылеугольного топлива при их поступлении в нижнюю зону теплообмена; $C_{\text{ф}}$ — доля углерода кокса, сгорающего на фурмах; $C_{\text{к}}$ — доля углерода в коксе.

В условиях Донецкого металлургического завода ввод в горн дополнительно 1 кг углерода за счет снижения зольности пылеугольного топлива может обеспечить снижение расхода кокса на 2,0–2,5 кг.

Промышленный опыт работы печей на пылеугольном топливе зольностью до 2,8–6,8 % показывает, что при изменении технологических условий величина указанного снижения расхода кокса может возрасти до 3–5 кг/кг. Дополнительное снижение потребности в тепле и коксе, определяемое использованием менее зольного топлива, как правило, сопровождается снижением выхода горновых газов и соответственным приростом производительности печи.

Расчетным путем и промышленными экспериментами было установлено, что при снижении зольности пылеугольного топлива до 70–80 % от зольности применяемого кокса величина K_3 может приближаться или превышать номинальный уровень, обеспечивающий сохранение или улучшение технологических условий и величины K_3 по мере увеличения расхода топлива.

Указанные особенности низкозольного пылеугольного топлива предопределили перспективность и эффективность его использования при работе доменных печей на комбинированном дутье высоких параметров.

Расчеты показали, что при любом исходном содержании кислорода в дутье, расходах природного газа и кокса вдувание низкозольного пылеугольного топлива совместно с некоторым снижением расхода природного газа (на 0,1–0,3 м³/кг) может обеспечить получение технологических режимов, отвечающих основным требованиям по выходу горновых газов и уровню теоретических температур горения.

Все это подтвердилось последним промышленным опытом применения пылеугольного топлива в США и Японии: вдувание в горн малозольного ($A^c = 3,5 \div 6,8$ %) пылеугольного топлива позволило при расходе его 52–70 кг/т чугуна получить $K_3 = 1,2 \div 1,33$, прирост производительности на 5–10 % при улучшении качества чугуна. При этом сопутствующие изменения технологического режима были минимальными [40, 41, 45, 46].

Расчет эффективности технологических режимов доменной плавки с применением пылеугольного топлива и топливно-флюсовых смесей

Теоретическую оценку эффективности применения пылеугольного топлива и топливных смесей осуществляли с использованием математической модели доменного процесса, представляющей систему уравнений, описывающих балансовые условия плавки и основные тепло- и массообменные, газодинамические и механические явления в доменной печи.

Балансовые уравнения были составлены с использованием комп-

лексного метода расчета показателей доменной плавки проф. А.Н. Рамма [89]. Уравнение массообмена разработано на основе физической модели конвективного массопереноса, предложенной проф. Д.Б. Сполдингом, а уравнение, описывающее газодинамические явления, составлено на основании теории акад. Н.М. Жаворонкова для расчета аэродинамического сопротивления орошаемых насадок [90, 91]. Совместное решение системы уравнений позволило рассчитывать наравне с производительностью печи и расходом кокса степень прямого восстановления оксида железа и степень использования восстановительной способности газов η_{CO} и η_{H_2} .

Уравнение массообмена было преобразовано в виде:

$$r_d = \frac{O_d \text{FeO}}{O_{\text{FeO}}} = \frac{O_d \text{FeO}}{0,2865 \text{Fe}_0} = \frac{O_R - O_3}{0,2865 \text{Fe}_0} - \frac{O_R}{0,2865 \text{Fe}_0} \cdot \frac{K_m \cdot B}{\rho_0} \left(K_e + \frac{6}{d_e \rho_m K_f} \right) \tau, \quad (30)$$

где K_m — константа массообмена, кг/(м²·с); K_e — пористость восстанавливаемого материала, м²/кг; d_e — средний диаметр частиц, м; ρ — плотность; K_f — коэффициент формы восстанавливаемого материала; τ — время пребывания, с; B — химический потенциал восстановительного газа.

$$B = \frac{(1 - c_{\text{Be}}) \left[1 - \frac{\eta_{\text{CO}}(1 + \epsilon)}{4} \right]}{c_{\text{Be}} + r (\rho_d / \rho_0)}, \quad (31)$$

где c_{Be} — концентрация восстановителей в газе, равновесная с FeO при температуре зоны замедленного теплообмена; r — стехиометрическое соотношение восстановителей в реакции с оксидом железа ($\text{FeO} + B = \text{Fe} + \text{BO}$); ρ_m ; ρ_d ; ρ_0 — плотность соответственно железорудных материалов, газа и восстановителя (средние), кг/м³; τ — время пребывания железорудных материалов в потоке газостановителей, с; η_{CO} — степень использования оксида углерода в доменной печи.

Отношение степеней использования определяли из уравнения:

$$\epsilon = \frac{\eta_{\text{H}_2}}{\eta_{\text{CO}}} = \frac{1}{\eta_{\text{CO}}(1 - K_p) + K_p}. \quad (32)$$

Константа равновесия K_p реакций водяного пара $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ находилась из зависимости ее от температуры:

$$\begin{aligned}
 -\ln K_p R = & -\frac{9934}{T} + 8,41 + 0,515 \ln T - \frac{6,233 \cdot 10^{-3}}{2} T + \\
 & + \frac{3,151 \cdot 10^{-6}}{6} T^2.
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

Температуру в зоне замедленного теплообмена определяли из уравнения Б.И. Китаева для верхней зоны теплообмена.

Для решения указанной системы уравнений была разработана и освоена программа для ЭЦВМ ЕС-1033.

Сопоставление расчетных и экспериментальных показателей на доменных печах ДМЗ при вдувании пылеугольного топлива показало их хорошую сходимость.

Расчеты с применением указанной методики подтвердили высокую технологическую и экономическую эффективность применения пылеугольного топлива из низкосольных углей (рис. 12).

При работе на атмосферном дутье с применением природного газа использование низкосольного (ниже 5–10 %) пылеугольного топлива в количестве 100 кг на 1 т чугуна сопровождалось приростом степени использования восстановительной энергии газов (η_{CO}) на 4,8–13,5 %, снижением степени прямого восстановления оксида железа на 0,3–2,0 %, приростом производительности печи, снижением расхода условного топлива на 0,5–30 кг/т чугуна, или 0,1–4,7 %.

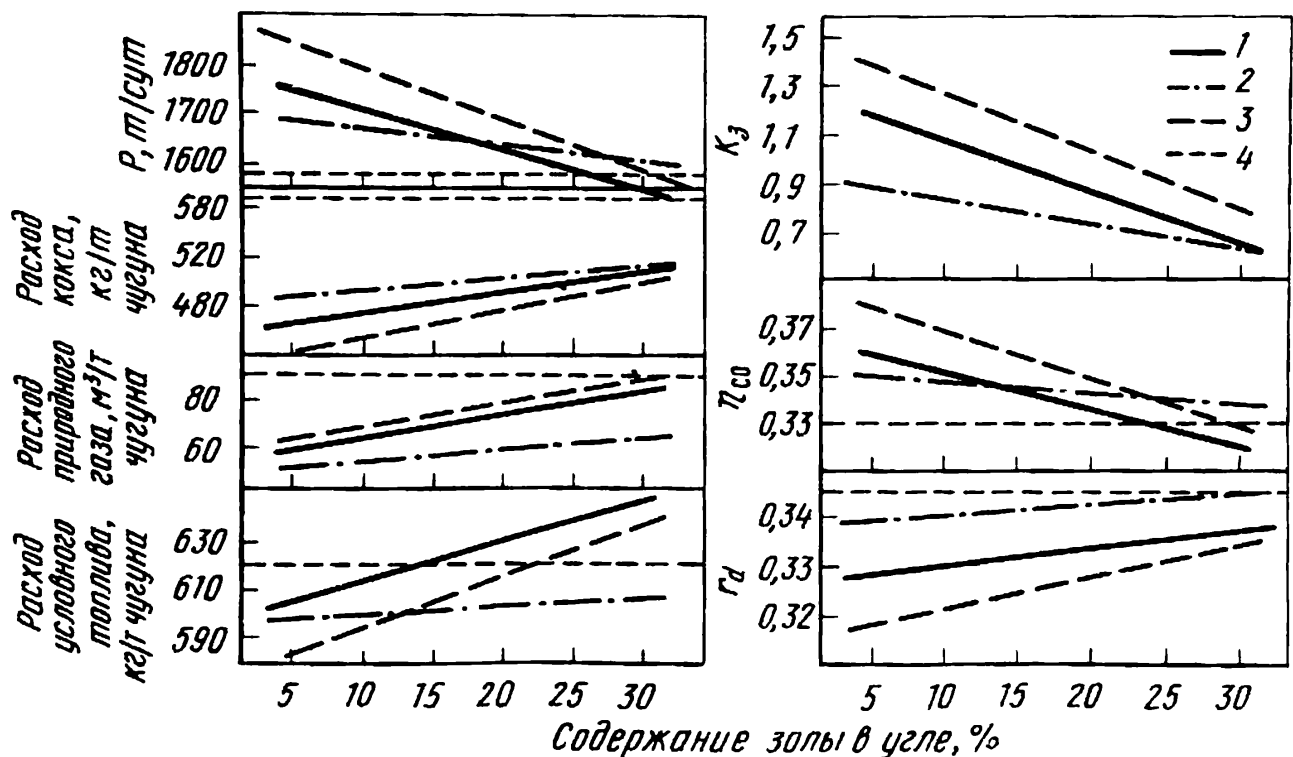


Рис. 12. Показатели эффективности вдувания в горн 100 кг пылеугольного топлива на 1 т чугуна, приготовленного из разных углей:

1 – тощие; 2 – газовые; 3 – антрацит; 4 – величина показателя при работе доменной печи без пылеугольного топлива

В условиях работы доменных печей с применением природного газа наиболее эффективным оказалось применение пылеугольного топлива с минимальным содержанием летучих.

Вдувание 100 кг на 1 т чугуна пылеугольного топлива зольностью 7,5 % из углей марок Г и Т при условии его полного сгорания в фурменных зонах сопровождалось снижением расхода кокса на 87 и 111 кг, приростом производительности печи на 7,1 и 10,7 %, снижением расхода природного газа на 38 и 29 м³/т чугуна и расхода условного топлива на 21,5 и 10,0 кг/т чугуна соответственно. Характерно, что по мере снижения зольности указанное различие в эффективности пылеугольного топлива из углей марок Г и Т возрастало прежде всего за счет повышения эффективности углей с низким содержанием летучих.

При работе доменных печей на комбинированном дутье высоких параметров эффективность применения пылеугольного топлива может существенно возрасти. Это предопределяется возможностью значительного повышения оптимального расхода пылеугольного топлива на 1 т чугуна вследствие качественного улучшения условий его сгорания в фурменных зонах.

Сказанное подтвердилось расчетами, выполненными по известной методике Рамма А.Н.

Из рис. 13 следует, что при работе доменной печи на дутье, обогащенном кислородом до 30 %, возможно вдувание на 1 т чугуна до 200 кг низкозольного пылеугольного топлива из угля марки Т, что при сохранении на исходном уровне производительности печи может обеспечить снижение расхода кокса на 24,7 %, природного газа на 100 м³ и приведенных затрат на 1 т чугуна на 0,4 руб.

Применение в указанных технологических условиях топливных смесей в количестве на 1 т чугуна 200 кг, способствующих более интенсивному снижению теоретической температуры горения, может обеспечить условия для полного исключения подачи природного газа.

Принципиальная возможность указанных высокоэффективных технологических режимов доказана как теоретически, так и на опытно-промышленных плавках [38, 140].

Расчеты показали, что наиболее эффективным оказалось вдувание в горн вместе с пылеугольным топливом извести, сопровождавшееся соответственным снижением расхода сырого известняка. Увеличение в смеси других негорючих добавок, кроме извести, сопровождалось снижением производительности печи, повышением расхода кокса (в основном за счет уменьшения расхода пылеугольного топлива), некоторым приростом степени прямого восстановления оксида железа (см. рис. 13). Неблагоприятное влияние негорючих добавок на показатели доменной плавки можно объяснить повышением потребности в высокотемпературном тепле.

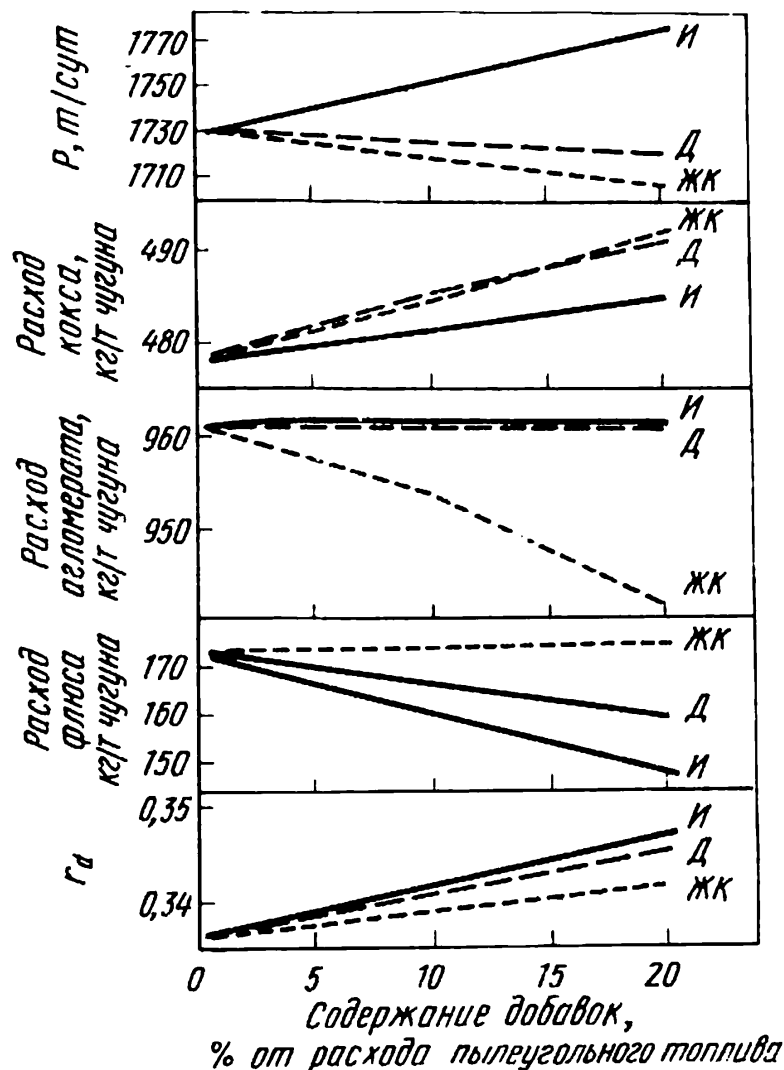


Рис. 13. Влияние замены части пылеугольного топлива негорючими материалами на показатели доменной плавки. Расход топливной смеси 100 кг/т чугуна: И – известь; Д – доломит; ЖК – железорудный концентрат

Указанным расчетом не может быть, однако, учтено возможное и значительное благоприятное влияние введенных в горн негорючих добавок на вязкость и устойчивость первичных шлаков, газопроницаемость зоны пластических материалов и распределение газового потока, скорость горения пылеугольного топлива и десульфурацию чугуна.

В связи с изложенным был сделан вывод о целесообразности введения в пылеугольное топливо относительно малой доли негорючих добавок (1–30 % от массы пылеугольного топлива), эффективность которых должна быть комплексной и значительной, перекрывающей их негативное влияние на тепловой режим доменной печи.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ ВДУВАНИИ В ГОРН ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА И ПРИРОДНОГО ГАЗА

3.1. Разработка и совершенствование методики исследования теплового режима доменной плавки

В результате изучения имеющегося опыта, применения новых огнеупорных и термоэлектродных материалов, испытания различных конструкций термопар была повышена надежность и точность измерения температуры горна и продуктов плавки на выпуске, разработаны и внедрены оригинальные методики комплексного исследования горна с отбором проб материалов и газов, определения фракционного состава и полноты сгорания пылеугольного топлива.

Исследование работы горна доменной печи

Для комплексного исследования работы горна необходимо проводить измерение целого ряда параметров: давления, температуры и химического состава горнового газа, чугуна, шлака и кокса на уровне фурм и т.д.

Применяемые для исследования горна водоохлаждаемые устройства из трех концентрически расположенных труб позволяли определять в одном опыте только один параметр [73, 92–94].

Для комплексного исследования работы горна была предложена следующая конструкция водоохлаждаемой трубы: в разделительную трубу (рис. 14) вваривались две (можно 3 или 4) трубки, одну из которых использовали для измерения температуры в горне, вторую (другие) — для измерения других параметров. Подбором диаметров наружной 6, разделительной 5 и внутренних трубок 3, 4 можно было добиться достаточной площади и приблизительного равенства напорного и исходящего сечений, т.е. нормальных условий охлаждения исследовательской трубы.

Поскольку трубки 3 и 4 разделяли на две части полость для отвода воды, подвод и отвод воды для охлаждения необходимо было осуществлять двумя (или тремя) патрубками 2, расположенными перпендикулярно плоскости этих трубок.

Испытания трубы описанной конструкции успешно проведены на доменной печи объемом 2000 м³ Ждановского металлургического комбината им. Ильича. С помощью трубы с двумя каналами для исследования в течение 40 мин опыта была измерена температура и отобраны пробы газа в 8 местах восстановительной зоны горна, причем крайняя из исследованных точек находилась на расстоянии

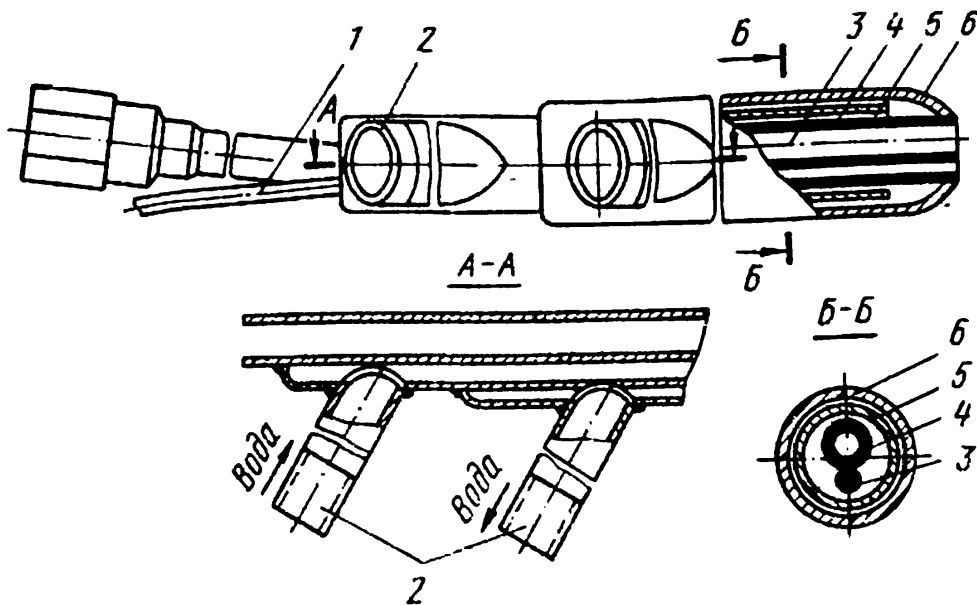


Рис. 14. Устройство для комплексного исследования горна доменной печи:
 1, 3 – труба для отбора проб газа; 2 – штуцера подвода и отвода воды; 4 – труба для измерения температуры в горне; 5 – труба разделительная; 6 – труба наружная

4,3 м от носка фурмы. На протяжении опыта температура охлаждающей воды не превышала 35–40 °С при давлении 0,7–0,8 МН/м².

На доменной печи № 3 Донецкого металлургического завода в течение 5 месяцев проводили комплексные исследования работы горна трубой аналогичной конструкции на расстоянии от 0 до 3,2 м от носка фурмы при давлении охлаждающей воды 0,45–0,55 МН/м². Температура отходящей воды не превышала 50–70 °С [73, 94].

Для измерения температуры в горне использовали термопару погружения следующей конструкции (рис. 15): стальной штуцер 7 чехла термопары и молибденовый наконечник 13 имеют одинаковую резьбу, на которую одевается втулка 8. После фиксирования места

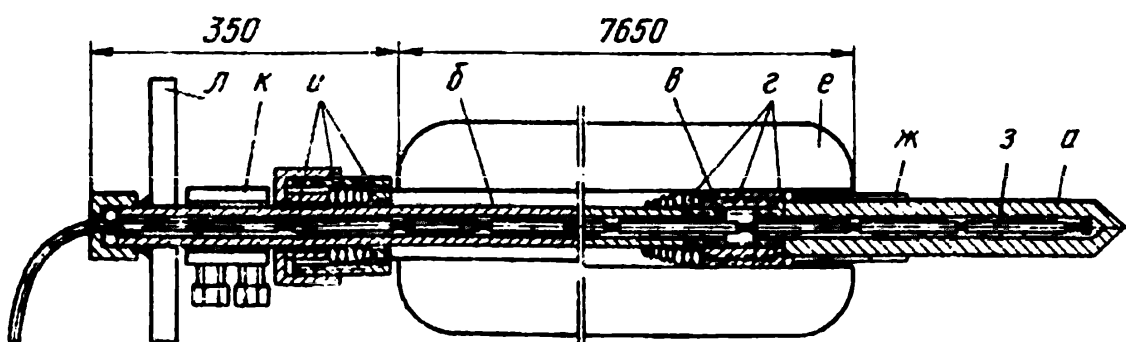


Рис. 15. Термопара для измерения температуры в горне доменной печи:
 е – водоохлаждаемая труба; ж – графитовая втулка; з – изоляционная соломка (глиноземистая); и – сальник; к – фиксатор высота наконечника; л – ручка (остальные обозначения в тексте)

спая на него надевают молибденовый наконечник 13, после чего штуцер и наконечник соединяют втулкой 8 [94].

Для предотвращения продувов газа между чехлом термопары и трубой, а также приваривания наконечника к трубе поверхности штуцера и втулки обматывают шнуровым асбестом 9, а на молибденовый наконечник надевают графитовую втулку 11. Наконечник фиксировали втулкой 4, расположенной на холодном конце чехла термопары.

Для защиты спая термопары провели испытания наконечников из различных огнеупорных материалов.

Наиболее положительные результаты получены при испытании молибденовых и толстостенных ($\delta = 2\div 3$ мм) кварцевых наконечников. Время прогрева спая, защищенного этими наконечниками, до температуры горна составляло 40–60 с. Наконечники из молибдена и кварца не разрушались в окислительной зоне в течение 6–8 мин, пока проводили измерения температуры в 3–5 точках.

В условиях комбината "Азовсталь" (при обогащении дутья кислородом до 22–28 % и температуре в фокусе горения 1900–2100 °С) стойкость молибденовых наконечников снижалась до 2–3 мин.

Можно предположить, что горение материала защитного наконечника (графита, молибдена) само по себе служит источником ошибок при измерении температуры, поскольку сопровождается выделением тепла.

Для проверки этого предположения были проведены контрольные измерения температуры в окислительной зоне термопары, армированными окисляющимися (молибденовыми) и неокисляющимися (кварцевыми) наконечниками. Обе термопары вводили в горн в одной исследовательской трубе и выдвигали для измерения температуры последовательно (после сгорания первого наконечника).

Результаты контрольных измерений показали, что использование молибденовых наконечников вместо кварцевых не вызывает существенной ошибки при измерении температуры окислительной зоны.

Молибден является наиболее подходящим материалом для защиты спая термопары при измерении температур в горне, поскольку имеет высокие прочность, тугоплавкость, теплопроводность и относительно легко обрабатывается.

В качестве чувствительных элементов при измерении температуры в горне использовали вольфрам-ренийевые и вольфрам-молибденовые электроды, а в качестве изоляционного материала для армировки горячего спая термопары — тонкую (2,5–3,5 мм) двухканальную соломку из глинозема, диоксида циркония и оксида магния.

При измерении температуры горна опыт проводили в следующем порядке: первоначально трубу выводили за пределы окислительной зоны ($> 1,1\text{--}1,3$ м от носка фурмы) до точки, намеченной для из-

мерения температуры. После достижения этой отметки трубу в течение 5—10 с отводили назад на 0,05—0,10 м и в образовавшийся в коксе канал выдвигали наконечник термопары.

Отсчет начинали после установления постоянной температуры. После снятия показания термопару помещали в трубу, которую подавали лебедкой вперед до следующей точки, подлежащей исследованию. В восстановительной зоне горна молибденовый наконечник не претерпевал существенных изменений.

После исследования последней из намеченных точек восстановительной зоны термопару помещали в трубу, которую вводили в фурму, после чего при движении "вперед" проводили измерение температуры в окислительной зоне горна.

Продолжительность опыта при измерении температуры в 6—8 точках восстановительной и в 2—4 точках окислительной зон горна обычно составляла 20—30 мин.

Отбор проб газа из горна также представлял определенные трудности, так как канал, по которому шел газ, забивался шлаком, чугуном и пылью. Наиболее надежным способом отбора проб газа из горна признан следующий: в трубку для отбора проб газа с рабочей стороны вставляли несколько стальных прутков длиной 0,2—0,4 м, которые во время отбора проб газа выталкивали в горн ударами по концу шомпола. В этом случае газ из горна подавали непрерывно, поэтому 10—15 проб газа по радиусу горна отбирали за 15—25 мин.

При проведении исследований с отбором проб газа и измерением температуры горна в одном опыте соблюдали следующую последовательность операций: при движении трубы вперед от среза фурмы отбирали пробы газа в 6—8 точках окислительной зоны; при выходе трубы в восстановительную зону горна при движении ее вперед в каждой точке отбирали пробу газа и измеряли температуру. После исследования крайней точки восстановительной зоны горна измеряли температуру в окислительной зоне.

Для измерения температуры фурменной зоны применяли автоматические яркостные пирометры, которые имеют хорошие эксплуатационные качества, а по ряду показателей превосходят применяемые для таких измерений приборы.

В процессе эксплуатации автоматических яркостных пирометров установлены следующие преимущества по сравнению с радиационными:

более высокая точность измерения температуры;

точность измерения температуры в меньшей степени зависит от загрязнения оптической системы прибора [73, 94];

непрерывная и автоматическая регистрация температуры, что устраняет полностью субъективные ошибки;

более узкий угол визирования, что облегчает их эксплуатацию и повышает точность измерения температуры;

возможность работы прибора без изменения его термоэлектрической характеристики при нагреве корпуса и чувствительного элемента до 70–100 °С.

Принцип действия яркостного пирометра основан на использовании селективного поглощения определенных участков спектра излучения нагретого тела кремниевым фотодиодом. Исследования показали высокие качества кремниевого фотодиода как чувствительного элемента оптического пирометра [94].

Масса автоматического яркостного пирометра составляет 2,25 кг, длина 185 мм, диаметр 70 мм; вес в комплекте с арматурой 4,5 кг.

Для установки пирометра использовали устройство, в котором с целью повышения точности визирования и облегчения его обслуживания между корпусом и поворотной плитой устанавливался шаровой шарнир с центральным отверстием.

На рис. 16 приведены значения температуры периферии горна, измеренные яркостными пирометрами на 6-й и 9-й фурмах и термопарой погружения, вводимой в периферийную зону на глубину от 0,1 до 0,6 м через фурму № 8 доменной печи № 3 ДМЗ. Разовые измерения температуры термопарой проводили ежедневно. В качестве пирометрической температуры принимали среднеарифметическое значение среднечасовых температур 6-й и 9-й фурменных зон.

Из рис. 16 следует, что температура, измеренная пирометром, хорошо согласуется с температурой, измеренной термопарой на расстоянии 500–580 мм от носка фурмы.

Средняя за период исследования яркостная температура 6-й и 9-й фурменных зон составляла 1871 °С. Температура в фокусе горения (по измерениям термопарой погружения в этом же периоде), расположенном на расстоянии 0,58 м от носка фурмы, равнялась 1861 °С. Следовательно, в первом приближении можно считать, что

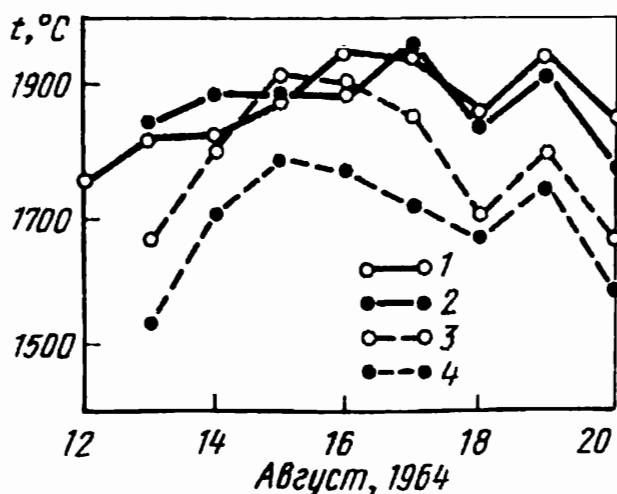


Рис. 16. Температура фурменной зоны, измеренная термопарой погружения (1, 3, 4) и пирометром (2) на расстоянии от среза фурмы, мм: 1 – 500–580; 3 – 300; 4 – 100

яркостный пирометр измеряет температуру в точке, находящейся вблизи фокуса горения окислительной зоны.

До настоящего времени не было предложено метода количественного контроля полноты сгорания пылеугольного топлива или других дополнительных топлив в фурменной зоне.

Количественный метод определения полноты сгорания топлива в фурменных зонах разработан и испытан в условиях ДМЗ и заключается в следующем [95].

Устройство для отбора проб состояло из водоохлаждаемого корпуса 1, в котором расположены центральный канал 2 и кольцевая полость для подачи воды 3. Внутри центрального газоотборного канала 2 был расположен шомпол 4 для шуровки, в газоотборном канале 2 выполнены боковые отверстия 5, соединяющие полость канала 2 с кольцевой полостью 3. Отверстия для подачи воды расположены от торца устройства на расстоянии, равном 3 диаметрам газоотборного канала. Для подачи воды в кольцевую полость 3 имела труба 6 с краном 7; для подачи воды в устройство и ее отвода — патрубки 8 и 9. В тыльной части устройства располагали патрубков 10 для отвода пульпы. С целью уплотнения и предотвращения выбросов газа через газоотборный канал 2 устройство снабдили сальником 11 (рис. 17) [32, 96].

Отбор проб проводили в течение 40–60 мин после окончания выпуска.

Устройство для отбора проб вводили в горн доменной печи через фурменный прибор. После достижения устройством отметки 0,5–1,0 м до первой исследуемой точки открывали кран 7 и вода через отверстие 5, канал 2 и патрубок 10 попадала в емкость, в которой осаждались твердые частицы. В воде, поступающей в емкость, растворены щелочи, цианиды, улавливаются смола и другие компоненты, содержащиеся в горновом газе. После этого очищенные горновые газы поступали в ротаметр с целью определения расхода, затем в прибор для отбора средней пробы и, наконец, на сброс. После перехода к следующей точке отбор пробы начинали после сброса водо-

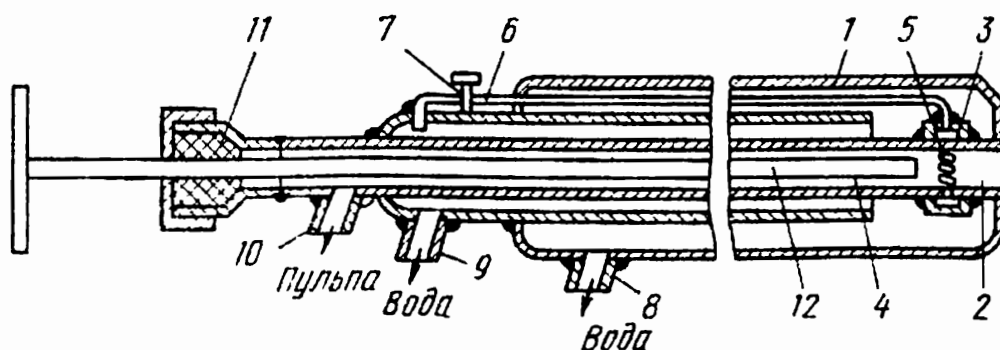


Рис. 17. Труба для отбора проб газа и материалов из горна доменной печи

газовой смеси в атмосферу в течение 2—3 мин с целью удаления из трубы остатков материалов из предыдущей точки. Таким образом, при обычной продолжительности отбора пробы от 2 до 5 мин обеспечивали получение представительной пробы газа, порошкообразного материала, содержащего, как правило, пылеугольное топливо, и наконец пробы воды, содержащей щелочи, цианиды, смолы и другие уловленные из горнового газа материалы. После завершения опыта пробу массой до 2 кг отстаивали с целью удаления воды, а оставшуюся пульпу высушивали. Полученный порошок подвергали макроструктурному и химическому анализам. Полученные результаты использовались для определения фактической концентрации пылеугольного топлива в пробе материалов в каждой исследуемой точке горна, а также для определения состава горнового газа и содержания в нем щелочей, цианидов и других составляющих.

Исследование проб, отобранных из горна материалов, выполняли с помощью методов химического анализа, а также макро- и рентгеноструктурного анализа порошкообразных проб с использованием микроскопов "Неофот-2", "МИМ-8" и дифрактометра "ДРОН-2". По описанному ранее методу отбор проб материалов из горна можно совмещать с отбором проб горнового газа и измерением температуры.

Измерение температуры продуктов плавки на выпуске из доменной печи

Для проведения данного эксперимента была предложена термопара погружения, защищенная графит-молибденовым наконечником (рис. 18).

Спай термопары защищали двумя оболочками. Наружная, состоящая из графитовых стержня 4 и наконечника 6, находилась в непосредственном контакте с измеряемой средой и защищала от разрушения чугуном и шлаком вторую оболочку, состоящую из длинного молибденового наконечника 5, плотно входящего в корпус термопары 1 и предохраняющую спай термопары от загрязнения углеродом и его оксидами, железом, кремнием, серой, фосфором и другими примесями, которые обильно выделялись при нагреве армировки. Всю конструкцию жестко укрепляли на чехле термопары с помощью гайки 2, навинчиваемой на графитовый стержень.

В качестве чувствительного элемента использовали платинородий-платиновые, платинородий-платинородиевые (ПР 30/6) и вольфрам-молибденовые электроды.

При защите спая термопары графит-молибденовым наконечником случаев самопроизвольного разрушения электродов не наблюдалось. Устойчивость градуировки термопары при продолжительной эксплуатации спая систематически проверяли путем проведения параллельных контрольных измерений температуры новой платиновой термопарой.

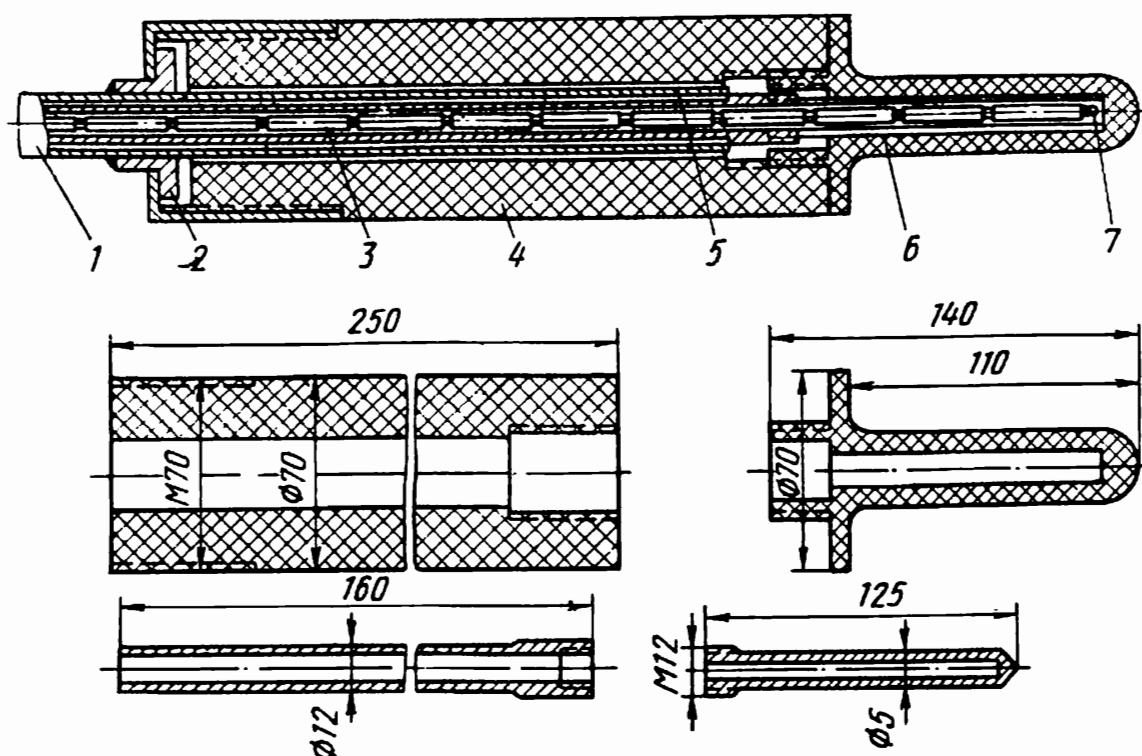


Рис. 18. Термопара для измерения температуры продуктов плавки на выпуске из доменных печей:

1 – корпус; 2 – опорная гайка; 3 – изоляционная соломка; 4 – графитовый стержень; 5 – молибденовый наконечник; 6 – графитовый наконечник; 7 – спай термопары

В большинстве случаев разность между показаниями рабочей и контрольной термопар не превышала $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

Материалом для наружного наконечника и стержня армировки термопары был выбран графит, имеющий высокую теплопроводность, удовлетворительную прочность, не смачивающийся чугуном и шлаком.

Графитовый наконечник выдерживал до полного износа 2–4 ч непрерывного погружения или 20–30 кратковременных погружений по 3–5 мин. Скорость прогрева графит-молибденового наконечника до полной стабилизации температуры составляла 1,5–2,5 мин. Графитовый стержень выдерживал до 4–6 ч непрерывного погружения в чугун или до 40–60 кратковременных погружений (см. рис. 18).

Для защиты спая от загрязнения использовали молибденовый наконечник, имеющий высокие газоплотность, теплопроводность и прочность, химически нейтральный при нагреве до 1600°C [94].

Молибденовый наконечник, защищенный графитом от непосредственного контакта с чугуном, практически не претерпевал изменений при длительном нагреве до 1600°C .

Для изолирования электродов в высокотемпературной зоне использовали глиноземистую, циркониевую или бериллиевую двухканальную соломку.

Определение фракционного состава пылеугольного топлива

Фракционный состав пылеугольного топлива определяли в два этапа.

Ситовый анализ. При его проведении использовали сита с ячейками размером 0,100, 0,063 и 0,050 мм. Первоначально ситовый анализ проводили методом сухого рассева на вибровстряхивателе "Ротап". В дальнейшем от этого метода пришлось отказаться из-за неполного просыпания топлива мелких фракций через сита малого размера, а также больших потерь материала на выпыливание. Был применен метод, заключающийся в промывке пробы жидкостью (этиловый спирт, водноспиртовой или мыльный растворы) на тех же ситах; масса пробы угля составляла 25 г.

Седиментационный анализ. Топливо фракцией — 0,050 мм, оставшееся на поддоне, в дальнейшем подвергалось седиментации на тензосаах, представляющих собой гибкую стальную балочку 1 с наклеенными на нее тензорезисторами 2 (рис. 19). К балочке подвешивали измерительную чашку 3, на которой фиксировали массу осевших частиц. Под воздействием изменяющейся массы выпавшего осадка частиц пылеугольного топлива, сопротивление тензорезисторов изменялось пропорционально их массе. Тензорезисторы были включены в измерительный мост. Разбаланс напряжения моста фиксировали самопишущим потенциометром КСП-4.

Таким образом, на диаграммной ленте получали кривую седиментации, описывающуюся зависимостью:

$$Q = f(\tau), \quad (34)$$

где Q — масса выпавшего осадка угля, г; τ — время, с.

При проведении седиментометрического анализа пылеугольного топлива возникали трудности в выборе дисперсионной среды, так как угольная пыль является гидрофобным веществом. Были испытаны этиловый спирт, ацетон, дистиллированная вода с добавками пи-

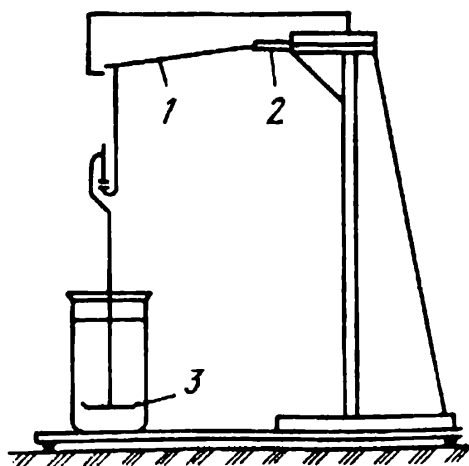


Рис. 19. Схема установки для седиментационного анализа:

1, 2, 3 — в тексте

рофосфата натрия ($\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) в количестве 0,01 моль/дм³ суспензии. Однако применение указанных жидкостей необходимого результата не дало, поскольку этиловый спирт и ацетон обладают большой летучестью, что недопустимо при длительности опыта > 24 ч, так как сопровождается изменением высоты оседания. Дистиллированная вода с добавкой пирофосфата натрия в качестве стабилизатора также оказалась непригодной из-за неполного смачивания порошка угольной пыли. Необходимо было сильное поверхностно-активное вещество (ПАВ), снижающее поверхностное натяжение воды и устраняющее коагуляцию частиц пылеугольного топлива. В качестве такого ПАВ было испытано, а в дальнейшем и проведен ряд опытов с использованием небольших количеств жидкого мыла. Добавка ПАВ составляла 1 г/л. С применением в качестве ПАВ жидкого мыла была достигнута полная смачиваемость и устранена коагуляция частиц, о чем свидетельствует характер кривой седиментации и малая скорость оседания.

Определение реологических свойств раствора с ПАВ показало, что вязкость его не выше, а несколько ниже, чем вязкость воды, и составила 0,922–1,01 в зависимости от температуры. Плотность раствора составила 0,999 г/см³ при $t = 18,7^\circ\text{C}$. Таким образом, уменьшение скорости оседания частиц было вызвано устранением их коагуляции. Эти результаты позволили применить раствор с ПАВ для промывки пробы угля на ситах, тем более, что полученную после промывки суспензию использовали как уже готовый препарат для седиментации. Кроме того, исключали возможность образования агрегатов частиц, которая имела место при размачивании сухой пробы. Пикнометрическая плотность угольного порошка с частицами размером < 50 мкм составила 1,55–1,66 г/см³.

Сравнительный анализ ситового состава пылеугольного топлива, проведенный методом отсева на вибровстряхивателе и промывки пробы на ситах этиловым спиртом, показал, что сухой сев на ситах дает повышенное содержание грубых фракций. Так, содержание частиц фракцией 100–63 мкм при промывке составлял 11,83 %, в то время как при сухом отсеве — > 32 %.

Применение метода промывки на ситах жидкостью, а также применение ПАВ для проведения седиментационного анализа позволило получить более реальное представление о фракционном составе и других характеристиках пылеугольного топлива.

3.2. Исследование особенностей теплового режима доменной печи при вдувании в горн дополнительного топлива

Вдувание в горн природного газа, в меньшей мере пылеугольного топлива, сопровождается интенсификацией процесса косвенного восстановления оксида железа (r_d), а также снижением окислительно-

го потенциала фурменных зон, следствием чего является уменьшение окисления элементов чугуна, в первую очередь железа.

В результате указанных изменений происходит существенное уменьшение прихода в горн оксида железа, восстановление которого идет прямым путем, т.е. со значительным потреблением тепла.

На практике при вдувании природного газа и пылеугольного топлива восстановление оптимального нагрева горна и качества продуктов плавки достигалось увеличением рудной нагрузки и соответственным снижением расхода кокса.

Однако восстановление теплового равновесия горна доменной печи по конечным составу и температуре продуктов плавки не свидетельствовало о том, что и в горне доменной печи восстанавливаются прежние температурные условия: очевидно, существенное снижение прихода в горн оксида железа, определяемое вдуванием дополнительного топлива, частично разгружает его от восстановительной работы и затрат тепла, что предопределяет возможность ведения процесса на более низком температурном уровне.

Поскольку при вдувании в горн природного газа снижение прихода в горн оксида железа ориентировочно вдвое больше, чем при вдувании пылеугольного топлива, то и эффект воздействия этого мероприятия на температурный режим горна соответственно больший. При вдувании в горн природного газа и пылеугольного топлива указанные эффекты суммируются, обеспечивая соответственное улучшение условий нагрева продуктов плавки, десульфурации чугуна и т.д.

Сказанное подтверждается прямыми экспериментами, проведенными на доменных печах металлургических заводов Донбасса, работающих с вдуванием природного газа.

Изменение теоретической температуры горения. Определение оптимального значения теоретической температуры при вдувании в горн, природного газа имеет принципиальное значение в связи с тем, что от правильного решения его во многом зависит эффективность новой технологии.

В условиях Донецкого металлургического завода применение природного газа на доменной печи № 1 привело к снижению теоретической температуры горения от 1940 до 1770–1842 °С (табл. 12).

Для доменной печи 2, имеющей без применения природного газа более низкую исходную теоретическую температуру горения, вдувание природного газа в горн доменной печи потребовало повышения температуры дутья, что позволило сохранить теоретическую температуру горения на исходном уровне [73].

Для исследования оптимального расхода природного газа в конкретных технологических условиях в определенные периоды были обработаны среднесуточные данные по доменной печи № 1. Доменная

Т а б л и ц а 12. Показатели работы доменных печей № 1 и 2 ДМЗ в периоды с вдуванием и без вдувания природного газа

Показатель	Доменная печь № 1						
	I	II	III	IV	V		
Производительность печи, т/сут	1098	1196,4	1203,1	1296,8	1364,4	1353,8	1439,3
Расход кокса, кг/т чугуна	1046	878	881	749	685	687	648
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	0,0	167,4	176,6	153,0	125,0	125,0	106,0
Выход шлака, кг/т чугуна	1051	1083	1088	917	788	706	689
Основность шлака, CaO/SiO ₂	1,35	1,23	1,25	1,24	1,28	1,28	1,22
Содержание MgO в шлаке, %	3,20	3,37	3,04	3,8	4,5	4,56	5,4
Расход агломерата, кг/т чугуна	0	0	0	851	1168	1195	1475
Расход сырого флюса, кг/т чугуна . . .	954	987	999	709	547	530	403
Содержание CO ₂ в колошниковом газе, %	10,6	10,75	10,96	11,4	12,4	11,9	12,0
Температура дутья, °С	772	880	906	916	989	1016	1007
Количество дутья, м ³ /мин.	2365	2630	2512	2489	2285	2269	2310
Давление колошникового газа, МПа	0,085	0,115	0,14	0,121	0,126	0,126	0,126
Соеержание Si в чугуне, %	0,89	0,80	0,82	0,84	0,80	0,87	0,81
Содержание S в чугуне, %	0,041	0,032	0,034	0,035	0,034	0,035	0,033
Теоретическая температура горения кокса, °С	1940	1805	1783	1777	1842	1886	1904

печь выплавляла передельный чугун из сырых руд Кривого Рога, находилась в удовлетворительном состоянии и работала в сопоставимых технологических условиях.

В первый период максимальная экономия кокса (146 кг/т чугуна) была достигнута при расходе природного газа 187,5–200 м³/т углерода, сгоревшего у фурм, при более низкой, чем в исходном периоде (1800–1825 °С), теоретической температуре горения кокса.

Производительность печи при данном расходе природного газа была выше, чем в исходном, но несколько меньше максимально достигнутой при расходе природного газа 175 м³/т углерода, сгоревшего у фурм.

Аналогичные результаты получены в периоде II после увеличения температуры дутья до 900–960 °С. В данном периоде максимальная экономия кокса (> 250 кг/т чугуна) была достигнута при более высоком расходе природного газа (> 300 м³/т углерода, сгоревшего у фурм). Теоретическая температура горения при максимальной экономии кокса оказалась более чем на 200 °С ниже исходной. Таким образом, в данный период увеличение температуры дутья и расхода природного газа позволило снизить уровень оптимальной (с точки зрения экономии кокса) теоретической температуры горения кокса от 1800–1825 до 1750–1775 °С. Производительность печи во второй период изменялась в значительных пределах, однако при максимальном расходе природного газа сохранилась на исходном уровне.

Изменение действительной температуры горна. На основании исследований, проведенных на Енакиевском, Донецком заводах и Ждановском ("Азовсталь") металлургическом комбинате, работающих в различных технологических условиях, необходимо сделать выводы относительно характера распределения и уровня действительных температур в горне доменной печи при вдувании природного газа. Сопоставим полученные данные аналогичных исследований на печах, выплавливающих передельный чугун без применения природного газа [92, 93, 97–99].

Различия технологических условий работы доменных печей, а также применяемых методик измерения температуры в проведенной и используемых для сравнения работах не дают возможности провести количественную оценку полученных результатов [73, 92, 93, 97–99]. В то же время большое число проведенных опытов и большой диапазон технологических условий работы исследованных печей гарантируют достоверность и представительность выводов, оцениваемых с качественной стороны (рис. 20, 21; табл. 13). Характер распределения температур по радиусу горна при вдувании природного газа существенно не изменился (рис. 20, 21). Только в наиболее благоприятных условиях доменная печь комбината "Азовсталь", работающая при температуре дутья > 1000 °С и содержании в шихте 90–

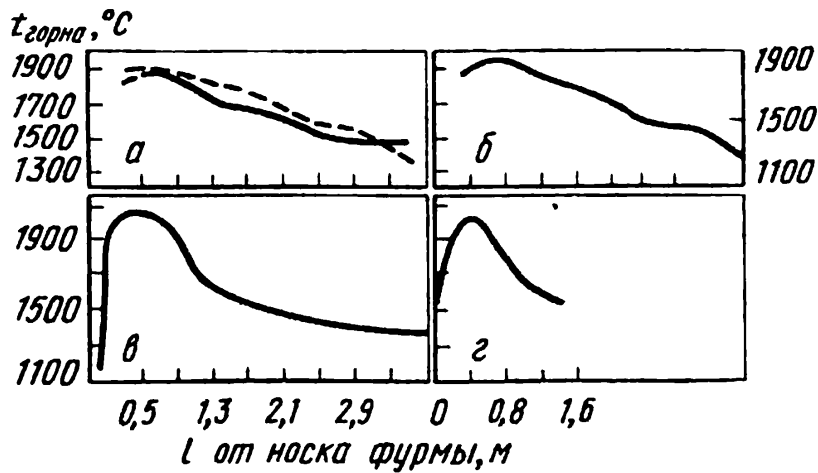


Рис. 20. Характер изменения температуры по радиусу горна доменных печей при работе на атмосферном дутье на Магнитогорском металлургическом комбинате (а); "Запорожстали" (б); НТМЗ (в); ММК (г)

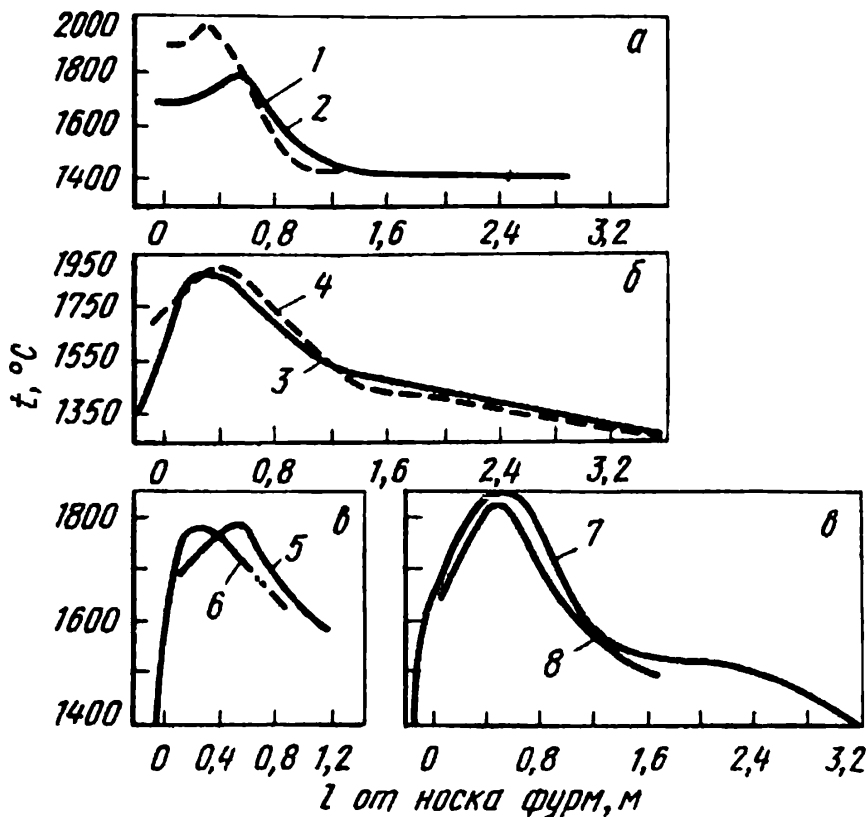


Рис. 21. Характер изменения температуры по радиусу горна при работе на атмосферном дутье с применением природного газа: на ЕМЗ (а); "Азовстали" (б); ДМЗ (в):

1 — при отключенном природном газе; 2 — при вдувании его в горн; 3–8 — на атмосферном дутье с вдуванием природного газа

100 % офлюсованного агломерата, температура в фокусе горения равнялась минимальной, установленной при работе печи без применения природного газа (см. рис. 20, 21; табл. 13). Во всех же остальных случаях при вдувании в горн природного газа температура в

Т а б л и ц а 13. Температура в горне доменных печей при работе с вдуванием и без вдувания природного газа

Комбинат или завод, номер доменной печи	Диаметр горна печи, мм	Фокус горения		Средняя по площади температура горна, °С	Темпера- тура у оси печи, °С	Расход природного газа, м ³ /т чугуна	Число опытов и измере- ний тем- пературы	Лите- ратура
		расстоя- ние от носка фурмы, мм	темпера- тура, °С					
ММК, № 1	7600	600	1900	1765	1400	0	—	93
	7600	500	1870	—	1280	0	—	—
ММК, № 6 "Запорожсталь", № 3	7600	400	1880	—	—	0	—	—
	8000	600	1900	1750	1370	0	—	—
	8000	550	1800	—	1370	0	—	92
НЛМЗ ММК	8000	650	1900	—	1400	0	—	—
	18200	550	2091	1739	1385	0	—	98
	8000	400	1990	—	1450	0	—	99
Енакиевский, № 4 (1) *	7200	500	1805	1601	1306–1459	125,5	28	73
"Азовсталь", № 6 (3) (4)	8800	275	1895	1587	1308	106	—	—
	8800	450	1900	1584	1312	109	41	—
Им. Ильича, № 4	9400	—	—	—	1502–1470	около 100	3	—
ДМЗ по периодам: (5) (6) (7) (8)	6000	200	1783	—	—	128	—	73
	6000	500	1788	—	—	126	—	—
	6000	475	1825	1648	1450	117	123	—
	6000	550	1834	1655	—	105	—	—

* Цифры в скобках указывают соответственные периоды на рис. 21.

фокусе горения существенно (на 40–250 °С) ниже, чем при работе без применения природного газа. Исследования, проведенные на Донецком металлургическом заводе в течение четырех периодов, отличающихся шихтовым и температурно-дутьевым режимами, показали, что введение в шихту офлюсованного агломерата, повышение температуры дутья и некоторое снижение расхода природного газа в периодах III и IV определили повышение температуры в фокусе горения на 34–50 °С (см. табл. 13). Однако и в этом случае температура в фокусе горения была минимальной по сравнению с температурой при работе печей без вдувания природного газа.

При вдувании в горн природного газа расстояние фокуса горения от носка фурмы в целом не изменилось (см. табл. 13).

Протяженность окислительной зоны, определяемая составом газа и перегибом температурной кривой, также сохранилась на прежнем уровне при вдувании в горн природного газа.

Характерной и существенной особенностью распределения температур по радиусу горна современных печей является более резкое падение температур от максимальных к минимальным. Переход от окислительной зоны к восстановительной выражен значительным снижением температуры, в то время как в более ранних исследованиях этот переход был более плавным (см. рис. 20).

Эта особенность, на наш взгляд, не имеет прямого отношения к вдуванию природного газа, а вызвана значительным снижением расхода кокса на современных печах и, следовательно, ростом рудных нагрузок на кокс и уменьшением выхода горнового газа на единицу проплавляемой шихты.

Это обстоятельство ускорило процессы теплообмена и теплопередачи между газом и шихтой, что и вызвало более быстрое снижение температуры газа.

Следует, однако, отметить, что температура у оси горна, несмотря на снижение расхода кокса и увеличение диаметра горна, существенно не изменилась (см. рис. 20, 21; табл. 13).

Высокая температура газов у оси горна, характеризующая его хорошую газопроницаемость, является, на наш взгляд, фактором, определяющим устойчивость нагрева горна, качество чугуна и другие технико-экономические показатели плавки. Поэтому со снижением расхода кокса и увеличением диаметра горна технологи добивались поддержания на необходимом уровне температуры у оси горна с помощью увеличения кинетической энергии дутья, соответствующим изменением режимов загрузки сырых материалов.

На современных печах средняя по площади температура горна существенно снизилась в результате снижения уровня максимальной температуры и увеличения относительной доли низкотемпературной восстановительной зоны горна (см. табл. 13). Увеличение низкотем-

пературной зоны горна на современных печах вызвано прежде всего более резким снижением температуры при переходе от окислительной к восстановительной зоне, а также существенным увеличением диаметра горна.

Представляет интерес температура кокса в окислительной и восстановительной зонах горна, измеренная термопарой погружения во время кратковременных остановок печи (табл. 14).

Действительная температура кокса в окислительной зоне горна близка к принимаемой обычно при расчетах теоретической температуре горения (1450–1500 °С).

Изменение состава газа по радиусу горна. Известно, что вдувание в горн природного газа приводит к уменьшению окислительной способности фурменной зоны, поскольку часть кислорода дутья используется на горение природного газа в фурме и периферийной зоне горна. За пределами периферии горна горение кокса обеспечивается кислородом, полученным от диссоциации паров воды и диоксида углерода, окислительная способность которых меньше, чем у газообразного кислорода [73, 97–99].

На рис. 22 приведены результаты полного анализа проб газа с параллельным измерением температуры горна.

Содержание метана в горновом газе в точках, расположенных

Т а б л и ц а 14. Температура кокса в горне доменной печи, измеренная во время кратковременной остановки

Расстояние от носка фурмы, мм	Им. Ильича		ДМЗ		
	1	2	1	2	3
200	—	—	—	—	1439
400	—	—	1450	1695	1487
500	1425	—	—	—	1420
650	—	—	—	1670	—
750	1458	—	—	1613	1420
1000	1522	—	—	—	1413
1250	1431	—	—	—	1462
1350	—	—	—	—	1465
1500	1306	—	—	—	1442
1750	1237	—	—	—	—
2000	—	1408	—	—	—
2500	—	1373	—	—	—
<i>Окислительная зона</i>					
До 1250 мм	1459	—	1450	1659	1441
> 1250 мм	1270	1390	—	—	1445

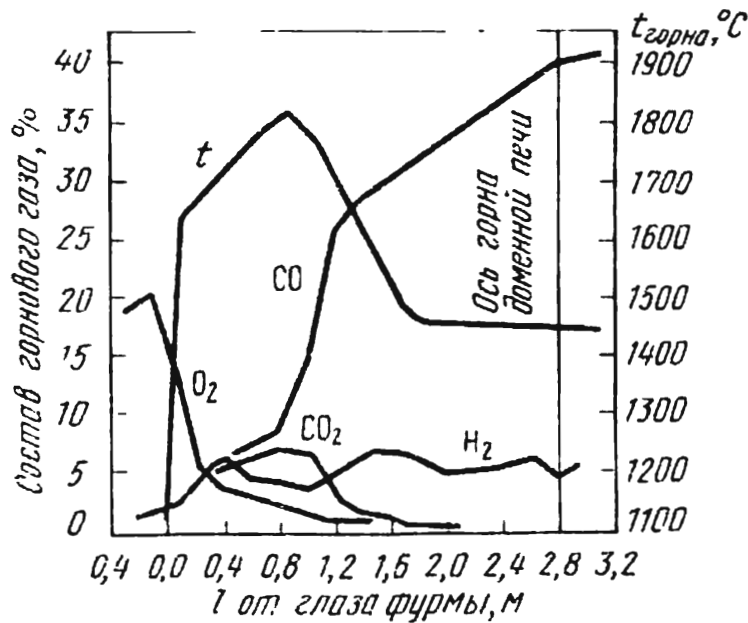


Рис. 22. Изменение химического состава и температуры газов по радиусу горна доменной печи № 3 ДМЗ

дальше 0,3 м от глаза фурмы, не превышало 0,1–0,3 %, что свидетельствует о сгорании природного газа на периферии горна.

Об этом же можно судить и по кривой изменения содержания водорода в горновом газе. У среза фурмы содержание водорода ниже 1 %; затем по мере участия паров воды — продукта полного горения природного газа — в окислении углерода кокса, содержание водорода повышалось до 4,5–5,0 % на расстоянии 0,4 м и в дальнейшем существенно не изменялось.

Содержание кислорода начинает снижаться еще в фурме в связи с использованием его на сжигание природного газа. Полное исчезновение кислорода отмечали на расстоянии 400–500 мм от глаза фурмы.

Максимальное содержание CO₂ отмечали на расстоянии 0,8 м, а на расстоянии 1,4 м оно снижалось до 1 %. Характерно, что место расположения максимального содержания CO₂ совпадало с максимальной температурой горна. По характеру кривых содержания CO₂, CO и температуре горна можно установить, что протяженность окислительной зоны составляла 1,2–1,4 м, как и при работе печей без применения природного газа [97, 98].

Глубину зоны разрыхления измеряли механическим зондированием: водоохлаждаемую трубку помещали в горн до тех пор, пока она не упиралась в столб неподвижной шихты. Протяженность зоны разрыхления изменялась по этим измерениям от 0,9 до 1,4 м.

Проведенные данные подтвердили выводы других исследователей о снижении окислительной способности фурменной зоны печи при вдувании природного газа.

Исследованиями, проведенными на доменных печах Енакиевского, Донецкого заводов и комбината "Азовсталь", подтверждено, что освоение технологии выплавки передельного чугуна с применением природного газа сопровождалось снижением максимальных температур в фурменных очагах на 40–250 °С (до 1774–1990 °С), сохранением значительной протяженности окислительных зон (0,9–1,4 м), сохранением температур у оси горна на наиболее высоком уровне, отмеченном при работе печей на атмосферном дутье (1306–1500 °С).

Указанные особенности теплового режима горна доменной печи так же, как и снижение содержания оксида железа первичных и конечных шлаков, способствовали улучшению схода шихты, повышению устойчивости нагрева горна, условий нагрева продуктов плавки и десульфурации чугуна [71, 73].

Сопоставление качества передельного чугуна, выплавляемого в доменной печи № 1 ДМЗ в периоды, характеризующиеся относительно равными шихтовыми условиями, показало, что освоение технологии доменной плавки с применением природного газа сопровождалось снижением содержания кремния в чугуне на 0,10–0,15 % при сохранении на высоком уровне температуры чугуна на выпуске (1476–1511 °С). В частности, при вдувании в горн природного газа содержание серы в чугуне снизилось с 0,042–0,044 % до 0,030–0,34 %, что объясняется сокращением прихода серы с коксом на 8,6–22 % и улучшением степени использования десульфурации шлаков на 9,1 % [101]. Содержание углерода в чугуне составляло 4,30–4,70 %. Высокое содержание углерода в чугуне объясняется как повышением его предела растворимости, так и улучшением условий науглероживания чугуна в печи. Степень науглероживания чугуна составляла 94,0–97,5 %.

3.3. Исследование особенностей металлургических процессов в фурменных зонах при вдувании пылеугольного топлива

Изменение окислительной способности фурменных зон

Преобладающее горение пылеугольного топлива и природного газа в фурме доменной печи и на периферии окислительной зоны определяет расход на эти реакции до 50 % кислорода дутья. Дальнейшее снижение расхода кокса и увеличение расхода пылеугольного топлива ≥ 150 кг/т чугуна могут способствовать дальнейшему снижению содержания кислорода в горновом газе в основном объеме фурменных зон. В указанных условиях горение всей или значительной части углерода кокса проходит за счет его взаимодействия с парами воды и диоксидом углерода.

Известно, что при прочих равных условиях окислительная способность CO_2 и H_2O значительно уступает окислительной способности свободного O_2 .

На основании анализа экспериментальных данных, обобщения результатов получены следующие соотношения между энергиями активации основных реакций окисления углерода [100]:

$$\frac{E_{C+CO_2}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO_2}} = 2,2; \quad (35)$$

$$\frac{E_{C+H_2O}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO_2}} = 1,6. \quad (36)$$

С использованием закономерности Аррениуса для определения скорости реакций по методике, разработанной Померанцевым В.В. для реакций окисления углерода кислородом, диоксидом углерода и водяными парами, получено выражение, качественно характеризующее отношение скоростей окисления углерода кокса в условиях работы доменной печи без применения (индекс 0) и с применением (индекс 1) дополнительных видов топлива:

$$\frac{\omega_{C+O_2}}{\omega_{(C+O_2)(C+CO_2)(C+H_2O)}} = \frac{K_{C+O_2}^0 e^{-\frac{E_{C+O_2}}{RT^0}} c_{O_2}^0}{K_{C+O_2}^0 e^{-\frac{E_{C+O_2}}{RT'}} c'_{O_2} + K_{C+CO_2}^0 e^{-\frac{E_{C+CO_2}}{RT'}} + K_{O+H_2O}^0 e^{-\frac{E_{C+H_2O}}{RT'}} c_{H_2O}}, \quad (37)$$

где E_{C+O_2} ; E_{C+CO_2} ; E_{C+H_2O} — энергия активации реакций; $c_{O_2}^0$; c'_{O_2} , c'_{CO_2} , c'_{H_2O} — концентрации компонентов в режимах сжигания кокса и дополнительного топлива, моль/м³; $K_{C+O_2}^0$; $K_{O+CO_2}^0$; $K_{C+H_2O}^0$ — предэкспоненциальный множитель зависимости Аррениуса для гетерогенной реакции, м/с.

Расчеты по уравнению (37) для технологических условий доменных печей в Донбассе показывают, что при равенстве температур газовых фаз снижение их окислительной способности при вдувании дополнительного топлива составит 1,9 раза, а с учетом возможного снижения температуры газовой фазы на 200 °С — 4 раза.

Практическим следствием указанного изменения при вдувании в горн дополнительного топлива может быть увеличение объема и протяженности окислительных зон, снижение уровня максимальных температур газовой фазы.

Отмеченное снижение окислительной способности газовой фазы

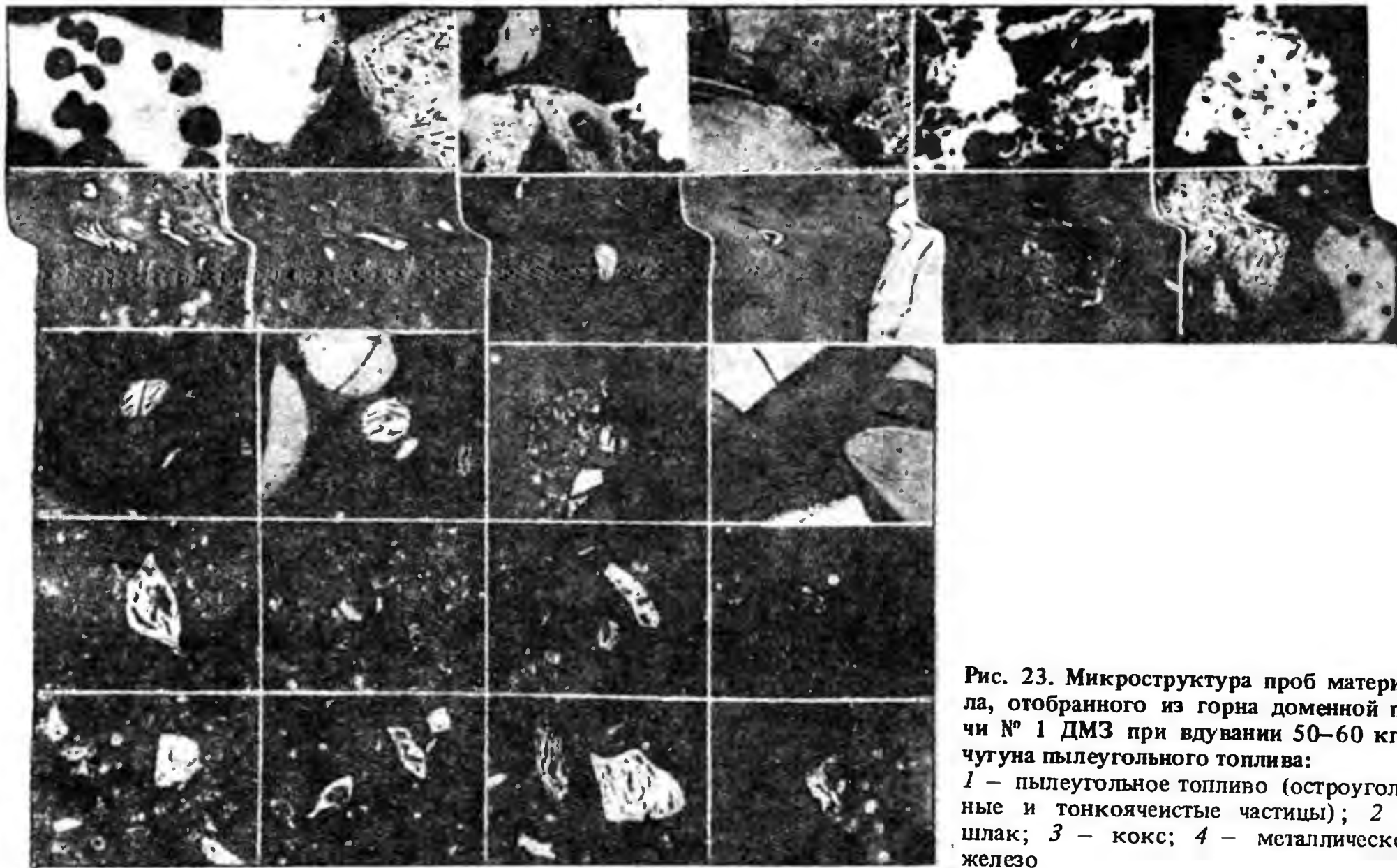


Рис. 23. Микроструктура проб материала, отобранного из горна доменной печи № 1 ДМЗ при вдувании 50–60 кг/т чугуна пылеугольного топлива:
1 – пылеугольное топливо (остроугольные и тонкоячеистые частицы); 2 – шлак; 3 – кокс; 4 – металлическое железо

фурменных зон может способствовать также ограничению процесса вторичного окисления основных элементов чугуна Fe, Si, Mn и др.

Для оценки влияния пылеугольного топлива на температуру продуктов плавки сопоставили уравнение теплового баланса для нижней зоны теплообмена для начальных (индекс 0) и новых (индекс 1) условий плавки. Принимая для этих условий $t_0 = t_1, t_{н0} = t_{н1} = t_n$, получим:

$$t_{к1} = t_n + \frac{W_{ш0}}{W_{ш1}} \cdot \frac{W_{г1}}{W_{г0}} (t_{к0} - t_n). \quad (38)$$

Из этого уравнения следует, что температура продуктов плавки при работе доменной печи с вдуванием пылеугольного топлива может возрасти ориентировочно на 2–3 % вследствие снижения степени прямого восстановления и уменьшения окислительной способности газовой фазы фурменных зон, определяющих снижение прихода в горн оксида железа и повышение отношения $W_{ш0}/W_{ш1}$.

Исследование горения пылеугольного топлива в горне доменной печи. Исследование полноты сгорания пылеугольного топлива, вдуваемого в количестве 40–80 кг/т чугуна, выполняли на доменной печи № 1 по описанной ранее методике.

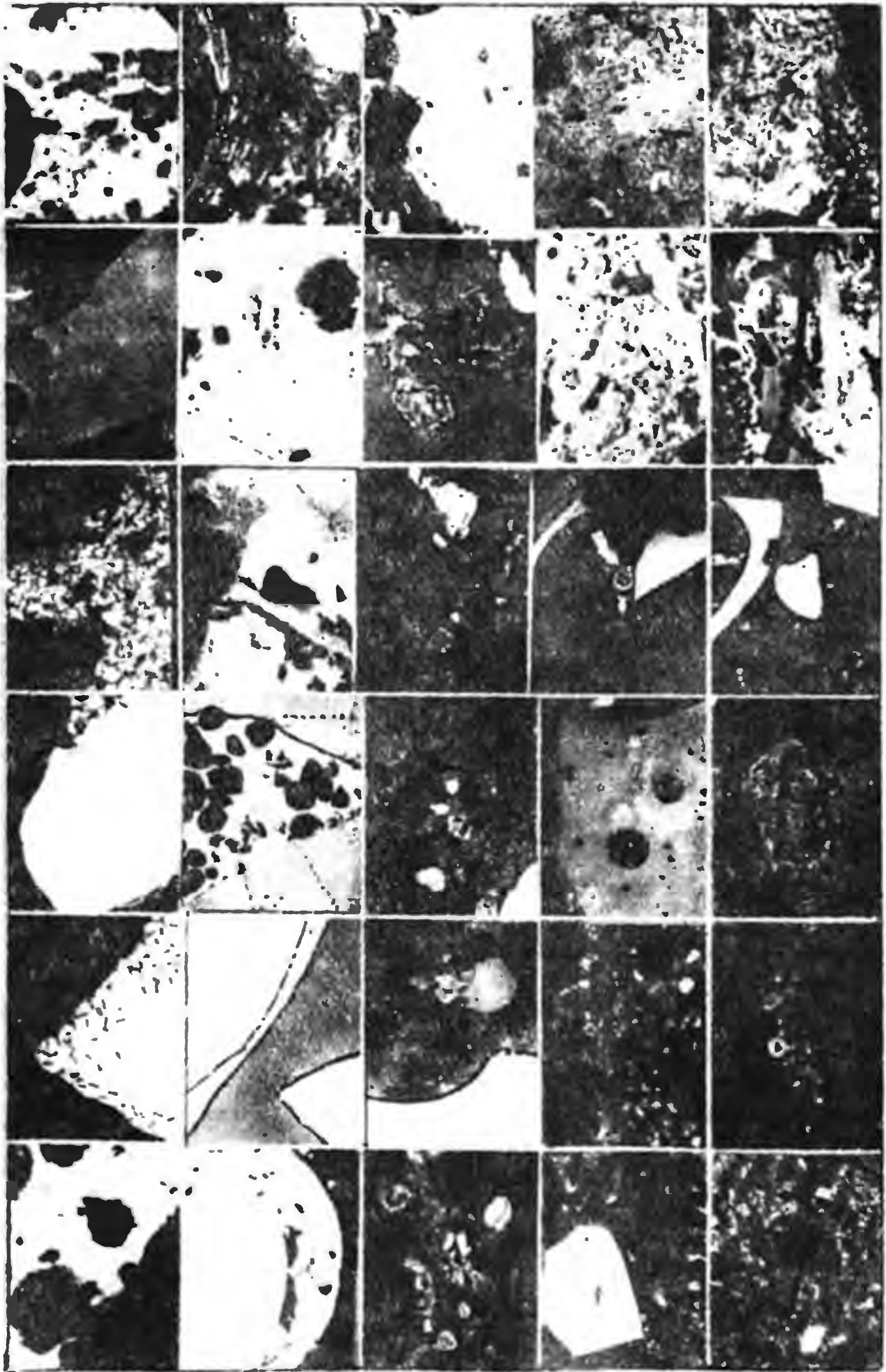
Для сопоставления были проведены аналогичные исследования при работе доменной печи без вдувания пылеугольного топлива.

Всего за время исследования отобрано 170 проб материалов из 12 точек горна. Из рис. 23, 24 видно, что уже на срезе фурмы размер частиц пылеугольного топлива (белое поле) значительно уменьшился. По мере удаления от носка фурмы как размер частиц, так и их количество продолжали интенсивно уменьшаться.

На отметке 0,50–0,60 м, как правило, в составе извлеченных из горна порошкообразных материалов частицы пылеугольного топлива отсутствовали, что свидетельствовало о завершении горения пылеугольного топлива.

В дальнейшем (отметки +0,75÷–1,5 м) в пробах материалов из горна отмечалось повышение содержания углерода. Однако, как показывает размер и структура углесодержащих частиц, это изменение объясняется соответственным увеличением количества частиц кокса.

С помощью микроскопа "Неофот-21" выполнено количественное определение состава проб порошковых материалов, отобранных из горна (рис. 25). Полученные данные также подтвердили практически полное сгорание пылеугольного топлива к отметке 0,5–0,7 м от среза фурмы. Интенсивное горение пылеугольного топлива началось еще до его поступления в фурменную зону: на срезе фурмы сгорало уже 50–70 % топлива, на отметке +0,3÷–70 м – 90 % топлива.



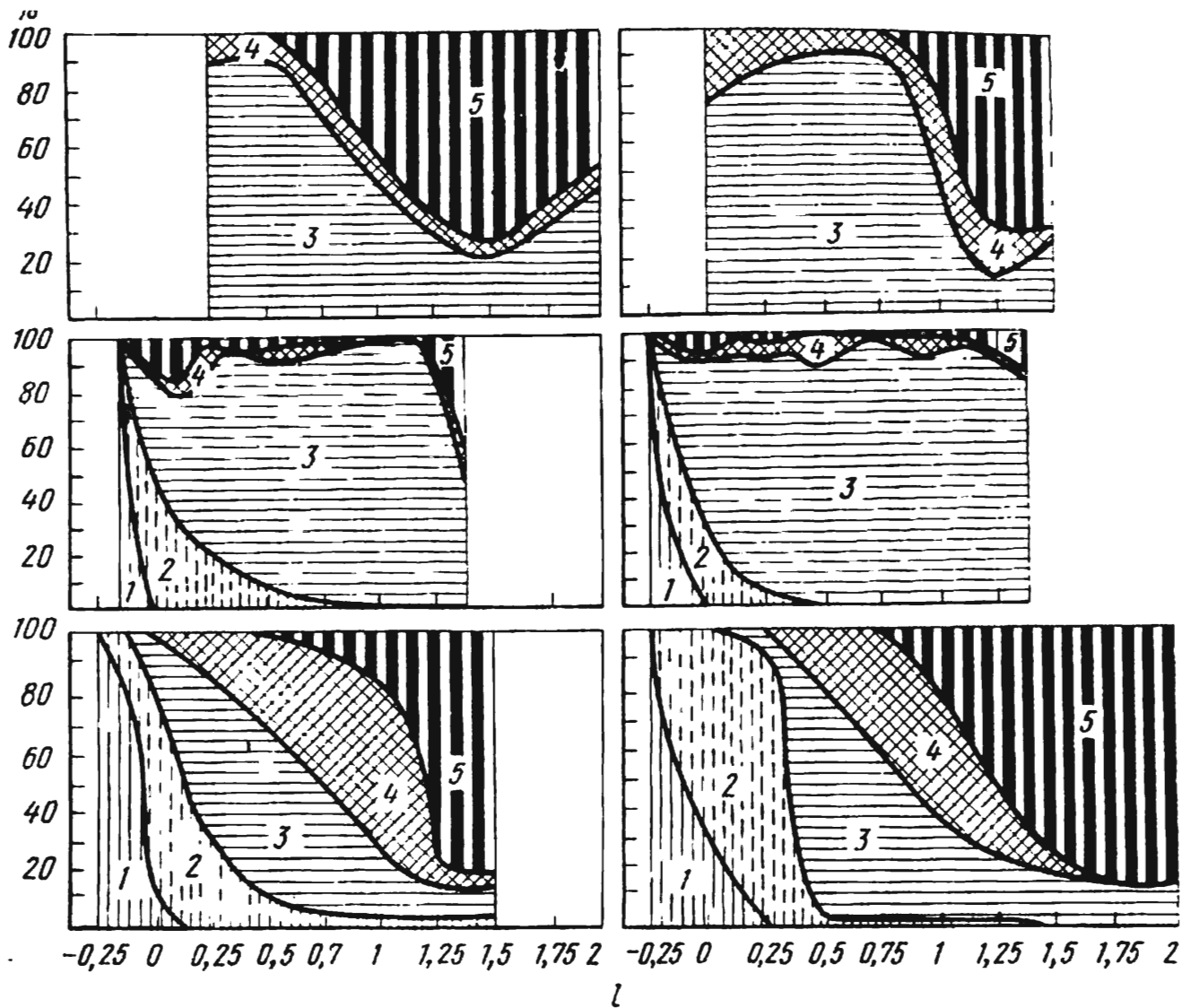


Рис. 25. Компонентный состав материалов по радиусу горна:
а, б — без вдувания пылеугольного топлива; *в, г, д, е* — с вдуванием пылеугольного топлива: *1* — пылеугольное топливо; *2* — остатки от частиц пылеугольного топлива в виде ячеистых структур; *3* — шлак; *4* — чугун; *5* — кокс

Основным компонентом проб материалов из горна являются пылеугольное топливо и шлак: долевое участие их в пробах изменялось от 0 до 100 %. В значительно меньших количествах, однако практически во всех исследованных точках горна, представлены чугун и кокс (0–10 %).

В конце окислительной зоны количество этих материалов в пробе повышается, что объясняется особенностями движения материалов и газов в фурменных зонах. Аналогичные выводы подтверждены хими-

Рис. 24. Микроструктура проб материала, отобранного из горна доменной печи № 1 ДМЗ при вдувании 60–70 кг/т чугуна пылеугольного топлива:
1 — пылеугольное топливо; *2* — шлак; *3* — кокс; *4* — металлическое железо

Т а б л и ц а 15. Химический состав материалов по радиусу фурменной зоны

Точка отбора, м	Масса пробы, г	Содержание, %				Содержание углерода	
		углерода	летучих веществ	железа	щелочей	г (в пробе)	% (от места ввода пылеугольного топлива)
Ввод пылеугольного топлива	53,55	63,84	8,84	2,0	0,92	—	100
Ввод природного газа:	32,1	51,26	8,50	2,54	1,72	17,0	50
0 (срез фурмы)	92,03	10,25	2,13	16,0	1,00	9,3	28
+0,125	14,78	29,82	4,41	21,4	1,06	4,8	12
+0,850	24,6	19,57	3,64	20,1	1,28	4,8	12
+0,375	32,5	18,31	4,64	27,0	0,94	6,0	18
+0,500	97,41	5,6	1,21	17,4	0,60	5,2	15
+0,750	177,81	0	0,32	17,75	0,54	0	0
+1,00	72,13	38,97	3,98	17,6	0,78	28,0	83
+1,250	27,10	48,36	5,9	13,2	0,92	14,0	35
+1,500	17,20	46,01	9,1	11,8	0,98	9,0	26
+1,750	25,61	17,37	5,01	4,73	0,72	4,3	11

ческим анализом описанных проб порошкообразных материалов (табл. 15).

Химический состав газа по радиусу горна в периоды работы печи с вдуванием и без вдувания пылеугольного топлива подтвердил интенсивное горение топлива на периферии, качественный расчет по разнице содержания кислорода в газовой фазе до отметки +0,5 м от носка фурмы подтвердил возможность полного сгорания пылеугольного топлива (рис. 26).

Аналогичные данные были получены и на других металлургических заводах [11, 37, 38, 69, 102, 103].

Интенсивное сгорание пылеугольного топлива на периферии горна подтвердилось также количеством и химическим составом проб отобранных порошкообразных материалов.

При вдувании пылеугольного топлива средняя масса пробы отобранных в горне порошковых материалов была существенно меньше, чем в опытах без вдувания. Более четко эта разница выражена в пробах немагнитной части: так, в точках горна, расположенных от 0 до 1 м от носка фурмы, средняя масса пробы при вдувании топлива была в 2,9 раза меньше, чем в аналогичных опытах без вдувания (рис. 27).

Поскольку условия забора проб материалов из горна во всех опытах были равными, очевидно, имеются объективные причины,

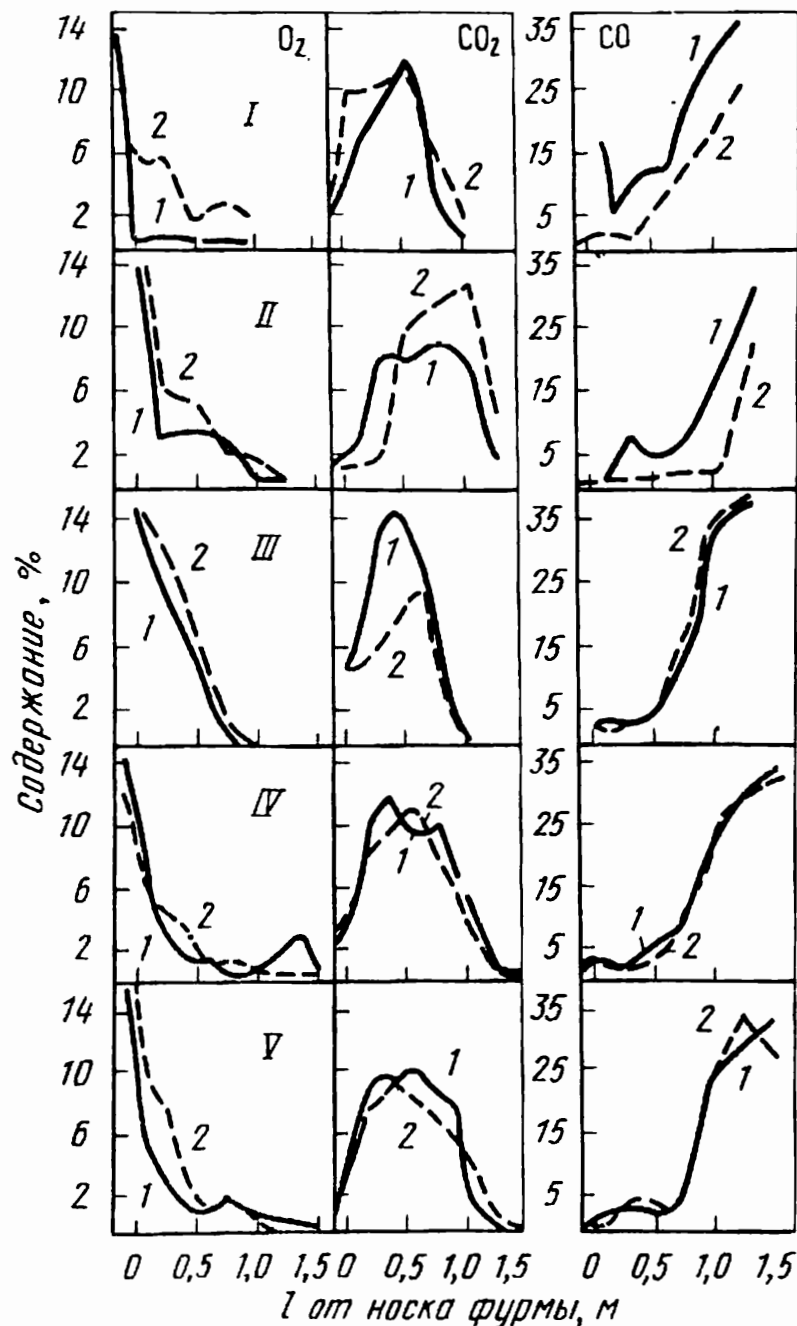


Рис. 26. Изменение химического состава горнового газа при работе доменной печи с вдуванием (1) и без вдувания пылеугольного топлива:

I — Днепродзержинский металлургический комбинат; II — Карагандинский металлургический комбинат; III — современная доменная печь в Японии; IV, V — Донецкий металлургический завод

определившие указанное различие в весе проб. Одна из определяющих причин заключается в значительно меньшей окисленности шлаков в опытах с вдуванием пылеугольного топлива. Из рис. 27 видно, что содержание оксида железа в опытах с вдуванием топлива было ниже в 2 раза, чем в сопоставимых (точки 0,0–1,0 м). Аналогичные, хотя менее четко выраженные, зависимости были получены для содержания серы и щелочи ($K_2O + Na_2O$) в шлаке: при вдува-

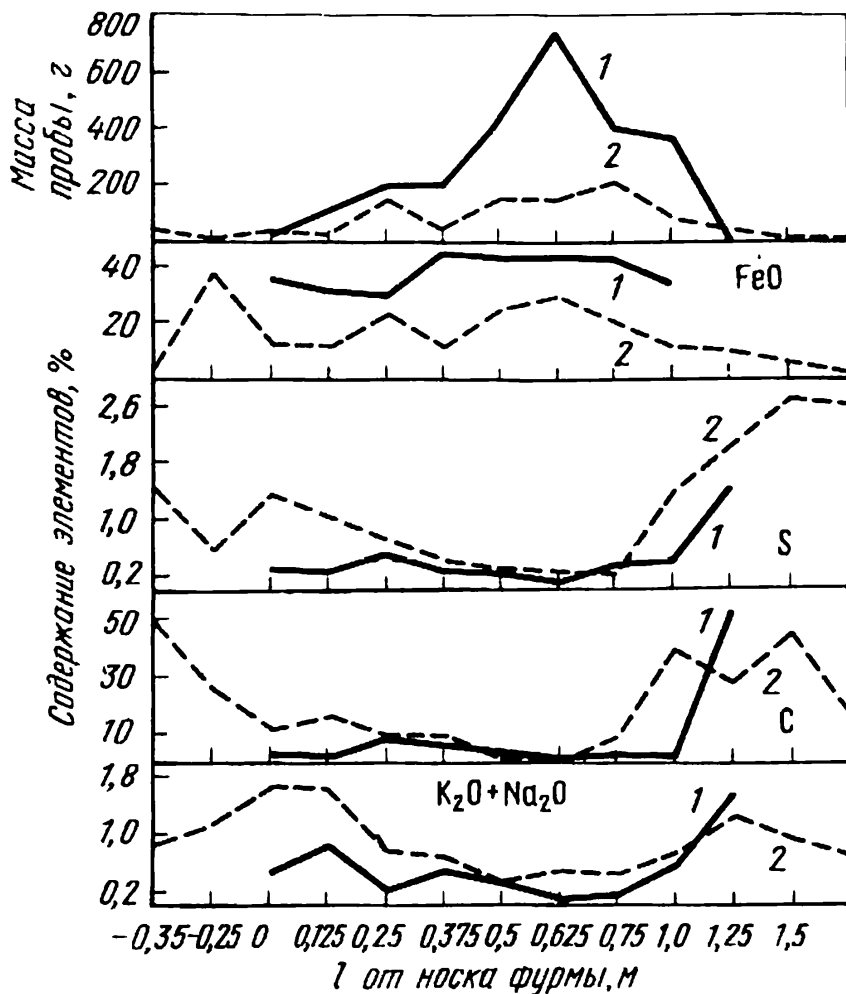


Рис. 27. Масса и химический состав проб материалов, отобранных из горна при работе доменной печи с вдуванием (1) и без вдувания (2) пылеугольного топлива

нии в горн топлива содержание в шлаке этих материалов выше, чем в пробах сопоставимых экспериментов (см. рис. 27).

Химический состав проб чугуна и кокса из фурменной зоны при вдувании топлива приведен в табл. 16. На основании этих данных можно говорить о более высоком содержании кремния и серы в чугуне в опытах с вдуванием топлива.

На наш взгляд, установленные особенности прежде всего можно объяснить значительно меньшим вторичным окислением железа чугуна в фурменных зонах вследствие меньшего содержания кислорода в газовой фазе фурменной зоны, а также меньшей температурой газовой фазы, иными словами, меньшим окислительным потенциалом фурменной зоны. Соответственно меньшее окисление железа и переход в шлак оксида железа определяют в опытах с вдуванием топлива уменьшение выхода порошкообразных материалов. Указанное же изменение предотвращает изменение концентрации ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) и S в поступающем в фурменные зоны шлаке.

Относительно высокое содержание серы в чугуне в опытах с вдуванием топлива, по-видимому, можно объяснить в пределах фурмен-

Таблица 16. Химический состав чугуна, отобранного из горна доменной печи при работе с вдуванием и без вдувания пылеугольного топлива

Точки ввода трубы, м	Масса пробы, г, без пылеугольного топлива/с пылеугольным топливом	Si, %		Mn, %		S, %	
		без пылеугольного топлива	с пылеугольным топливом	без пылеугольного топлива	с пылеугольным топливом	без пылеугольного топлива	с пылеугольным топливом
-0,125	-/1,3	-	-	-	-	-	0,184
0	-/2,0	-	2,04	-	-	-	0,39
+0,125	2,7/-	1,1	-	-	-	0,192	-
+0,250	-/-	-	-	-	-	-	-
0,375	-/6	-	-	-	0,416	-	0,296
0,5	1,0/13,7	-	2,62	-	0,2	0,085	0,335
+0,625	-/21	-	1,56	-	0,123	-	0,19
+0,75	5,7/19,6	1,3	2,49	-	0,145	0,17	0,295
+1,0	12,40/7,5	0,99	1,57	0,114	0,249	0,205	0,432
1,25	1,15/7	-	2,23	-	-	0,349	0,434

ной зоны значительным локальным повышением концентрации серы в горновом газе, определенном соответственным увеличением прихода в горн серы за счет газификации пылеугольного топлива.

Таким образом, существенно меньший окислительный потенциал фурменных зон при вдувании пылеугольного топлива, определяемый интенсивным и, в конечном счете, полным сгоранием пылеугольного топлива на периферии горна, подтверждается как прямыми исследованиями полноты сгорания пылеугольного топлива и химического состава горнового газа, так и косвенными данными, представленными количеством и химическим составом порошкообразных материалов, отобранных из горна.

Следствием полного сгорания пылеугольного топлива и уменьшения окислительного потенциала фурменных зон могут быть следующие благоприятные изменения:

полное сгорание топлива в пределах фурменных зон исключает или затрудняет возможность попадания порошкообразного углерода в шлак, поры кокса и т.д., что исключает возможность нарушения дренажной способности горна и создает объективные предпосылки для дальнейшего эффективного увеличения расхода дополнительного топлива;

значительное снижение окислительного потенциала фурменных зон, усиленное снижением показателя прямого восстановления закиси железа, также определяемым вдуванием пылеугольного топлива, способствуют уменьшению прихода в нижнюю высокотемпературную

зону горна интенсивного охладителя — оксида железа, что может способствовать улучшению нагрева продуктов плавки, восстановления кремния и марганца, десульфурации чугуна.

В то же время повышение содержания серы в горновом газе, определенное соответственным увеличением ее прихода за счет сгорания пылеугольного топлива, способствует повышению ее содержания в чугуне.

Уменьшение окислительного потенциала фурменных зон, некоторое снижение действительной температуры горновых газов и прихода в горн оксида железа могут способствовать расширению протяженности фурменных зон по содержанию диоксида углерода.

При прочих равных условиях перечисленные изменения могут способствовать улучшению схода шихты, снижению потребности тепла в горне и, таким образом, получению дополнительной экономии кокса, росту производительности печи, т.е. в итоге повышению эффективности применения пылеугольного топлива.

Особенности процесса десульфурации чугуна

При работе доменной печи с вдуванием в горн пылеугольного топлива имеют место следующие принципиальные особенности процесса десульфурации чугуна: кокс, содержащий первоначально 1,2–1,6 % S и расход которого при вдувании пылеугольного топлива составляет 400–450 кг/т чугуна, поступает в фурменные зоны, потеряв 50 % и более серы. В то же время пылеугольное топливо, расход которого в благоприятных шихтовых условиях может составить 100 кг/т чугуна и более, содержит в среднем 1,5–2,0 % S, которая полностью переходит в газовую фазу фурменных зон. Следовательно, количество серы, переходящей в газовую фазу фурменной зоны при вдувании в горн пылеугольного топлива, может возрасти на 50–100 %, что в первую очередь может способствовать повышению содержания серы в чугуне, проходящем через эти зоны.

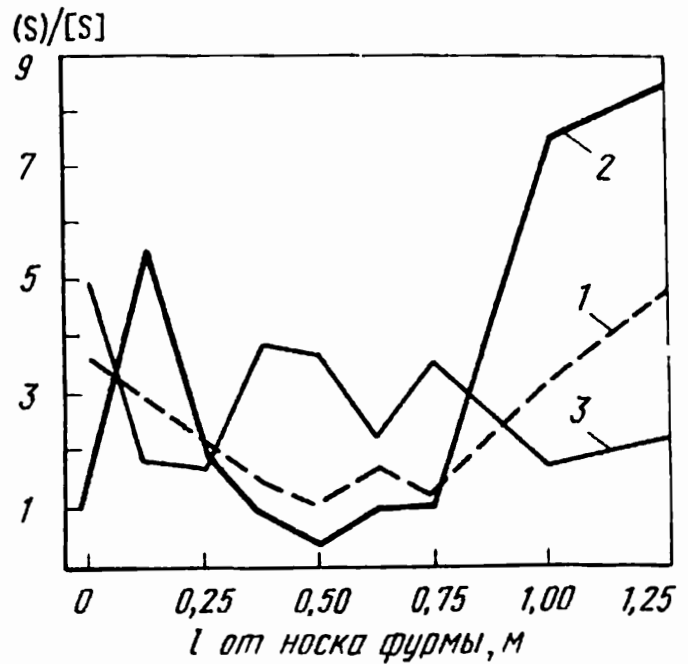
Проведенные исследования подтвердили значительное (почти вдвое) повышение содержания серы в чугуне в данных технологических условиях (см. табл. 16). Содержание серы в шлаке в этой зоне также повысилось, что подтверждает ее интенсивное поглощение из газовой фазы.

Расчеты, выполненные по методике В.И. Явойского и Н.М. Чуйко, показали, что между чугуном и шлаком в фурменных зонах практически достигается равновесие, причем величина коэффициента распределения серы на порядок ниже (4–8 единиц), чем в конечном шлаке (рис. 28, 29). Последнее обстоятельство определяется окислительной средой фурменных зон и высоким содержанием оксида железа в шлаках (см. рис. 27, 28; табл. 16) [105, 106].

Неблагоприятное изменение при вдувании в горн пылеугольного

Рис. 28. Изменение коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком по длине фурменной зоны при работе доменной печи с вдуванием пылеугольного топлива:

1 — экспериментальные данные; 2 — по методике В.П. Явойского; 3 — по методике Н.М. Чуйко



топлива баланса прихода серы в фурменные зоны в определенной мере нейтрализуется снижением содержания в шлаках фурменных зон оксида железа, улучшением условий нагрева продуктов плавки и возможным повышением их температуры. Видимо, эти обстоятельства и определяют при вдувании в горн на 1 т чугуна до 100 кг пылеугольного топлива сохранение на исходном уровне качества чугуна по содержанию серы при равном ее приходе в печь с шихтой [107].

Однако при увеличении расхода пылеугольного топлива более 100 кг/т чугуна, существенно более высоком, чем в коксе, содержании в топливе серы, что вероятно в условиях Донбасса, качество чугуна может ухудшиться, что потребует повышения общей основ-

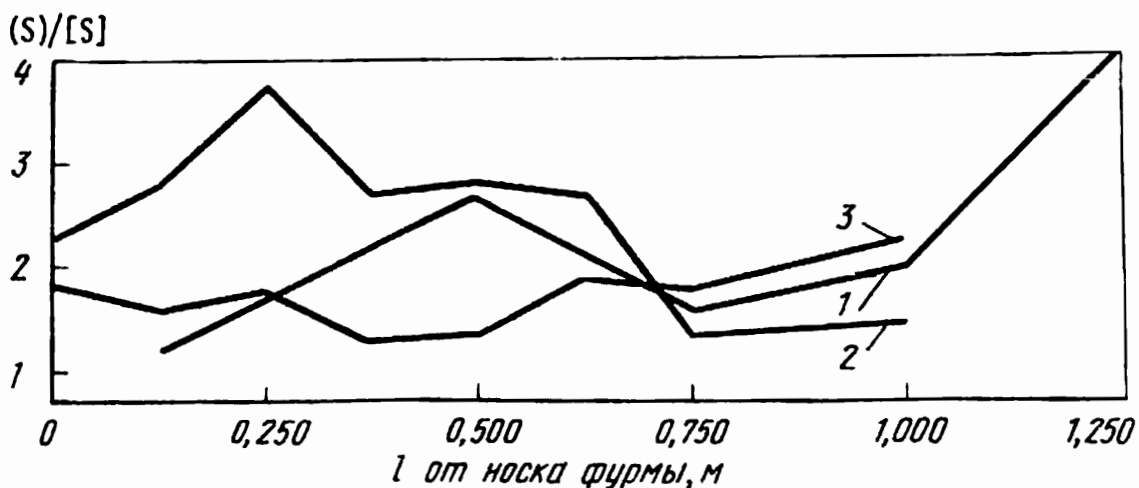


Рис. 29. Изменение коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком по длине фурменной зоны при работе доменной печи без вдувания пылеугольного топлива:

1 — экспериментальные данные; 2 — по методике В.П. Явойского; 3 — по методике Н.М. Чуйко

ности шлака, расхода флюса и соответственно может существенно снизить эффективность применения пылеугольного топлива.

Более эффективным для решения поставленной задачи может быть вдувание в горн топливно-флюсовых смесей, создающих возможность локального (в фурменных зонах и слое шлака под ними) значительного повышения основности, жидкоподвижности и десульфуризирующей способности шлаков.

Для реализации процесса предложены топливно-флюсовые смеси, содержащие известь, плавиковый шпат, марганецсодержащие материалы. Формирующийся из таких смесей шлак имеет температуру плавления 1100–1200 °С, может быть перегрет в горне до 1550–1650 °С, что позволит повысить коэффициент распределения серы в раскисленном шлаке под фурменными зонами до 100–200 единиц [110, 111].

Для интенсификации процессов горения пылеугольного топлива и десульфурации чугуна предложено использовать топливные смеси, содержащие азотнокислый кальций или аммоний [110].

С целью улучшения десульфурации чугуна и повышения эффективности применения дорогих и дефицитных компонентов смеси (марганец- и фторсодержащих материалов) шлакообразующие добавки вводили после закрытия чугунной летки совместно с пылеугольным топливом в течение 10–20 % времени между выпусками чугуна в количестве 0–100 кг/т чугуна при соотношении компонентов 1:(0,4–0,8). Такой способ введения шлакообразующих материалов позволил сформировать на поверхности чугуна слой активного шлака, характеризующегося повышенными температурой, основностью и десульфуризирующей способностью, через который будет проходить практически весь чугун выпуска [111].

3.4. Баланс нефтепродуктов и масел

В ходе освоения промышленной установки было установлено наличие большего количества (до 6,2–11,4 кг/т чугуна) масел и нефтепродуктов в чистом газе и воде после скруббера.

Известны случаи значительного увеличения содержания нефтепродуктов в чистом колошниковом газе и отстойном бассейне вследствие неполного сгорания в фурменных зонах мазута и пылеугольного топлива, вдуваемых в горн с дутьем [57].

В связи с изложенным было высказано предположение о наличии подобного явления на доменных печах № 1 и 2 ДМЗ при вдувании пылеугольного топлива. Данное предположение объясняло трудности первого этапа освоения промышленной установки и соответствующей технологии.

Для выяснения причин наличия в чистом газе и воде после скруббера больших количеств масел и нефтепродуктов (6,2–11,4 кг/т

Т а б л и ц а 17. Балансы масляных выделений на доменной печи № 1 с различными расходами металлодобавок и угольной пыли

Период	Материалы	Расход, Содержание			Материалы	Расход, Содержание		
		кг/т чугуна	масел в ед. материала, %	Количес- во масел в материале, кг/т чугуна		кг/т чугуна	масел в ед. материала, кг/м ³	Количество масел в мате- риале, кг/т чугуна
	<i>Приход</i>					<i>Расход</i>		
I	Металлодобавка	202,6	3,44	6,97	Колошниковый газ	2373,2	$32,5 \cdot 10^{-6}$	0,08
	Угольная пыль	45,0	0,32	0,14	Вода газоочистки	2,35	3,09	7,27
	Итого	—	—	7,11	Итого	—	—	7,35
II	Металлодобавка	208,5	4,9	10,23	Колошниковый газ	2450,4	$23,3 \cdot 10^{-6}$	0,06
	Угольная пыль	62,4	0,32	0,2	Вода газоочистки	2,4	4,85	11,6
	Итого	—	—	10,41	Итого	—	—	11,66
III	Металлодобавка	0	0	0	Колошниковый газ	2865,9	$5,9 \cdot 10^{-6}$	0,02
	Угольная пыль	36,8	0,32	0,12	Вода газоочистки	2,87	0,116	0,333
	Итого	—	—	0,12	Итого	—	—	0,35
IV	Металлодобавка	193,1	5,9	11,4	Колошниковый газ	2160,3	$83,4 \cdot 10^{-6}$	0,18
	Угольная пыль	0	—	—	Вода газоочистки	2,18	6,33	13,8
	Итого	—	—	11,4	Итого	—	—	13,98
V	Металлодобавка	196,1	3,1	6,08	Колошниковый газ	2281,0	$22,7 \cdot 10^{-6}$	0,052
	Угольная пыль	37,7	0,32	0,12	Вода газоочистки	5,01	1,27	6,39
	Итого	—	—	6,20	Итого	—	—	6,44

чугуна) были проведены опытные плавки, на основании которых составлены материальные балансы. Для составления балансов были организованы ежесуточные отборы проб сырых материалов, воды до и после скруббера, чистого доменного газа и т.д. В указанных пробах выполнены определения содержания масел и нефтепродуктов.

Установлено, что практически все масла вносятся в печь металлодобавкой, содержащей их от 3 до 6 %. При выводе металлодобавки из шихты выход масел снизился в 20 раз, т.е. до уровня погрешности определения (табл. 17). Отобранные пробы масел из металлодобавки и отходящей воды после скруббера оказались идентичными по минералогическому составу. В пробах воды после скруббера отсутствовали смолы, в том числе и каменноугольные. Анализ проб материалов и газа, отобранных из разных точек фурменной зоны, также показал отсутствие в них масел и смол. В то же время, очевидно, масла из металлодобавок, поступающие в восстановительную среду колошника доменной печи, под влиянием высоких температур полностью возгоняются и переходят в колошниковый газ.

Исследованы особенности распределения углерода между продуктами доменной плавки: при вдувании в горн пылеугольного топлива потери углерода со шлаком и колошниковой пылью не увеличились. В указанных продуктах плавки не обнаружено частиц углерода, подобных по размерам, форме и структуре частицам пылеугольного топлива.

Полученные данные подтверждают, что при расходе до 80 кг пылеугольного топлива на тонну чугуна была обеспечена практически полная его газификация в доменной печи.

3.5. Оперативное регулирование теплового режима доменной плавки

Регулирование теплового состояния доменной печи "сверху" связано со значительным запаздыванием во времени, обусловленным перемещением шихтовых материалов по высоте печи, и инерционностью тепловых процессов. Для повышения качества регулирования "верхние" регулирующие воздействия необходимо сочетать с воздействиями "снизу", которые практически не имеют временного запаздывания.

Среди методов регулирования теплового состояния доменной печи "снизу" наряду с изменением температуры и влажности дутья наиболее экономичным и перспективным является изменение расхода вдуваемых в горн газообразных, жидких и твердых топлив.

Для создания системы регулирования теплового состояния печи с использованием управляющих воздействий "снизу" исследовали динамику доменного процесса по предлагаемым каналам управления.

Установлен сложный характер влияния изменения расхода природ-

ного газа и мазута на содержание кремния в чугуна. Так, увеличение расхода природного газа или мазута сначала вызывает понижение нагрева горна и уменьшение содержания кремния в чугуна. Через некоторое время в связи с интенсификацией хода восстановительных процессов в печи начинает проявляться вторичный эффект, заключающийся в повышении нагрева горна.

Полный эффект регулирования содержания кремния в чугуна изменением расхода природного газа достигается через 10–16 ч.

Сложный и длительный характер переходных процессов при изменении расходов природного газа и мазута затрудняет использование этих топливных добавок для оперативного регулирования нагрева горна печи.

Пылеугольное топливо, близкое по химическому составу к коксу, не вызывает существенных изменений в составе и количестве фурменных газов, поэтому изменение его расхода должно влиять на содержание кремния в чугуна по менее сложному закону.

Однако достаточного количества надежных данных о связи между расходом пылеугольного топлива и тепловым состоянием печи пока не накоплено. На практике пылеугольное топливо используется лишь в качестве заменителя кокса и, как правило, лишь при ровном ходе и нормальном нагреве печи.

Экспериментальные исследования влияния динамических свойств пылеугольного топлива на тепловой режим доменной плавки проводили на доменной печи № 2 ДМЗ [112].

В период исследований пылеугольное топливо подавали в печь через 9–11 фурм из 14, что обеспечивало достаточно равномерное его распределение по окружности горна.

Динамические свойства пылеугольного топлива исследовали, проводя скачкообразные изменения его расхода на входе объекта по отношению к одному изучаемому параметру (расходу угольной пыли) при сохранении значений других регулирующих параметров на прежнем уровне. Эксперимент продолжали до достижения нового установившегося значения содержания кремния в чугуна.

Для проведения экспериментов выбирали периоды, когда на протяжении 2–3 выпусков не было тенденции к изменению нагрева печи и колебания содержания кремния в чугуна были незначительными.

Все контролируемые параметры представлялись в виде развертки информации о работе доменной печи во времени. Дискретные значения параметров, регистрируемых контрольно-измерительными приборами, усредняли за 15–60 мин работы печи.

За период исследований расход пылеугольного топлива скачкообразно изменяли 20 раз (в сторону увеличения и снижения).

Полученные усредненные кривые переходных процессов изменения

содержания кремния в чугуна с достаточной степенью точности могут быть описаны апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием. Динамическими характеристиками такого звена являются время чистого запаздывания τ_0 , коэффициент передачи объекта K и постоянная времени T .

Уравнение переходного процесса по исследуемому каналу с использованием вышеприведенных обозначений может быть представлено в виде [113]:

$$X_{\text{вых}} = KX_{\text{вх}} [1 - e^{-(\tau - \tau_0)/T}], \quad (39)$$

где $X_{\text{вх}}$, $X_{\text{вых}}$ — соответственно величины регулирующего и выходного параметров; τ — текущий момент времени.

Численные значения динамических характеристик определяли методом наименьших квадратов. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что скачкообразное изменение расхода пылеугольного топлива сказывается на содержании Si в чугуна уже на следующем выпуске после нанесения возмущения. Время запаздывания переходного процесса составляет 0,5 ч. В реальных условиях доменной плавки этой величиной можно пренебречь; постоянная времени τ составляет 3,5 ч. Полный эффект регулирования практически достигается через 8–9 ч (в среднем на третьем выпуске). Содержание кремния в чугуна при этом изменяется на 0,13; 0,25 и 0,33 % при изменении расхода угольной пыли соответственно на 1,2 и 3 т/ч. Следовательно, $K = 0,11 \div 0,13$ % Si на 1 т/ч, что приблизительно соответствует 0,07–0,10 % Si на 10 кг/т чугуна.

Таким образом, уравнение переходного процесса изменения содержания кремния в чугуна при изменении расхода пылеугольного топлива записывается в виде:

$$\Delta Si = 0,085 \Delta G_{\text{пут}} (1 - e^{-(\tau - 0,5)/8,5}), \quad (40)$$

где $\Delta G_{\text{пут}}$ — изменение расхода пылеугольного топлива, кг/т; τ — текущее время от момента нанесения возмущения, ч.

Теснота связи содержания кремния в чугуна с изменением расхода пылеугольного топлива характеризуется коэффициентом корреляции $r = 63$ %.

Динамические характеристики пылеугольного топлива исследовали на доменной печи № 1 объемом 1033 м³.

Влияние пылеугольного топлива на нагрев горна оценивали по изменению содержания кремния в чугуна, а также температуры чугуна на выпуске. Для автоматического непрерывного измерения температуры чугуна на выпуске был установлен агрегатный комплекс АПИРС, бесконтактно контролирующей температуру поверхности наг-

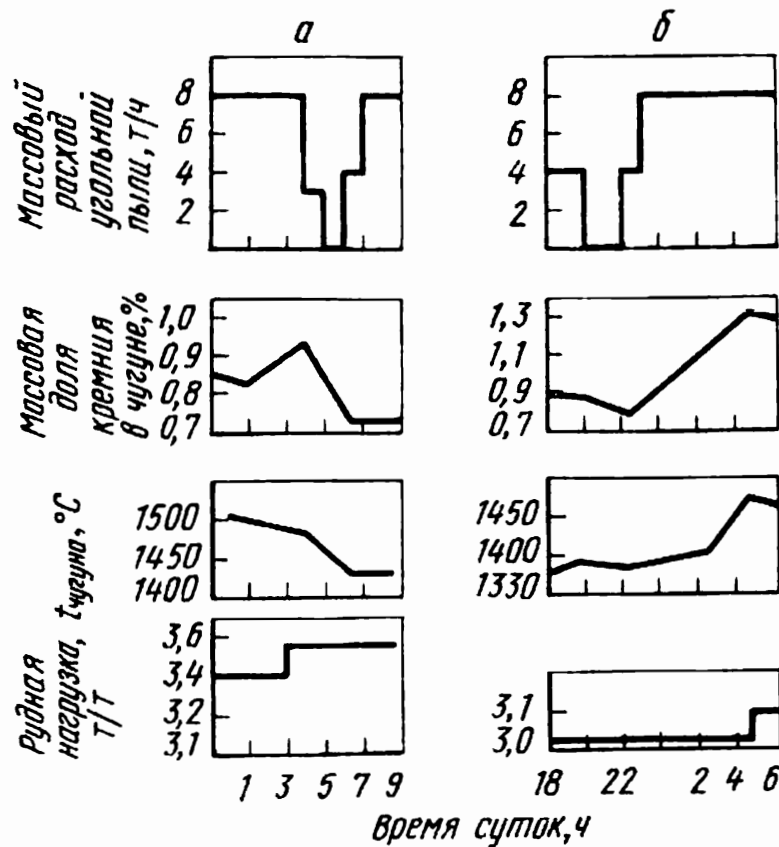


Рис. 30. Влияние закрытия подачи пылеугольного топлива на температуру чугуна и массовую долю в нем кремния/ (периоды работы доменной печи № 1 ДМЗ): а – 2.12.84 г.; б – 16–17.12.84 г.)

ретьх тел по их тепловому электромагнитному излучению [114]. Суммарная приведенная погрешность показаний комплекса не превышала 1,5 %. Измеряемая температура чугуна автоматически записывалась на стандартном самопишущем приборе КСП-3п.

На рис. 30–32 представлена динамика изменения содержания кремния Si в чугуне, температуры чугуна второй половины выпуска $t_{\text{чуг}}$ и средней за выпуск температуры чугуна $t_{\text{чуг}}^{\text{ср}}$ при скачкообразном изменении расхода пылеугольного топлива $G_{\text{пуг}}$.

В течение двух выпусков, предшествующих началу вдувания пыли, содержание кремния в чугуне и его температура оставались неизменными.

Значения других параметров комбинированного дутья в рассматриваемый период, а также в предшествующие сутки не изменились.

В результате увеличения расхода угольной пыли на 2,25 т/ч и уменьшения рудной нагрузки на 0,06 т/т содержание кремния в чугуне повысилось на 0,5 %. Поскольку количественное влияние рудной нагрузки на содержание кремния в чугуне известно, то определенная расчетным путем доля влияния пылеугольного топлива на содержание в чугуне кремния в полученном эффекте составляет 0,20–0,25 %.

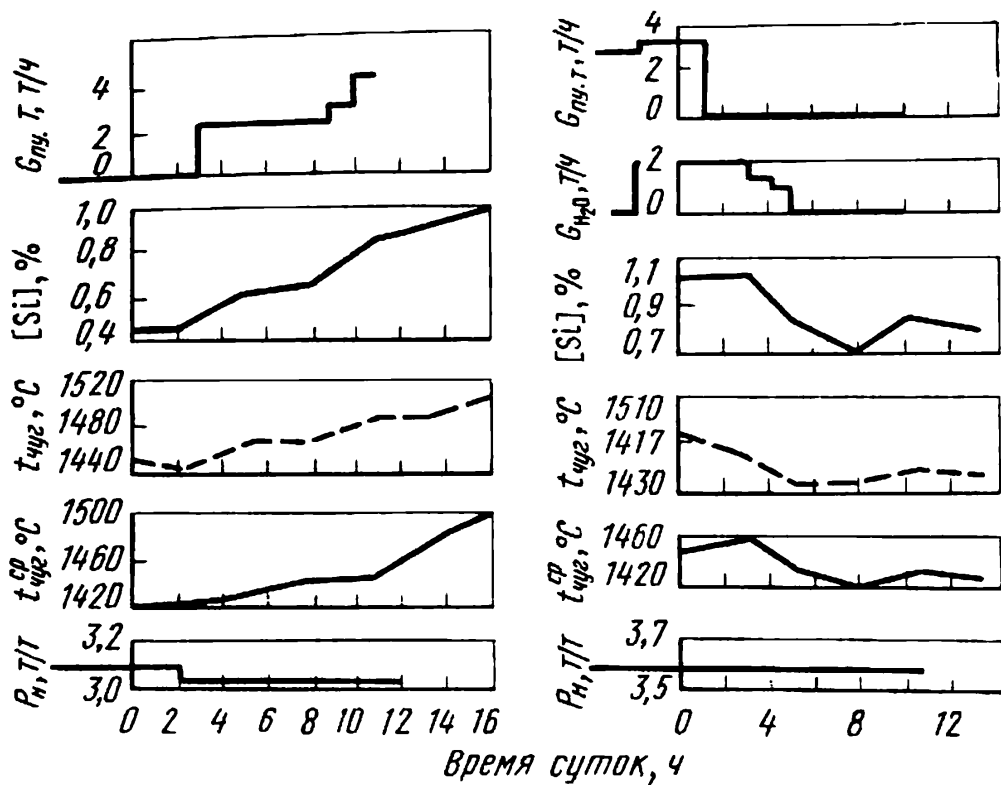


Рис. 31. Влияние увеличения расхода угольной пыли на содержание кремния в чугуне и его температуру

Рис. 32. Влияние прекращения вдвухания угольной пыли и водяного пара на содержание кремния в чугуне и его температуру

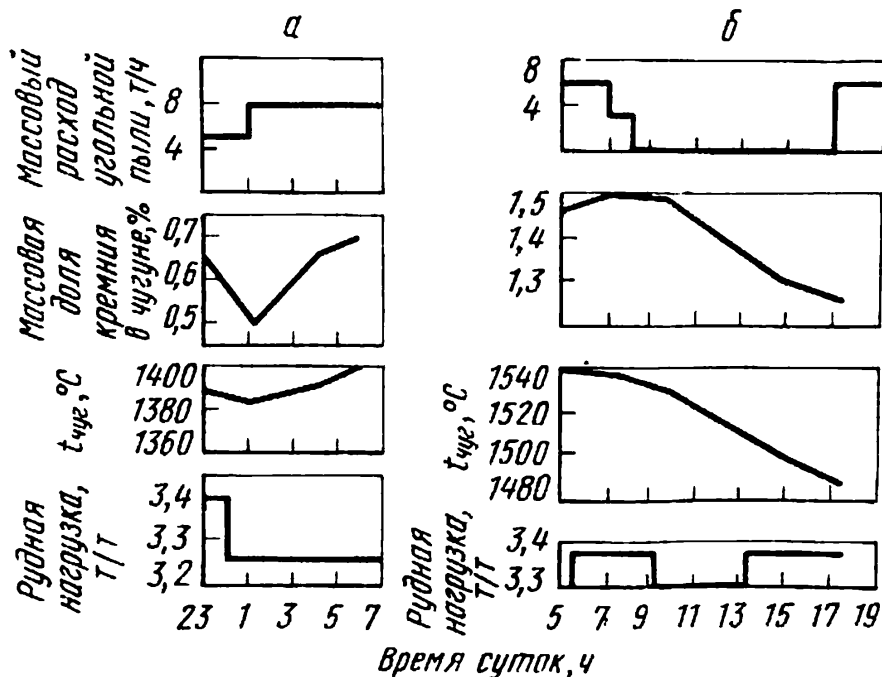


Рис. 33. Влияние времени прекращения подачи пылеугольного топлива на температуру чугуна и массовую долю в нем кремния (периоды работы доменной печи № 1 ДМЗ:
а - I ; б - II)

Температура чугуна устойчивого периода второй половины выпуска $t_{\text{чуг}}$ увеличилась на 40–50 °С через 8–10 ч после изменения расхода угольной пыли.

На рис. 33 иллюстрируется динамика изменения химического и физического нагрева чугуна при отключении подачи в печь пылеугольного топлива. В связи с повышенным нагревом печи за 3 ч до прекращения вдувания пыли был открыт подвод пара на увлажнение $G_{\text{H}_2\text{O}}$ в количестве 2 т/ч. Другие параметры дутья, а также рудную нагрузку в течение исследуемых и предшествующих суток не изменяли.

Таким образом, снижение содержания кремния в чугуне на 0,35 % и температуры чугуна на 35–40 °С явилось результатом совместного воздействия прекращения вдувания пылеугольного топлива (сокращение его расхода в среднем на 3 т/ч) и увеличения расхода пара на 2 т/ч.

С 1982 г. на доменных печах № 1 и 2 изменение расхода пылеугольного топлива стали систематически применять для корректировки нагрева горна и содержания в чугуне кремния. В частности, при "горячем" ходе печи практикуется закрытие подачи пылеугольного топлива на 1–4 ч до значительного снижения или восстановления оптимального уровня нагрева горна.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о более простом характере переходного процесса изменения содержания кремния в чугуне при регулировании нагрева расходом пылеугольного топлива, чем при изменении расхода природного газа или мазута. В сочетании с высокой динамичностью угольной пыли это определяет ее преимущества при необходимости оперативного регулирования теплового состояния горна доменной печи.

Пылеугольное топливо в смеси со шлаксообразующими материалами может использоваться также для оперативного комплексного воздействия на нагрев горна и основность конечного шлака.

4. РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Технология доменной плавки с применением пылеугольного топлива была разработана на доменных печах № 1, 2, 3 ДМЗ в ходе освоения и промышленной эксплуатации опытно-промышленной и промышленной установок для приготовления и вдувания пылеугольного топлива.

4.1. Условия и ход освоения технологии доменной плавки

Разработку и освоение технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива проводили на типовых доменных печах № 1; 2; 3 ДМЗ полезным объемом 1033, 1033 и 700 м³. Эти печи работали с применением природного газа, повышенным (0,11–0,12 МПа), а № 3 – обычным (0,01 МПа) давлением колошникового газа, были обеспечены нагретым до 1050–1100 °С дутьем, которое периодически обогащалось до 22–23 % кислородом. Состояние печей в период проведения исследований было, как правило, удовлетворительным [17].

При вдувании пылеугольного топлива доменные печи № 1; 2; 3 выплавливали маломарганцовистый передельный чугун из привозного подготовленного сырья: агломерата ЮГОК, окатышей ЦГОК и ПГОК.

Т а б л и ц а 18. Химический и гранулометрический состав пылеугольного топлива, используемого на Донецком металлургическом заводе

Показатели	Год проведения плавок					
	1970	1971	1972	1981	1982	1983
Марка угля	ПАРШ	Т	Т	Антрацит и Т	Т	Т
Технический анализ угля, %:						
зола	19,7	11,0	11,95	17,37	13,3	8,1
сера	2,06	1,71	1,72	1,53	1,86	1,83
летучие	7,71	7,49	6,6	–	–	–
влага	–	5,55	0,33	0,26	0,35	0,37
		(уголь)	(пыль)			
Химический состав золы угольной пыли, %:						
SiO ₂	52,8	46,3	46,5	49,3	44,9	34,8
CaO	4,3	3,5	3,8	3,88	5,32	9,22
Al ₂ O ₃	21,9	23,1	26,6	21,9	23,8	18,9
Fe ₂ O ₃	17,9	16,1	17,1	14,9	18,6	19,0
MgO	2,1	1,78	1,88	1,89	1,90	3,29
P ₂ O ₅	0,23	0,243	0,257	0,293	0,419	0,316
(Na ₂ O+K ₂ O)	1,4	9,0	–	0,75	0,43	0,30
Фракционный состав угольной пыли, %:						
> 0,60 мм	0,4	0	0	–	–	–
0,60–0,42 мм	1,0	0,1	0,17	–	–	–
0,42–0,105	54,6	42,71	50,2	–	–	–
0,105–0,075	30,1	39,25	36,5	–	–	–
0,075–0,067	6,0	7,14	6,7	–	–	–
< 0,056	7,9	10,8	6,0	–	–	–
> 0,080	–	–	–	9,6	21,7	24,2
0,080–0,063	–	–	–	11,6	–	–
< 0,063	–	–	–	78,8	–	–
0,080–0,071	–	–	–	–	12,6	10,0
< 0,071	–	–	–	–	65,7	65,8

В качестве марганецсодержащих материалов использовали никопольские карбонатные, низкосортные чистурские руды, а в последние годы — шлаки силикомарганца и шлаковую корку — отходы производства Харцызского трубосварочного завода [59, 119].

Основным видом топлива был кокс Донецкого коксохимического завода. Качество кокса в 1980—1986 гг. снизилось по механической прочности и фракционному составу, что объясняется ухудшением угольной сырьевой базы и снижением в коксошихте доли коксующихся углей до 9—12 % [59]. Для вдувания в горн использовали природный газ Ставропольского месторождения. Для приготовления пылеугольного топлива использовались угли Донецкого бассейна марок ПАРШ и А, а также Т — рядовой и концентрат. Угли ПАРШ и А использовали в периоды освоения опытно-промышленной и промышленной установок вдувания. В условиях установившейся эксплуатации использовали концентрат угля марок Т Моспинской, Колосниковской и Чумаковской ЦОФ (табл. 18). С апреля 1982 г. концентрат угля марки Т Чумаковской ЦОФ отгружали согласно временным "Техническим условиям на уголь для приготовления пылеугольного топлива для доменных печей", согласно которым зольность концентрата оговорена пределами 7,4—8,0 %, а содержание серы 2,0—2,5 %. Фракционный состав пылеугольного топлива, определенный рассевом на ситах, представлен в табл. 18 [17, 59].

Из табл. 18 видно, что обе установки обеспечивали тонкий помол пылеугольного топлива. Замена азробильных мельниц опытно-промышленной установки шаровыми барабанными промышленной сопровождалась улучшением фракционного состава топлива прежде всего за счет уменьшения доли крупных фракций ($> 0,071$ — $0,08$ мм).

В табл. 19 представлены результаты определения фракционного состава пылеугольного топлива седиментационным методом за длительный период работы промышленной установки на концентрате Чумаковской ЦОФ. Характерной особенностью этих данных является существенно более тонкий помол топлива по сравнению с аналогичными результатами, полученными на ситах. Выход топлива с содержанием фракций $< 0,050$ мм оказался в несколько раз большим (72, 44%).

Полученный седиментационным методом размер частиц качественно подтверждается и макроструктурным анализом, выполненным с помощью структурного анализатора "Эпиквант".

Стабильный режим работы узла для приготовления топлива был достигнут в период, когда среднее содержание фракций $< 0,05$ мм составляло 62,2—81,7 %; доля фракций $> 0,10$ мм — 4,80÷13,31 %. Характерно, что наравне со значительной долей крупных фракций ($> 0,063$ мм — 18,1 %) в пылеугольном топливе имеется значительная доля очень мелких фракций. Так, доля топлива фракцией

Т а б л и ц а 19. Фракционный состав пылеугольного топлива из концентрата угля

Показатели	Ситовый анализ, мм					Седименто
	0,100	0,100— 0,063	0,063— 0,050	0,050—0	0,050— 0,040	
Содержание, %:						
минимальное	4,8	6,06	7,0	62,16	0	2,4
максимальное	13,31	14,27	12,07	81,68	34,3	14,8
среднее	8,58	9,49	9,43	72,44	7,14	4,99

< 0,01 мм изменялась от 21,99 до 46,68 % (средняя 34,42 %). Значительна даже доля фракций < 0,002 мм: до 18,01 % (средняя 5,36 %).

Полученный размер частиц отвечает требованиям, предъявляемым к пылеугольному топливу прежде всего исходя из условия обеспечения его полного сгорания в пределах фурменных зон [11, 26, 38].

По выполненным рассевам была рассчитана удельная поверхность топлива — показатель, функционально связанный со скоростью его горения.

Из приведенных в табл. 19 данных видно, что в 3-месячный период устойчивой работы установки отдельные значения данного показателя отличались от среднего на 200—250 %.

Приведенные данные свидетельствовали о значительной неоднородности фракционного состава получаемого пылеугольного топлива, что препятствовало совершенствованию и оптимизации режима пневмотранспорта, а также сгорания топлива в фурменной зоне.

В отдельные периоды было обеспечено более тонкое измельчение пылеугольного топлива — доля топлива фракцией < 0,05 мм повышалась до 91,6 %. Однако при относительно малом расходе топлива (40—60 кг/т чугуна) такое тонкое измельчение оказалось излишним: не было отмечено улучшения условий пневмотранспорта, более полного сгорания топлива и других преимуществ. В то же время значительно снизилась производительность шаровых мельниц, увеличились потери угля, ухудшилась надежность работы установки по пожаробезопасности.

Исследованиями показано, что в подавляющем большинстве случаев форма частиц топлива — осколочная, неправильная, что определяет повышение удельной поверхности топлива (рис. 34). При работе установки на одном виде угля (концентрате Чумаковской ЦОФ) удалось обеспечить получение относительно стабильных влажности и химического состава пылеугольного топлива (см. табл. 18).

Опытно-промышленная установка для вдувания пылеугольного топ-

марки Т

метрический анализ, %					Насып- ная масса, г/см ³	Удель- ная по- верхно- сть м ² /г	Средний размер частиц, мм
0,020— 0,010	0,010—0	0,010— 0,005	0,005— 0,002	0,002—0			
12,1	20,99	9,33	4,0	0,3	0,441	0,1604	—
43,48	46,68	28,03	13,17	18,01	0,5259	0,7596	—
25,84	34,42	19,67	9,14	5,36	0,481	0,2829	0,0363

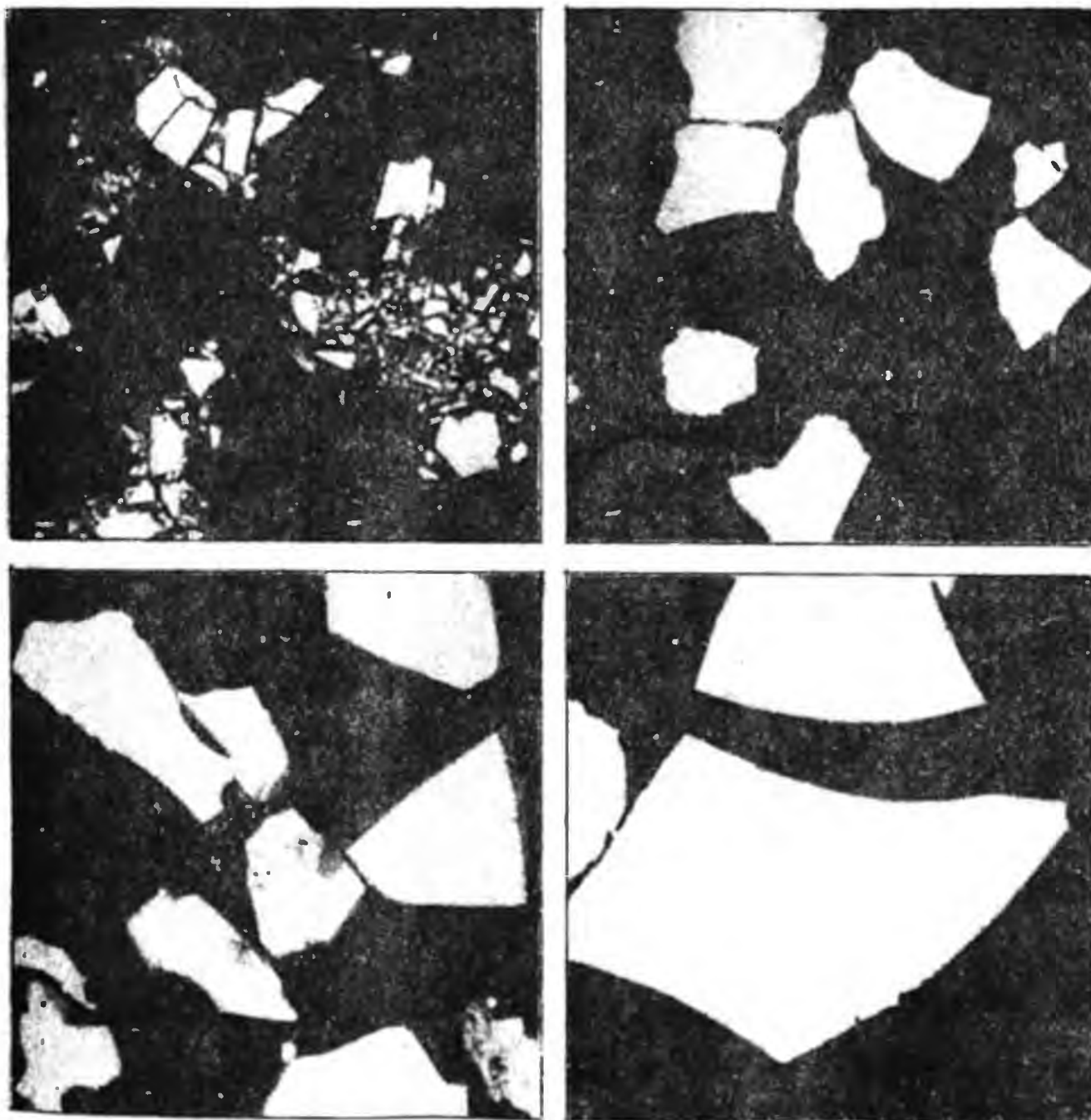


Рис. 34. Форма частиц пылеугольного топлива размером:
 1 — менее 0,05 мм; 2 — 0,063—0,5 мм; 3 — 0,5—0,1 мм; 4 — более 0,1 мм

лива работала в весенне-летне-осенний период по 4–7 месяцев. Основные опытные плавки и исследования технологического режима выплавки передельного чугуна были проведены на доменной печи № 3. Для опытно-промышленной установки мощностью 70–80 т/сут пылеугольного топлива были использованы 2 азробильные мельницы действующего котельного цеха, а также здание деазраторной доменной печи № 2 для размещения распределительно-дозировочного отделения [18, 26, 120].

Промышленная установка приготовления и вдувания пылеугольного топлива в доменные печи № 1 и 2 была построена в 1978–1980 гг. и сдана в эксплуатацию в мае 1980 г. [17, 48, 50, 96, 120].

Совершенствование технологии выплавки передельного чугуна осуществлялось в основном на доменной печи № 1.

В 1982–1984 гг. на доменной печи № 1 освоен проектный уровень установки по расходу пылеугольного топлива: 65 кг на 1 т чугуна [48, 117, 121].

С 1982 г. на доменной печи № 1 $> 90\%$ чугуна выплавляется с применением пылеугольного топлива.

4.2. Разработка и оптимизация технологии выплавки чугуна с вдуванием пылеугольного топлива с использованием опытно-промышленной установки

Разработка и оптимизация технологии выплавки передельного чугуна

В 1969–1972 гг. на доменной печи № 3 внедрены мероприятия, позволившие усовершенствовать технологический режим плавки:

сокращено содержание в шихте агломерата из резерва (со склада); снижена доля шлаков основностью выше 1,35 до 10–20 %;

улучшен отсев мелочи из кокса;

повышена эффективность применения природного газа за счет оптимизации расхода, улучшения способа ввода, внедрения системы автоматического равномерного распределения по фурмам;

внедрено измерение "частных" перепадов давления газов в печи: горн — шахта и шахта — колошник;

увеличено количество выпусков чугуна до девяти в сутки и доля нижнего шлака до 50 %;

снижена неравномерность подачи угольной пыли по фурмам за счет увеличения числа фурм с подачей угольной пыли до 12, внедрения азрационных питателей и приборов контроля расхода топлива, выравнивания гидравлических сопротивлений трасс;

повышена до 1060–1070 °С температура дутья;

снижен выход шлака до 450 кг на 1 т чугуна за счет оптимизации

его основности и увеличения содержания железа в железорудной части шихты.

Внедрение перечисленных и других мероприятий позволило усовершенствовать технологию выплавки чугуна с применением пылеугольного топлива, определив увеличение его расхода до 60–80 кг на 1 т чугуна и снижение расхода кокса на 10–15 %.

В табл. 20 приведены основные данные об опытно-промышленных плавках с применением пылеугольного топлива, проведенных в 1968–1972 гг. Эффективность применения пылеугольного топлива со временем возрастала, что явилось следствием совершенствования процесса вдувания угольной пыли и технологии доменной плавки с его применением.

Для получения количественных зависимостей расход кокса и производительность печи приводили к равным условиям по выходу шлака и расходу флюса, температуре и влажности дутья, интенсивности плавки, содержанию в чугуне кремния и марганца.

Коэффициенты для приведения приняты по данным технической литературы и результатам экспериментов, проведенных на Донецком металлургическом заводе. По расходу природного газа приведение к равным условиям не выполнялось, поскольку имевшее место снижение расхода природного газа являлось технологически необходимым и определялось приходом водорода в составе летучих угольной пыли.

Из данных, приведенных в табл. 20, видно, что во всех опытных периодах при расходе угольной пыли до 40 кг на тонну чугуна и замене пылеугольным топливом 5–10 % кокса производительность доменной печи существенно не изменилась. В опытных плавках 1971 г. снижение производительности отмечено при вдувании 58 кг угольной пыли на тонну чугуна. Как показал последующий анализ, данное изменение, видимо, не связано с применением пылеугольного топлива. Ухудшение производительности печи в этом периоде объясняется прежде всего износом кладки в верхней части шахты: в месте перехода от защитных колец к кладке образовался глубокий кольцевой уступ, который стал причиной устойчивого нарушения распределения шихты и газов на колошнике доменной печи.

Наиболее характерными были опытные плавки, проведенные в 1972 г. К началу плавки были успешно опробованы и внедрены мероприятия, обеспечивающие снижение неравномерности поступления пылеугольного топлива во времени и по фурмам.

После успешной работы печи с расходом 30–50 кг угольной пыли на 1 т чугуна расход был увеличен до 60–80 кг. С таким расходом пылеугольного топлива доменная печь № 3 работала в период, когда удалось оптимизировать основные технологические показатели плав-

Таблица 20. Показатели работы доменной печи № 3 ДМЗ с применением и без применения пылеугольного топлива с 1968 по 1972 г.

Показатели	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975
Производительность, т/сут	789,3	808,5	1065,6	1067,7	987	986,2	1018,6	1002,6
Расход угольной пыли, кг/т чугуна	0	36,5	0	27,5	5,5	35,9	0	21,4
Расход кокса, кг/т чугуна	860,6	823,0	595,0	554,9	618	587	598	583
Суммарный расход углерода, кг/т чугуна	821,1	801,4	543,3	526,6	568,7	574	555,1	562,4
Коэффициент замены кокса углем	0	1,03	0	1,45	0	1,01	0	0,70
Расход природного газа, м ³ /т	146,5	119,0	56,6	48,8	74,1	65,4	74,4	73,3
Температура дутья, °С	898	912	1001	973	975	1000	980	969
Перепад давления дутья — колошник, МПа	0,123	0,120	0,108	0,103	0,101	0,103	0,119	0,122
Вынос колошниковой пыли, кг/т чугуна	92,2	116,5	85,2	82,7	120,5	103,8	135,6	128,3
Химический состав колошникового газа, %:								
CO ₂	13,2	12,7	15,1	14,8	12,4	12,8	12,2	12,9
H ₂	5,9	5,8	4,4	4,9	5,2	5,2	4,35	4,4
HCO	—	—	0,382	0,376	0,317	0,325	0,322	0,327
Расход на 1 т чугуна, кг:								
агломерат + окатыши	—	—	1724	1651	1672,8	1686	1672	1694
известняк	—	—	154	157,3	77,9	150,9	127,3	132,7
металлодобавки	—	—	0	39,5	60,8	44,5	74,5	56,5
Химический состав чугуна, %:								
Si	0,99	1,02	0,88	0,98	1,07	0,95	0,83	0,86
S	0,037	0,041	0,042	0,040	0,042	0,051	0,043	0,037
Химический состав шлака, %:								
CaO	48,9	48,3	48,4	47,7	46,6	44,7	44,6	44,3
SiO ₂	37,5	38,3	37,8	37,8	36,6	35,9	35,7	36,2
S	1,59	1,57	2,04	2,04	2,07	1,81	2,05	1,86
Степень прямого восстановления r_d	—	—	0,356	0,306	0,407	0,416	0,398	0,338

Показатели	1971			1972		
	I период	II период	III период	I период	II период	III период
Производительность, т/сут	1017,7	965	971	949,9	1038	926,5
Расход угольной пыли, кг/т чугуна	40,4	58	0	37,2	67,0	84,4
Расход кокса, кг/т чугуна	520	538	573,4	542,4	517,8	500
Суммарный расход углерода, кг/т чугуна	518,6	546,8	542,5	541	529,0	524,6
Коэффициент замены кокса углем	1,93	1,03	0	0,906	0,93	0,87
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	66	62,4	83,1	74,7	58,4	53,5
Температура дутья, °С	1002	1056	1072	1080	1060	1083
Перепад давления дутье – колошник, МПа	0,124	0,117	0,112	0,111	0,108	0,115
Вынос колошниковой пыли, кг/т	147	150,5	110,6	128,0	110,9	153,2
Химический состав колошниково-го га-за, %:						
CO ₂	12,4	13	12,17	12,8	15,3	13,5
H ₂	4,9	5	5,4	5,6	5,39	4,9
ηCO	0,357	0,334	0,323	0,335	0,386	0,334
Расход на 1 т чугуна, кг:						
агломерат + окатыши	1720	1733	1616,6	1634,4	1718,9	1669,3
известняк	108,1	105,2	66,05	75	115,5	14,3
металлодобавки	54,6	44,6	87,3	85,5	52,5	69,6
Химический состав чугуна, %:						
Si	0,83	0,86	0,93	0,83	0,93	1,02
S	0,039	0,045	0,04	0,04	0,045	0,042
Химический состав шлака, %:						
CaO	45,0	44,2	47,7	46,8	47,5	48,0
SiO ₂	36,8	36,5	36,8	37,2	37,0	36,4
S	1,93	1,85	2,14	2,03	2,25	2,52
Степень прямого восстановления r_d	0,387	0,423	—	—	—	—

ки и обеспечить устойчивую и высокопроизводительную работу доменной печи (см. табл. 20).

Благоприятное влияние на стабилизацию газодинамического режима плавки оказало введение в шихту 20–30 % окатышей ЦГОК, способствовавшее снижению содержания в шихте мелочи 5–0 мм и выхода шлака до 450 кг на 1 т чугуна.

Успешной работе доменной печи способствовали также равномерное поступление в цех агломерата и окатышей, устойчивое качество кокса Рутченковского КХЗ. Производительность печи, качество чугуна в данном периоде по сравнению с сопоставительным улучшились.

В 1972 г. также предпринята попытка освоить технологический режим с расходом угольной пыли 80–100 кг на тонну чугуна. Значительное увеличение расхода топлива сопровождалось снижением интенсивности плавки на 10–20 %, ухудшением схода шихты, снижением производительности печи от 1000–1050 до 850 т/сут. В течение этого периода были два длительных (до двух суток) расстройства хода печи.

Промышленные плавки с вдуванием до 100 кг угольной пыли на 1 т чугуна, проведенные на ДМЗ, подтвердили результаты теоретического анализа зарубежных опытных и промышленных плавков о возможности получения коэффициента замены кокса топливом > 1 . Из данных, приведенных в табл. 20, видно, что при вдувании в горн до 40–60 кг угольной пыли на 1 т чугуна коэффициент замены углерода кокса углеродом пыли изменялся от 0,7 до 1,9. Этот значительный интервал объясняется недостаточной точностью приведения расхода кокса к равным условиям, а также влиянием других, недостаточно контролируемых факторов: качества агломерата и кокса, распределения газового потока, состояния доменной печи и др.

В опытных плавках 1971 г. при увеличении расхода пыли до 58 кг на 1 т чугуна (IV период) коэффициент замены снизился, что объясняется неблагоприятными технологическими условиями плавки. В опытных плавках 1972 г. коэффициент замены существенно не изменялся во всем диапазоне расхода угольной пыли и составил в среднем $\sim 1,0$. Применение пылеугольного топлива сопровождалось снижением общего расхода углерода.

Расход природного газа при увеличении расхода пылеугольного топлива сокращался с целью компенсации охлаждающего влияния топлива и оптимизации прихода водорода на единицу шихты.

Для изучения распределения углерода угольной пыли между продуктами плавки были исследованы пробы колошниковой пыли, чугуна и шлака. В результате анализа в перечисленных материалах не установлено увеличения содержания углерода.

С помощью макроструктурного анализа показано, что практичес-

ки все частицы углерода в колошниковой пыли значительно крупнее частиц угольной пыли. Кроме того, все частицы углерода в колошниковой пыли имеют характерную структуру кокса [119].

Из литературных источников известно, что часто при повышенных расходах мазута и угольной пыли наблюдается вынос с колошниковыми газами несгоревших частиц дополнительного топлива. Из проведенных на ДМЗ исследований следует, что подобные явления не имели места даже при расходе угольной пыли 100 кг на 1 т чугуна (рис. 35).

Снижение выхода восстановительных газов и доли кокса и шихте на 2–5 %, увеличение высоты зоны умеренных температур и другие

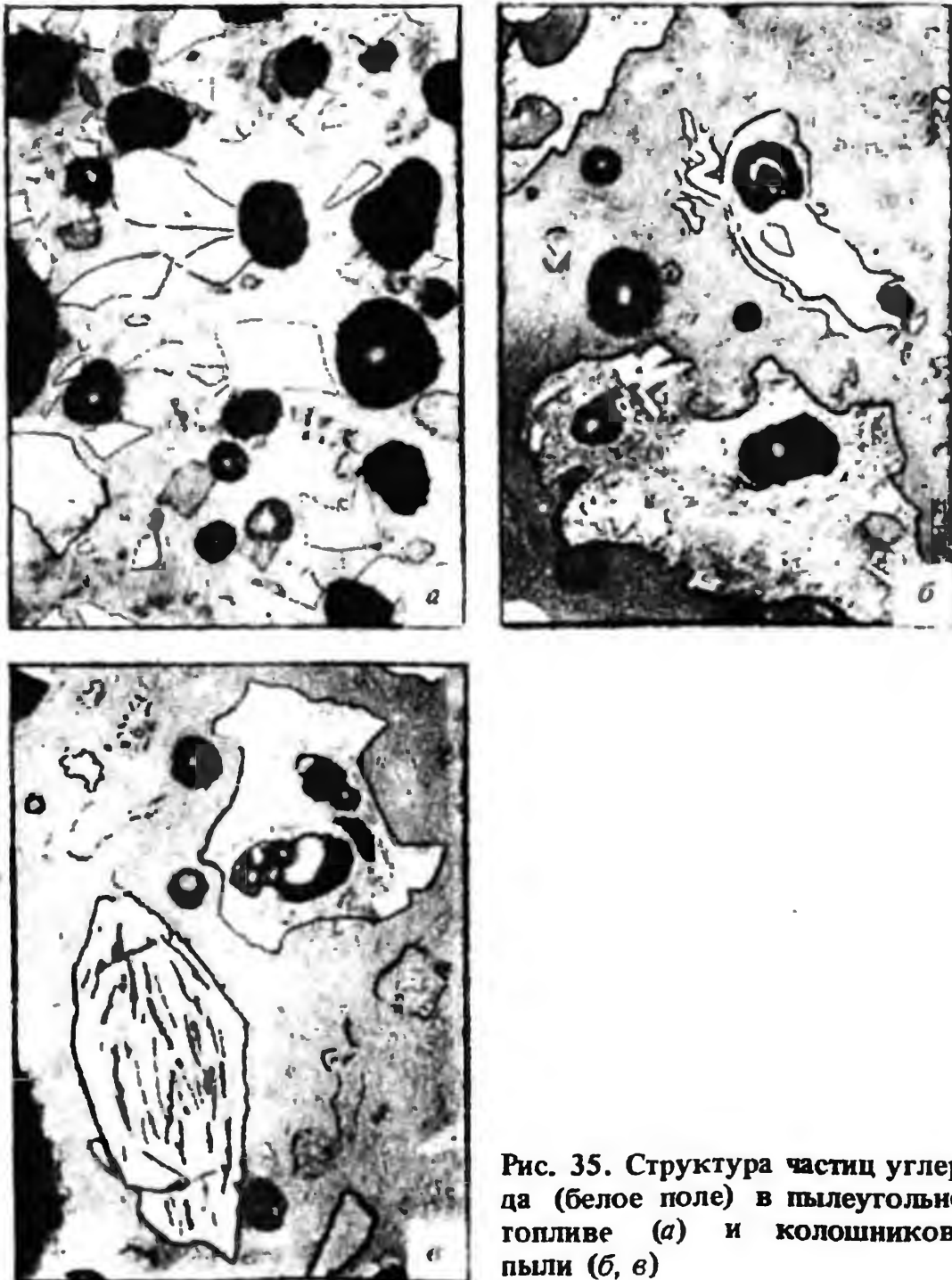


Рис. 35. Структура частиц углерода (белое поле) в пылеугольном топливе (а) и колошниковой пыли (б, в)

благоприятные изменения определили увеличение времени контакта газов-восстановителей с окислами железа, что в свою очередь явилось основной причиной улучшения использования восстановительной энергии газов. Из данных табл. 20 видно, что в 1971 г. в отдельные периоды плавки η_{CO} повысили на 0,005–0,035, или на 1,7–11 %. По результатам плавки 1972 г. степень использования восстановительной энергии газов повышалась пропорционально расходу угольной пыли на 1,0–1,5 % на каждые 10 кг угля. Характерно, что снижение выхода восстановителей произошло за счет снижения прихода оксида углерода при практически постоянном приходе водорода. Последнее обстоятельство способствовало сохранению содержания водорода в колошниковом газе на постоянном уровне – 4,5–5,2 % [17]. Эффективному использованию восстановительной энергии горновых газов, несомненно, способствовал ровный сход шихты, отмечающийся, как правило, при работе доменных печей с вдуванием угольной пыли.

Характерными в этом отношении являются опытные плавки 1972 г. Из данных табл. 20 и 21 видно, что общий перепад давления газов и частные перепады, количество принудительных осадков, температура дутья, производительность печи и другие показатели, качественно характеризующие сход шихты, существенно не изменились при увеличении расхода угольной пыли до 60–80 кг на 1 т чугуна. Показателем схода шихты является время работы печи с приоткрытым клапаном "Снорт". С целью выравнивания схода шихты и предупреждения длительных расстройств в необходимых случаях приоткрывали клапан "Снорт" для снижения перепада давления до уровня, обеспечивающего ровный сход шихты.

Время работы с приоткрытым клапаном "Снорт" было незначительным во все периоды, кроме одного: при расходе пылеугольного топлива 84,4 кг на 1 т чугуна величина этого показателя повысилась до 28,9 %. Стойкость воздушных фурм при работе доменной печи с вдуванием угольной пыли была достаточно высокой и существенно не изменилась.

Из табл. 21 видно, что в 1972 г. увеличилось количество сменных шлаковых фурм, что объясняется задержками выпусков чугуна из-за недостатка чугуновозных и шлаковых ковшей. Во время опытных плавки не было признаков загромождения горна или образования настывей.

Таким образом, отсутствие углерода угольной пыли в продуктах доменной плавки, ровный сход шихты, отсутствие случаев загромождения горна и массового горения воздушных фурм, высокий коэффициент замены кокса углем и другие обстоятельства свидетельствуют о том, что углерод угольной пыли при расходе последней до 100 кг на 1 т чугуна полностью сгорает в фурменных зонах доменной печи [17, 18, 26].

Т а б л и ц а 21. Показатели схода шихты в периоды работы доменной печи № 3 ДМЗ с вдуванием и без вдувания угольной пыли (апрель – ноябрь 1972 г.)

Показатель	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Продолжительность периода, сут	28	14	35	7	35	28	14	19	13	14
Расход угольной пыли, кг/т чугуна	0	0	37,2	8,2	42,7	57,6	64,6	84,4	0	0
Перепад давления, МПа:										
шахта – колошник	0,015	0,014	0,021	0,018	0,019	0,020	0,021	0,021	0,018	0,018
горя – шахта	0,115	0,119	0,118	0,113	0,121	0,119	0,114	0,109	0,110	0,114
Количество сгоревших фурм, шт.:										
воздушных	1	7	–	–	3	–	1	1	–	–
шлаковых	6	6	–	–	7	1	2	–	–	–
Количество принудительных осадок, шт.	15	3	29	8	17	26	10	50	29	6
Время работы с вдуванием па- ра, %	86,3	98,6	98,8	88,7	92,6	35,7	28,8	54,8	22,1	41
Время работы при открытом клапане "Снорт", %	1,04	0,6	1,2	7,1	0	0,45	0	28,9	10,9	2,38
Ровный сход шихты, %	96,4	98,4	98,6	87	94,4	81,8	100	42,5	72,4	100

Следует отметить, что наравне с такими причинами, как полнота сгорания угольной пыли в фурменных зонах и улучшение степени использования восстановительной энергии газов в печи, получению высокого коэффициента замены кокса углем могли способствовать и другие причины. Так, экспериментально доказано, что при вдувании в горн угольной пыли потери тепла на охлаждение доменной печи существенно снижаются, что можно объяснить перераспределением температур по высоте доменной печи; потери тепла с колошниковыми газами уменьшились благодаря снижению выхода колошниковых газов на единицу чугуна.

Для изучения влияния пылеугольного топлива на показатели доменной плавки рассмотрели три периода с различным расходом угольной пыли, но стабильными другими технологическими условиями работы печи. В качестве единичного опыта приняли сменные (8 ч) периоды работы печи, причем производительность и расход кокса рассчитывали по балансу железа и приводили к равным условиям по основным показателям [28].

Оптимальный расход пылеугольного топлива определяли исходя из уровня производительности печи и величины коэффициента замены кокса углем. Для трех рассмотренных периодов в широком диапазоне расхода пылеугольного топлива сохраняется обратная линейная зависимость между расходом кокса и угольной пыли, что косвенно свидетельствует о полном сгорании дополнительного топлива и высокой степени использования тепловой и восстановительной энергии газов в печи (зона оптимальных значений заштрихована) (рис. 36). Коэффициент замены составил 0,9–1,2 кг кокса/кг топлива. Увеличение расхода угольной пыли до 60–70 кг на тонну чугуна сопровождалось повышением производительности печи. Между расходом угольной пыли и производительностью печи для 150-й суточной плавки, проведенной в 1972 г., установлена статическая зависимость:

$$P = 330,816 + 0,422(Q_{\text{п}} - 37,676) - 0,0432(Q_{\text{п}}^2 - 37,676^2), \quad (41)$$

где P — производительность печи, т/смену; $Q_{\text{п}}$ — расход угольной пыли, кг/т чугуна.

По этому уравнению максимальная производительность печи (104,5 %) достигалась при расходе угля 67 кг на 1 т чугуна, а исходная — при 80 кг на 1 т чугуна.

Исходя из условий сохранения постоянными прихода водорода на единицу массы чугуна и теоретической температуры горения вдувания 1 кг угольной пыли сопровождалось снижением расхода природного газа на 0,2–0,3 м³. Высокие показатели, полученные в опытных плавках, подтверждают правильность выбранного соотноше-

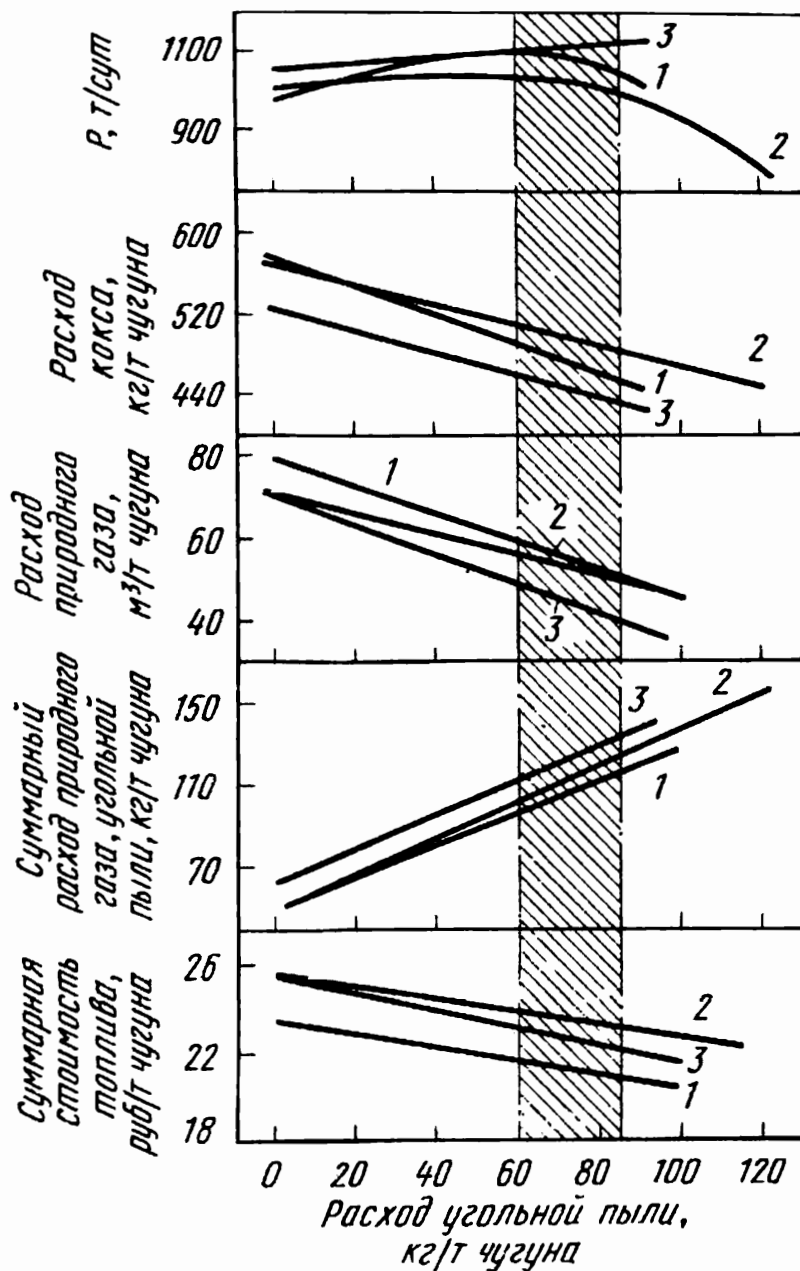


Рис. 36. Зависимость основных показателей плавки от расхода пылеугольного топлива (доменная печь № 3):

1 – для периода (4–17).05 и (25.05–30.08) 1972 г.; 2 – 14.09–17.10) 1972 г.; 3 – (1.09–30.10) 1973 г. (заштрихованная область – оптимальный режим)

ния между расходом пылеугольного топлива и природного газа (см. рис. 36).

Во время опытных плавки применяли следующие системы загрузки: КААК, ККАА, АККА. Масса коксовой колоши составляла 2,5–3,3 т, рудной 9–12 т, уровень засыпи 1,25–2,5 м. В опытной плавке 1972 г. наиболее рациональной оказалась система КААК 1,5 м при массе рудной колоши 9,5 т и коксовой 2,7–3,0 т. Увеличение расхода пылеугольного топлива до 60 кг/т чугуна сопровождалось подгрузкой всех точек радиуса колошника агломератом и окатышами, что, однако, не приводило к снижению производительности печи

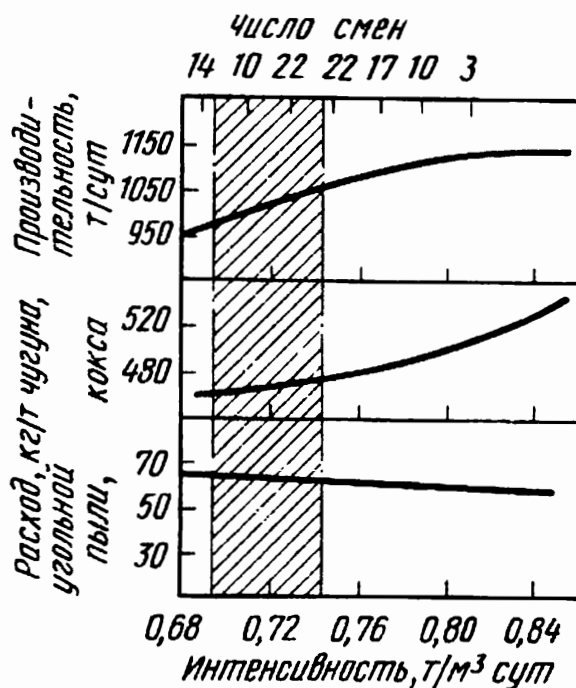
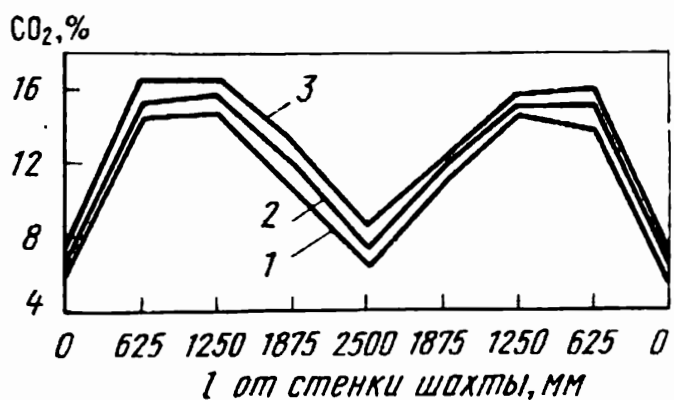


Рис. 37. Содержание CO₂ по радиусу колошника при работе доменной печи без вдувания (1) и с вдуванием пылеугольного топлива (2, 3)

Рис. 38. Зависимость расхода кокса и производительности доменной печи от интенсивности плавки

(рис. 37). При чрезмерной ($> 10-12\%$ CO₂) загрузке периферии или центре рудой расход кокса продолжал снижаться, однако одновременно снижалась и производительность.

При работе доменной печи № 3 с вдуванием угольной пыли установлена зависимость между расходом кокса и интенсивностью плавки (рис. 38). Исходя из условия выполнения производственного плана, рекомендована интенсивность плавки по углероду 0,70–0,74 т/(м³·сут).

В отличие от других печей ДМЗ (№ 1 и 2) оптимальное содержание кремния в чугуне на печи № 3 повышенное (0,90–1,05) и несколько превышает внутризаводские технические условия (0,90%), что объясняется меньшим ее объемом, отсутствием повышенного давления газов в печи, особенностями профиля.

Оптимальную основность шлака по CaO/SiO₂ = 1,23÷1,32 определили, исходя из условий сохранения максимальной производительности печи и получения кондиционного по сере чугуна (0,040%). При увеличении основности шлака $> 1,35$, как правило, значительно нарушается сход шихты и снижается производительность, в то время как качество чугуна по сере существенно не улучшается. Оптимальное содержание глинозема и оксида магния составило соответственно 9,5–10 и 2,5–4,5%. При длительном отклонении по этим показателям оптимального состава шлака, особенно в сторону увеличе-

Т а б л и ц а 22. Эффективность оптимального технологического режима плавки при вдувании в горн угольной пыли и природного газа

Показатели	Оптимальные значения параметров при работе с вдуванием угольной пыли	Средние значения показателей		Отклонения	
		с вдуванием угля	без вдувания угля	абсолютные значения	%
Производительность, т/сут	—	998,7	971,0	+ 27,7	+ 2,85
Расход, кг/т чугуна:					
кокса	—	476,6	573,4	—96,8	—16,9
природного газа, м ³ /т	50±5	57,8	83,1	—25,3	—30,4
угольной пыли	70±10	69,5	0	+ 69,5	—
Интенсивность плавки по углероду, т/(м ³ ·сут)	0,72±0,02	0,748	0,753	—0,005	—0,73
Вынос колошниковой пыли, кг/т чугуна	—	121,0	110,6	+ 10,4	—9,4
Химический состав чугуна, %:					
Si	1,00±0,1	0,88	0,93	—0,005	—5,38
Mn	—	1,26	0,98	+ 0,28	+ 2,86
S	—	0,043	0,040	+ 0,003	+ 7,5
Основность шлака, CaO/SiO ₂	1,27±0,03	1,25	1,29	—0,04	—3,1
Суммарная стоимость топлива, руб/т чугуна	—	23,12	26,24	—3,12	—11,8
CO ₂ (периферия), %	8,5±1,5	8,15	—	—	—
CO ₂ (центр), %	8,5±1,5	11,0	—	—	—

ния, на доменных печах № 1 и 3 систематически отмечаются нарушения нормального схода шихты и снижение производительности.

Таким образом, оптимальным является технологический режим с вдуванием в горн 60–80 кг угольной пыли на 1 т чугуна. В 1972–1973 гг. с этим расходом пыли печь № 3 работала более двух месяцев. Для сравнения принят период в 20 сут, в котором достигнуты минимальные различия между фактическими и оптимальными значениями основных параметров плавки (табл. 22). Вдувание на 1 т чугуна 69 кг угольной пыли сопровождалось снижением расхода кокса на 96,8 кг/т чугуна (или 16 %), природного газа на 25,3 м³/т чугуна, увеличением производительности печи на 2,85 %, снижением стоимости топлива (на тонну чугуна) на 3,12 руб. при сохранении на исходном уровне качества передельного чугуна.

Приведенный к равным условиям коэффициент замены кокса пылеугольным топливом составил 0,98 кг/кг [28].

Материально-тепловые балансы доменной плавки передельного чугуна

Для составления материально-тепловых балансов использовали результаты пятимесячной опытной плавки, проведенной на доменной печи № 3 ДМЗ [18, 25, 26].

Периоды для составления балансов выбрали исходя из условия сохранения устойчивых расходов пыли и природного газа, состава шихты и других показателей плавки, отсутствия длительных простоев. Расход кокса и производительность печи в сопоставительном периоде I находились на уровне лучших за весь период эксплуатации печи. Периоды II и III характеризовались устойчивой и ровной работой доменной печи: технологический режим в периодах был близок к оптимальному и обеспечивал высокую эффективность применения угольной пыли. В IV периоде ввиду его кратковременности не был отработан оптимальный технологический режим по системе загрузки, интенсивности плавки и расходу природного газа. Поэтому сход шихты был неустойчивым, а производительность снизилась на 9,5 % (табл. 23).

Т а б л и ц а 23. Показатели работы доменной печи при вдувании в горн пылеугольного топлива и природного газа в разные периоды

Показатели	Периоды			
	I	II	III	IV
Продолжительность, сут . . .	24	23	9	10
Производительность, т в сутки	990	1000	1035	907
Расход кокса (сухого), кг/т чугуна	558,0	519,0	481,0	479,0
Расход угольной пыли, кг/т чугуна	0	32,0	66,6	86,5
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	68,5	70,0	56,6	53,1
Температура дутья, °С	1065	1080	1044	1077
Расход сухих материалов, кг/т чугуна:				
агломерат	1676	1640	1162	1269
окатыши	8,5	0	536	403
флюс	111,7	111,2	106,0	115,0
марганцевая руда	63,5	85,0	73,6	52,5
металлодобавки	60,1	85,1	51,6	61,4
Содержание в чугуне, %:				
Si	0,90	0,87	0,96	1,13
Mn	1,23	1,35	1,29	1,19
S	0,038	0,042	0,043	0,046
C	4,17	4,30	4,16	4,04
Основность шлака, CaO/SiO ₂	1,30	1,26	1,24	1,29

Для составления балансов использованы данные технологического контроля расхода и химического состава сырых материалов, продуктов плавки и других показателей, полного анализа ежесменных и дополнительных ежесуточных проб колошникового газа, ежесуточного измерения потерь тепла с охлаждающей водой и определений содержания серы в колошниковом газе.

Производительность печи проверяли по балансу железа. Балансы были рассчитаны на 1 т чугуна по известной методике [89].

Материальный баланс. Общий приход материалов при вдувании в горн угольной пыли сократился на 23,3–73,9 кг/т, или на 0,5–1,6 %, что объясняется прежде всего снижением общего расхода углерода.

Общий приход углерода с топливом сократился на 8,5–22,8 кг/т чугуна, или на 1,5–4,2 %; при этом приход углерода с угольной пылью достиг 4,5–12,2 % общего прихода. Доля углерода дополнительного топлива (табл. 24) повысилась от 27,9 до 63,4–96,0 кг

Т а б л и ц а 24. Балансы углерода и водорода

Статьи прихода и расхода	Периоды			
	I	II	III	IV
<i>Приход углерода, кг/т чугуна</i>				
С коксом	482,0	448,0	415,5	414,0
С угольной пылью	0	24,7	50,4	66,69
С природным газом	37,9	38,7	31,2	29,35
Всего с топливом	519,9	511,4	497,1	510,0
С другими компонентами				
шихты	25,39	23,29	23,96	25,36
Общий приход	545,29	534,69	521,06	533,36
<i>Расход углерода, кг/т чугуна</i>				
В продуктах плавки и				
колошниковой пыли	57,6	59,41	62,24	58,4
В колошниковом газе	487,69	475,28	458,82	474,96
<i>Приход водорода, м³/т чугуна</i>				
С дутьем	26,3	51,3	28,0	37,0
С коксом	37,7	34,9	32,4	32,3
С угольной пылью	0	11,2	24,8	32,6
С природным газом	135,0	138,8	112,1	105,2
Общий приход	199,0	236,2	197,3	207,1
<i>Расход водорода, м³/т чугуна</i>				
В колошниковом газе	133,8	133,2	129,8	135,7
На восстановление шихты				
(по разности)	65,2	103,0	67,5	71,4

(от 6,9 до 11,6—17,7 %). Изменения в приходе углерода предопределили уменьшение перехода углерода в колошниковый газ на 12,4—29,9 кг/т чугуна, что обусловило снижение расхода дутья и выхода горнового и колошниковых газов (см. табл. 24).

Особенностью баланса водорода является сохранение его прихода с топливом на исходном уровне ввиду компенсации сокращением расхода природного газа. Для расходных статей баланса характерно повышение (на 2,3—6,2 м³/т чугуна) расхода водорода на восстановление оксида железа (см. табл. 24).

В балансах шлакообразующих практически не изменился приход кремнезема с топливом — $\pm(0,7-2,1 \text{ кг})$, что объясняется применением малозольного угля и получением вследствие этого высокого коэффициента замены кокса углем. Общий приход кремнезема также не изменился или сократился на 3,2—6,9 кг/т, а выход шлака снизился на 26—59 кг/т в основном вследствие снижения на 0,03—0,04 основности шлака и некоторого повышения содержания железа в шихте.

Общий приход серы с шихтой и, в частности с топливом, по существу не изменился, что объясняется относительно низким содержанием серы в угле и высоким коэффициентом замены. Приход серы с угольной пылью увеличился до 0,56—1,50 кг/т и составил 5,7—14,6 % от общего прихода. Отмечено повышение содержания серы в чугуне, что в периоды II и III обусловлено снижением выхода и основности шлака, а в период IV — также и ухудшением схода шихты.

Во всех рассматриваемых периодах доля серы, улетучивающейся с колошниковым газом, была незначительной (0,58—0,27 кг/т чугуна, или 5,8—2,8 %).

Общий и зональный тепловые балансы. Применение пылеугольного топлива способствовало некоторому сокращению и перераспределению потребности в тепле по высоте доменной печи. Для оценки этого изменения рассчитали зональные тепловые балансы для трех зон: до 900; 901—1200 и 1201—1500 °С. Распределение потребности в тепле по статьям баланса приняли по литературным данным. Составление проводили для периодов I и III.

Снижение потребности в тепле на 8,9 % в зоне до 900 °С в основном было достигнуто благодаря уменьшению его расхода на подогрев шихты и кокса. Процесс восстановления окислов железа в этой зоне заметно интенсифицировался, что, однако, не вызвало существенного изменения теплового баланса из-за низких эндотермических или экзотермических эффектов реакций, проходящих в этой зоне. В зоне температур 901—1200 °С снижение потребности в тепле на 10,3 % при вдувании оптимального количества угольной пыли было обусловлено существенным ограничением процесса прямого восстановления оксида железа углеродом, а также снижением расхода

тепла на подогрев кокса и шлака. В зоне температур 1201–1500 °С потребность в тепле сократилась на 9,1 % в связи с меньшими затратами тепла на восстановление и подогрев шихты, а также благодаря уменьшению затрат на охлаждение.

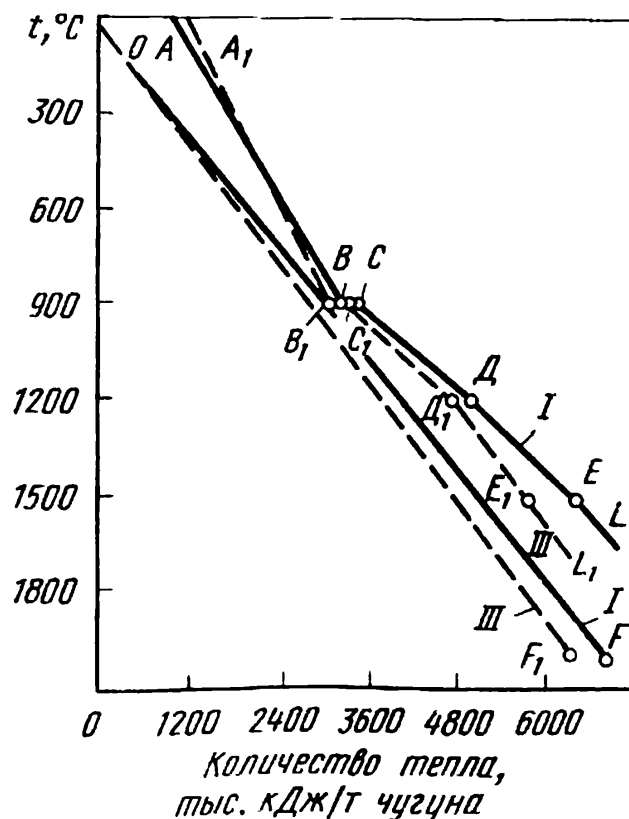
При работе доменной печи с вдуванием угольной пыли характер потребления тепла по высоте доменной печи качественно не изменился (рис. 39). Все же линии прихода и расхода тепла, в особенности в зонах температур 901–1200 и 1201–1500 °С, несколько сблизились. Это закономерно, поскольку обусловлено ограничением эндотермических процессов, снижением кажущегося водяного эквивалента шихты, что свидетельствует об улучшении условий нагрева шихты и использования тепла в доменной печи, возможно, о повышении степени завершенности теплообмена между газом и шихтой.

Общий приход тепла, в том числе от горения угольной пыли (в скобках) по периодам I–IV, характеризовался следующими данными, кДж/т чугуна:

I	II	III	IV
5537504	5326957	5265280	6384904
(0)	(221944)	(462283)	(599715)

Общая потребность в тепле при работе с вдуванием оптимального количества угольной пыли (III) снизилась на 8,3 % прежде всего в связи со снижением потребности в тепле на восстановление окислов железа (на 23,1), подогрев кокса (на 14,9 %) и шлака (на 12,0 %), охлаждение печи (на 15,5 %). Изменения в первых двух из перечисленных статей расхода тепла прямо или косвенно вызваны применением угольной пыли и снижением доли кокса в шихте. Снижение затрат тепла на подогрев шлака и охлаждение печи не имеет прямой связи с применением угольной пыли и обусловлено снижением выхода шлака, повышением производительности печи, и возможно, перераспределением температур газов и шихты и, вследствие этого, изменение условий формирования гарнисажа в нижней части доменной печи.

Рис. 39. Изменение потребности в тепле ABCDEL, A₁B₁C₁D₁E₁L₁ и прихода тепла (OF, OF₁) по высоте доменной печи при работе без вдувания (I) и с вдуванием оптимального количества пылеугольного топлива (III)



В соответствии с отмеченными изменениями теплопотребности приход тепла в фурменных зонах от горения углерода кокса и природного газа, а также в виде физического тепла дутья сократился на 435425–756924 кДж, или на 7,9–13,7 %. Это снижение частично компенсировалось увеличением прихода тепла от горения угольной пыли, доля которого возросла до 4,0–10,8 % общего прихода тепла. В итоге общее снижение прихода тепла при вдувании угольной пыли составило 152600–272224 кДж, или 2,76–4,92 %.

Таким образом, применение пылеугольного топлива наряду с прямой заменой углерода кокса углеродом угольной пыли вызвало некоторое снижение общей потребности в тепле прежде всего за счет снижения затрат на восстановление оксидов железа.

Это свидетельствует о благоприятном влиянии пылеугольного топлива на ход восстановительных процессов и использование тепла по высоте доменной печи, аналогичном влиянию природного газа [73, 101].

Комплексные показатели эффективности доменной плавки. Применение пылеугольного топлива способствовало снижению доли кокса в шихте на 1,0–3,7 %, среднего размера шихты, увеличению выхода шлака и колошникового газа на единицу кокса. Тем не менее при расходе угольной пыли 66,6 кг на тонну чугуна производительность печи увеличилась на 4,5 %, что объясняется снижением расхода шихты и выхода горнового газа на 1 т чугуна, увеличением активной массы шихты и использованием резервов газодинамического режима плавки (табл. 23, 25).

Увеличение доли агломерата в шихте, снижение выхода газов на единицу шихты, некоторое снижение интенсивности плавки, сохранение на исходном уровне теоретической температуры горения и увеличение высоты зоны умеренных температур в шахте печи на 0,14–1,0 м и другие причины способствовали увеличению времени контакта газов-восстановителей с окислами железа в зоне умеренных температур τ_k — комплексного показателя, функционально определяющего степень использования восстановительной энергии горновых газов и развитие процесса косвенного восстановления [17]. Время возросло в периодах с вдуванием угля на 0,026–0,131 с, или на 5,6–27,3 %. Увеличение времени контакта газов-восстановителей с оксидами железа, наравне с оптимизацией технологического режима плавки, способствовало увеличению степени использования восстановительной энергии водорода и оксида углерода на 0,006–0,108, или 1,6–32,0 % и снижению степени показателя прямого восстановления оксида железа (r_d) на 5,2–9,9 % (см. табл. 25).

Следствием снижения r_d и непроизводительных затрат углерода, сохранения на исходном уровне теоретической температуры горения является снижение расхода и прихода тепла на 1 т чугуна, улучшение

Т а б л и ц а 25. Показатели тепловой и восстановительной работы при вдувании угольной пыли

Показатели	Периоды			
	I	II	III	IV
Объемная доля кокса в шихте, %	58,5	57,2	57,5	54,8
Средний диаметр куска шихты, мм	37,85	37,06	35,84	35,99
Высота верхней зоны теплообмена, м	8,30	7,92	8,83	6,89
То же, зоны замедленного теплообмена, м	16,56	16,70	16,30	17,56
Теоретическая температура горения, °С	1997	1903	1969	1959
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	2290	2230	2210	2225
То же, горнового, м ³ /т чугуна	2100	2120	1950	2040
Суммарный выход газов-восстановителей, м ³ /т чугуна	855	898	833	828,5
Время контакта газа с оксидами железа τ_K , с	0,464	0,490	0,515	0,495
Степень использования водорода η_{H_2}	0,327	0,435	0,342	0,344
То же, оксида углерода η_{CO}	0,371	0,359	0,395	0,377
Коэффициент прямого восстановления железа r_d , %	38,9	29,0	30,3	33,7
Коэффициент использования тепловой энергии углерода, %	56,3	56,0	58,4	56,3
Тепловой эквивалент углерода, кДж/кг	21746	22207	23129	21788
К.п.д. тепла, %	83,9	84,32	86,89	84,51

комплексных показателей использования в доменной печи тепла и углерода. Так, степень использования тепловой энергии углерода в печи сохранилась на исходном уровне или улучшилась на 2,1 %. Коэффициент полезного действия тепла увеличился на 0,4–3,0 %. Тепловой эквивалент углерода в доменной печи (в том числе и углерода угольной пыли) существенно не изменился или улучшился (см. табл. 25).

Полученные данные свидетельствуют о принципиальной возможности дальнейшего повышения расхода угольной пыли.

Изменение химического состава и температуры чугуна

Определяющее влияние на качество чугуна оказывают полнота сгорания пылеугольного топлива в фурменных зонах и равномерность подачи его во времени и по фурмам. Кроме того, замена части кокса

пылеугольным топливом вызывает определенные изменения физико-химических условий в нижней зоне теплообмена, в величине прихода и в распределении между продуктами плавки вредных примесей (серы, фосфора).

Качество чугуна и его температура на выпуске определяются комплексом технологических показателей, которые могут изменяться под влиянием горения пылеугольного топлива.

Нормы компенсации пылеугольного топлива природным газом рассчитаны из условия сохранения на исходном уровне или повышения теоретической температуры горения. В реальных условиях плавки это требование, как правило, выполнялось (см. табл. 25). Сохранение постоянной температуры горения предопределяло постоянство высоты нижней зоны теплообмена, неизменность условий нагрева шихты и восстановления кремния.

При работе доменной печи с вдуванием пылеугольного топлива в количестве до 100 кг на тонну чугуна приход с шихтой серы и фосфора существенно не изменился, что определилось химическим составом топлива и высоким коэффициентом замены кокса углем (см. табл. 23). Унос серы с колошниковым газом при вдувании пылеугольного топлива, как показали исследования на доменных печах № 2 и 3 Донецкого металлургического завода, существенно не изменился и составил 2,8–5,8 % от общего прихода серы.

Сход шихты и интенсивность плавки по углероду, определяющие температуру продуктов плавки и условия восстановления кремния и десульфурации чугуна, при вдувании в горн оптимального количества пылеугольного топлива (60–80 кг/т) существенно не изменились (см. табл. 20, 21) [18, 107].

Согласно теоретическим расчетам и проведенным опытным плавкам, степень прямого восстановления r_d при вдувании в горн угольной пыли снижается на 2–4 % абс. на каждые 100 кг угольной пыли на 1 т чугуна.

Применение пылеугольного топлива способствует также снижению окислительного потенциала фурменных зон. Это определяется увеличением доли углерода дополнительного топлива, сгорающего на периферии фурменных зон, от 4–5 до 10–14 % (см. табл. 24). Соответственно уменьшается содержание кислорода в горновых газах на уровне воздушных фурм и доля вторично окисляющегося на фурмах железа. По-видимому, некоторое снижение окислительного потенциала фурменных зон и уменьшение содержания окислов железа в первичных шлаках являются основной особенностью плавки с применением пылеугольного топлива, оказывающей влияние на температуру и химический состав чугуна.

Ранее было установлено, что снижение прихода в горн оксида железа, определяемое применением пылеугольного топлива, может

способствовать некоторому повышению температуры (1–3 %) продуктов плавки на выпуске.

Зависимость содержания серы в чугуна от технологических факторов определяется уравнением [122]:

$$q_{\text{шл}} = \frac{100 p_{\text{CO}}}{(L_{\text{S}}^0 p_{\text{CO}} / f_{\text{[S]}}) [\text{S}] f_{\text{[S]}} \epsilon} (0,95 q_{\text{S}} - 10 / [\text{S}]), \quad (42)$$

из которого видно, что факторами, определяющими конечное содержание серы в чугуна, являются выход шлака $q_{\text{шл}}$, приход серы с шихтой q_{S} , равновесный коэффициент распределения серы L_{S}^0 , парциальное давление оксида углерода p_{CO} , коэффициент активности серы $f_{\text{[S]}}$ и степень достижения шлаком равновесия по сере ϵ .

Теоретический анализ и опыт работы доменных печей с вдуванием угольной пыли за прошедшие годы показал, что при расходе угольной пыли до 100 кг на 1 т чугуна не отмечается существенного изменения первых пяти факторов (см. табл. 23–25). Иными словами, в конкретном случае содержание серы в чугуна определяется показателем ϵ , функционально зависящим от температуры продуктов плавки, степени раскисленности и вязкости шлаков.

Вязкость реальных шлаков при работе с вдуванием угольной пыли не изменилась (рис. 40).

Таким образом, применение пылеугольного топлива существенно не изменяет условий десульфурации чугуна в доменной печи. Напротив, снижение содержания оксида железа в первичных и конечных шлаках, определяемое применением пылеугольного топлива, может способствовать улучшению процесса десульфурации чугуна, непосредственно воздействуя на константу равновесия и оказывая благоприятное влияние на температуру продуктов плавки в горне.

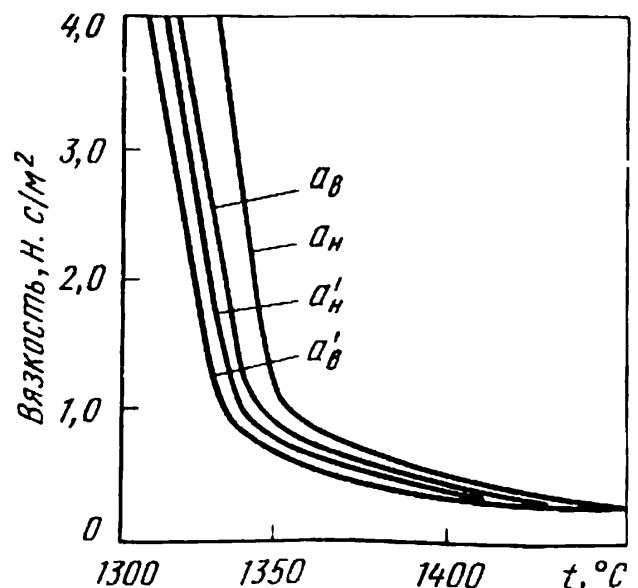


Рис. 40. Вязкость реальных доменных шлаков печей Донецкого металлургического завода:

a_{H} , a_{B} — нижний и верхний шлаки при $\text{CaO/SiO}_2 = 1,33 \div 1,34$, печь № 1, без вдувания угольной пыли; a'_{H} ; a'_{B} — то же с вдуванием угольной пыли, печь № 2

При вдувании в горн пылеугольного топлива условия восстановления кремния и науглероживания чугуна несколько улучшаются, что определяется прежде всего возможным повышением температуры продуктов плавки и снижением прихода в горн оксида железа и окислительного потенциала фурменных зон. Последний фактор мог способствовать снижению доли кремния и углерода, окисляющихся на фурмах.

Т а б л и ц а 26. Показатели работы доменных печей № 2 и 3 Донецкого металлургического завода с вдуванием угольной пыли*

Показатели	Периоды			
	I	II	III	IV
Производительность, т/сут	958	1227	1232	1136
Расход материалов, кг/т чугуна:				
железная руда	0	621	683	1290
агломерат ЮГОКа	1506	203	1075	326
окатыши	0	797	2	42
марганцевая руда	8819	19	41	49
металлодобавки	125	105	130	147
известняк	98	394	500	675
кокс	575	735	763	678
угольная пыль	32	43	55	60
природный газ, м ³ /т	67	53	86	94
Температура дутья, °С	1070	1047	—	1005
Избыточное давление, МПа	0,117	0,207	0,206	0,22
Вынос колошниковой пыли, кг/т				
чугуна	72,5	99,0	66,0	58,5
Интенсивность плавки по углероду,				
кг/(м ³ ·сут)	704	829	894	836
Температура колошникового газа, °С	338	363	277	269
Избыточное давление, МПа	0,0075	0,121	0,117	0,122
Содержание, %:				
СО ₂	13,28	9,9	11,3	11,1
СО	26,15	28,4	27,8	28,8
Н ₂	5,4	4,0	4,9	5,6
Содержание в чугуне, %:				
Si	0,88	0,86	0,86	0,91
Mn	1,48	0,67	1,21	1,02
S	0,037	0,030	0,033	0,036
Содержание в шлаке, %:				
Al ₂ O ₃	10,5	7,89	7,4	10,2
MgO	3,56	3,8	3,7	4,52
MnO	1,57	0,59	1,17	0,9
S	2,12	2,45	1,89	1,79
Выход шлака, кг/т чугуна	422	545	783	818
Содержание железа в шихте, %	54,2	53,9	53,1	52,7

Экспериментальная часть работы выполнена на базе опытно-промышленной установки для вдувания пылеугольного топлива в горн доменных печей № 1 и 2 ДМЗ [17].

Влияние пылеугольного топлива на качество и температуру передельного и литейного чугуна исследовали в ходе проведения длительных опытных плавов (табл. 26). Первый период относится к работе печи № 3 при расходе угольной пыли 30–50 кг/т чугуна, второй — четвертый периоды — к печи № 2 при выплавке передельного чугуна с расходом угольной пыли до 100 кг на 1 т чугуна. Характеристика печей и показатели их работы в рассматриваемые периоды приведены в табл. 26 и описаны ранее [17, 25, 28].

Теоретические соображения об изменении температуры чугуна подтверждаются экспериментальными данными, полученными на доменной печи № 3. Средняя температура чугуна в период без вдувания пылеугольного топлива составляла 1467 °С (при колебаниях 1424–1505 °С). Применение пылеугольного топлива в количестве 50 кг на 1 т чугуна вызвало повышение температуры чугуна на 15–20 °С (рис. 41).

При работе доменной печи с применением угольной пыли отмечена высокая стабильность температуры продуктов плавки на выпуске (рис. 42).

Ввиду ряда конструктивных и технологических особенностей при прочих равных условиях температуры чугуна и шлака на печи № 2 были более высокими, чем на печи № 3 (табл. 26–28, рис. 42).

Анализ показывает, что в условиях доменной печи № 2 достигнуты практически предельные температуры передельного чугуна и верхнего шлака (табл. 26 и 27). Поэтому применение пылеугольного топлива в данных условиях не вызвало существенного изменения температуры продуктов плавки на выпуске.

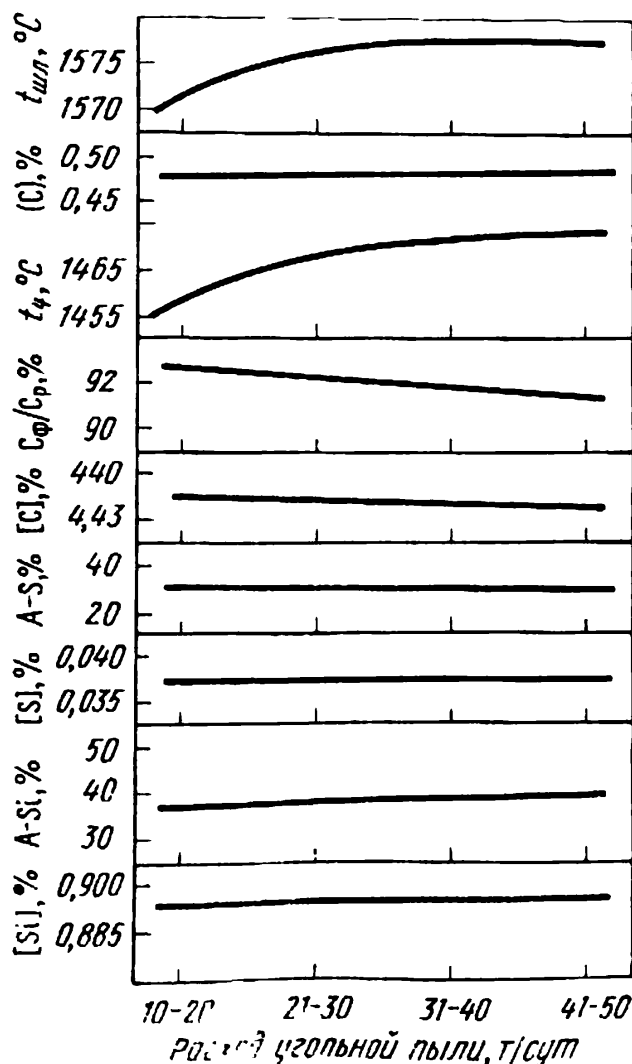


Рис. 41. Зависимость химического состава и температуры чугуна от расхода угольной пыли (доменная печь № 3)

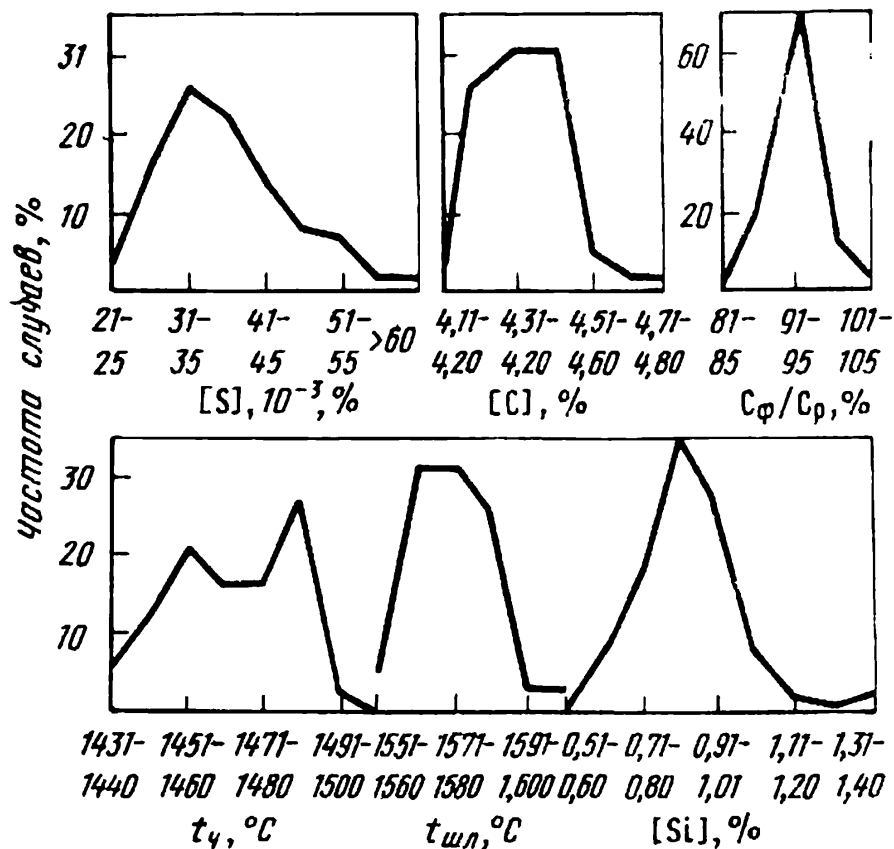


Рис. 42. Частотные диаграммы химического состава чугуна и шлака при раф доменной печи № 3 с вдуванием угольной пыли

Т а б л и ц а 27. Химический состав и температура продуктов плавки при работе доменной печи № 2 с вдуванием и без вдувания угольной пыли

Показатели	Без угольной пыли	С угольной пылью
Число выпусков чугуна	26	19
Расход угольной пыли, т в смену	—	19,0–27,5 (22,0)
Содержание в чугуне, %:		
Si	0,70–0,90 (0,86)	0,72–1,05 (0,84)
Mn	1,05–1,35 (1,19)	0,90–1,25 (1,12)
S	0,018–0,047 (0,038)	0,019–0,035 (0,026)
Температура чугуна, °C	1491–1547 (1512)	1465–1546 (1497)
Содержание в нижнем шлаке, %:		
Al ₂ O ₃	6,8–8,0 (7,6)	7,0–9,0 (8,5)
MgO	3,0–3,4 (3,3)	3,3–5,0 (3,7)
MnO	1,12–1,12 (1,12)	0,86–1,26 (1,08)
Основность CaO/SiO ₂	1,13–1,39 (1,32)	1,30–1,50 (1,39)
Температура верхнего шлака, °C	1576–1589 (1582)	1580–1597 (1587)

П р и м е ч а н и е. В скобках приведены средние значения показателей для выков.

Т а б л и ц а 28. Химический состав и температура продуктов плавки при работе доменной печи № 2 с различным расходом угольной пыли

Показатели	Малый расход	Большой расход
Число выпусков чугуна	53	107
Расход угольной пыли, кг/т чугуна	0–16,1 (1,2)	31,2–69,2 (50,0)
Содержание в чугуне, %:		
Si	0,28–2,1 (0,87)	0,26–1,35 (0,87)
Mn	0,68–1,55 (1,11)	0,44–2,35 (1,11)
S	0,018–0,120 (0,038)	0,014–0,135 (0,036)
Температура чугуна, °С .	1410–1606 (1501)	1392–1589 (1502)
Содержание в нижнем шлаке, %:		
Al ₂ O ₃	7,8–14,55 (10,0)	6,75–13,0 (9,78)
MgO	3,6–8,55 (5,72)	3,0–7,93 (5,49)
MnO	0,25–2,10 (0,88)	0,20–2,10 (0,78)
CaO/SiO ₂	1,09–1,49 (1,26)	1,06–1,49 (1,29)
Температура верхнего шлака	1400–1604 (1561)	1411–1590 (1546)

П р и м е ч а н и е. В скобках приведены средние значения показателей.

Высокие температуры продуктов плавки на выпусках из доменной печи № 2 при вдувании пылеугольного топлива были отмечены также при выплавке литейного чугуна (табл. 29).

Длительный промышленный опыт выплавки передельного чугуна

Т а б л и ц а 29. Качество продуктов плавки при работе доменной печи с вдуванием угольной пыли*

Показатель	Величина
Расход угольной пыли, кг/т чугуна	10–66 (37)
Содержание в чугуне на выпуске, %:	
Si	2,04–3,56 (2,58)
Mn	0,52–1,31 (0,71)
S	0,015–0,070 (0,028)
P	0,074–0,100 (0,085)
C	3,82–4,50 (3,96)
Отношение $C_{\text{ф}}/C_{\text{р}} \cdot 100\%$	86,0–101,9 (93,2)
Температура чугуна, °С	1499–1593 (1555)
Содержание в нижнем шлаке, %:	
Al ₂ O ₃	6,2–11,0 (9,7)
MgO	2,6–4,0 (3,6)
MnO	0,42–0,70 (0,53)
CaO/SiO ₂	1,12–1,49 (1,34)
Температура верхнего шлака, °С	1564–1623 (1580)

П р и м е ч а н и е. В скобках приведены средние значения показателей по 20 выпускам.

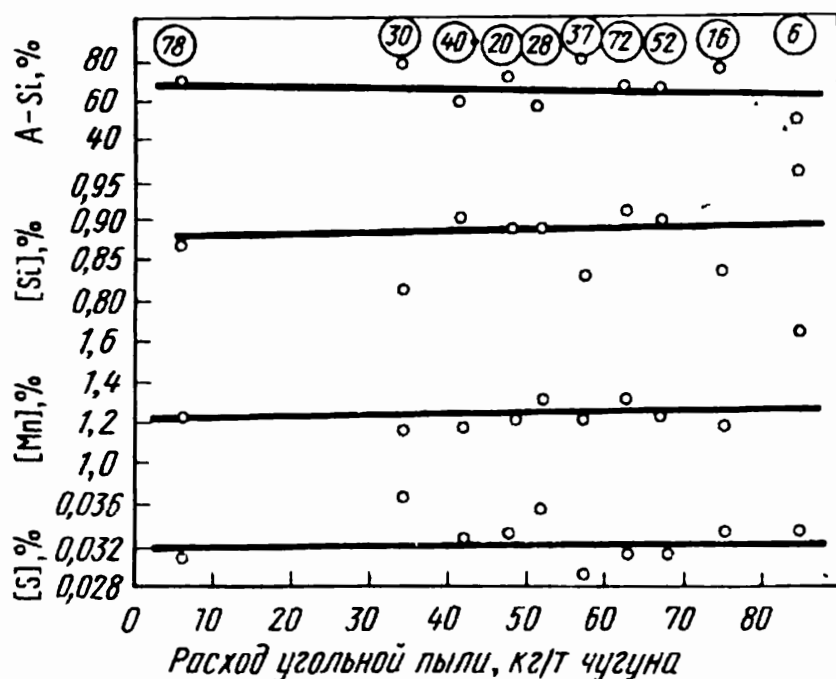


Рис. 43. Зависимость показателей качества чугуна от расхода пылеугольного топлива (цифры в кружках — количество опытов)

на доменных печах № 2 и 3 подтвердил отсутствие надежной статистической взаимосвязи между расходом пылеугольного топлива и содержанием серы в чугуне (табл. 26, 27; рис. 41, 43). Качество чугуна ухудшалось лишь в случаях нарушения нормального режима работы печей. Так, в опытной плавке на доменной печи № 3 в 1972 г. при расходе угольной пыли до 60–80 кг/т чугуна содержание серы в чугуне, колеблемость этого показателя, а также выход кондиционного по сере чугуна существенно не изменились. В дальнейшем, несмотря на одновременное повышение содержания кремния, выход кондиционного чугуна снизился от 50–60 до 35–40 %, что объясняется нарушением нормального схода шихты.

Характер зависимости содержания серы в чугуне от его температуры, содержания кремния и основности шлака в условиях доменных печей № 2 и 3 качественно не изменился, что также свидетельствует о сохранении условий десульфурации чугуна.

Аналогичный вывод подтвержден опытом применения угольной пыли на металлургических заводах в нашей стране и за рубежом [17, 57].

Средний уровень содержания кремния в чугуне доменной печи № 3 был повышенным, что определяется относительно малым объемом печи, низким давлением газов в горне и особенностями профиля. Содержание кремния в чугуне из этой печи при увеличении расхода угольной пыли до 60–80 кг/т чугуна существенно не изменилось. При более высоком расходе топлива вследствие неотработанности

оптимального режима плавки средний уровень и колеблемость содержания кремния в чугуна повысились [17].

При выплавке литейного и передельного чугуна с вдуванием угольной пыли в количестве до 100 кг на тонну чугуна на печи № 2 уровень и стабильность содержания кремния в чугуна существенно не изменились (см. табл. 29).

В многочисленных опытных плавках, проведенных в СССР и за рубежом, не было отмечено изменений в процессе восстановления кремния при выплавке передельного, литейного и специального чугуна (ферросилиция) [17, 28, 107, 123].

Как показали исследования, степень насыщения чугуна углеродом (отношение $C_{\text{ф}}/C_{\text{р}}$ 100) в условиях ДМЗ была высокой и устойчивой (90–100 %) [34].

Из приведенных данных следует, что содержание углерода в передельном и литейном чугуна и степень насыщения им чугуна при работе доменной печи с применением пылеугольного топлива существенно не изменились. Некоторые колебания этого показателя, как и при работе в обычных условиях, объясняются прежде всего изменением химического состава чугуна (см. рис. 41, 42; табл. 29).

Как следует из материальных балансов, приход фосфора с шихтой при вдувании на 1 т чугуна до 100 кг угольной пыли существенно не изменился, что и предопределило сохранение его содержания в чугуна на исходном уровне (см. табл. 29).

Доменная плавка с вдуванием в горн топливно-флюсовой смеси

При работе доменных печей на высокотемпературном, обогащенном кислородом дутье, теоретические температуры горения могут возрасти до 3000 °С и выше. Значительное снижение расхода кокса может вызвать нарушение газодинамического режима плавки и снижение производительности печей, неблагоприятное перераспределение температур по высоте доменной печи. Поэтому целесообразна частичная или полная замена природного газа комплексными топливно-флюсовыми смесями, способствующими как снижению расхода кокса и сохранению на оптимальном уровне теоретических температур горения, так и значительному улучшению газодинамического режима за счет снижения выхода горновых газов и вывода из определяющей зоны печи части шлака. В указанные смеси целесообразно вводить компоненты, обеспечивающие интенсификацию процессов горения топлива, шлакообразования и десульфурации чугуна [100, 111].

Однако введение холодных негорючих добавок в горн с пылеугольным топливом способствует существенному повышению потребности тепла. Поэтому наиболее целесообразно добавлять к пылеугольному топливу марганцевые руды, плавиковый шпат, кальциевую селитру, карбид кальция и другие, способные малым количеством

обеспечить существенные благоприятные изменения в работе доменной печи [110, 125].

На доменной печи № 2 опробовали технологию доменной плавки с вдуванием в горн топливно-флюсовой смеси, состоящей из 80–90 % пылеугольного топлива и 10–20 % шлаковой корки — отхода трубосварочной промышленности, содержащего до 40 % MnO и до 3–5 % F [124, 125].

Для приготовления топливно-флюсовой смеси использовали вторую яму угольного склада. Из первой и второй ям уголь и корка подавались в два приемных бункера, из которых одновременно с помощью дозаторов выдавались на транспортер. Соотношение расхода угля и корки регулировалось в пределах 10:1 и 5:1. Полученная смесь в процессе перегрузки перемещивалась и поступала в приемный бункер, из него — в азробильные мельницы.

Перекачка полученной топливно-флюсовой смеси на распределительно-дозировочную установку, ее дозирование и вдувание в доменную печь проходили без существенных изменений по сравнению с работой на пылеугольном топливе.

Для вдувания в горн использовали низкозольный тощий уголь шахты "Рассвет" треста "Шахтерскантрацит", содержащий 9–11 % золы, до 12 % летучих, 1,3–1,6 % серы, 3–6 % влаги. Фракционные составы пылеугольного топлива и топливно-флюсовой смеси отличались несущественно: средний размер частиц составил соответственно 0,103–0,114 мм, выход фракции крупнее 0,1 мм — (51,9÷58,0 %), наиболее представительными были фракции 0,063–0,2 мм, доля которых составила соответственно 78,82–84,92 %.

Доменная печь № 2 к моменту проведения опытной плавки работала после капитального ремонта II разряда 4,5 года. Состояние печи было удовлетворительным.

В 1978 г. печь выплавляла чугун из подготовленного сырья на дутье, обогащенном до 22–23 % кислородом, с вдуванием природного газа.

Для анализа приняты периоды работы доменной печи при вдувании в горн пылеугольного топлива и природного газа (сопоставительный I), топливно-флюсовой смеси и природного газа (опытный), природного газа (сопоставительный II) (табл. 30).

Указанные периоды характеризовались устойчивыми показателями шихтового, температурно-дутьевого и шлакового режимов плавки.

Наиболее высокие показатели доменной плавки получены в опытном периоде — при вдувании в горн топливно-флюсовой смеси. Приведенная к равным условиям производительность печи в этом периоде была выше, чем в сопоставительных, на 128,1 и 20,2 т/сут.

В опытном и сопоставительных периодах оптимальная (определяющая максимальную производительность печи) интенсивность по угле-

Т а б л и ц а 30. Показатели работы доменной печи с вдуванием топливно-флюсовой смеси

Показатели	Периоды		
	I	II	III
Производительность печи, т/сут	1684,7	1812,8	1792,6
Расход сухих материалов, кг/т чугуна:			
кокса	534,4	528,3	555,2
агломерата ЮГОКа	990,8	972,3	646,5
окатышей ДГОКа	616,2	553,7	763,8
марганцевой руды.	29,9	22,9	40,9
металлодобавки	71,2	137,2	197,9
известняка	216,5	177,6	209,8
Параметры дутья:			
количество, м ³ /мин.	2255	2322	2270
температура, °С	1010	1014	1009
давление, МПа	0,225	0,220	0,224
содержание кислорода, %	22,87	23,21	22,85
расход природного газа, м ³ /т чугуна . .	84,7	75,0	87,8
расход шлаковой корки, кг/т чугуна . .	0	3,0	0
расход угольной пыли, кг/т чугуна . . .	38,7	16,4	0
Химический состав чугуна, %:			
Si	0,92	0,94	0,99
Mn	1,01	1,07	1,02
S	0,038	0,037	0,036
P	0,056	0,052	0,050
Температура чугуна, °С	1459	1471	1464
Шлак нижний.	1,32	1,30	1,31
Выход шлака, кг/т чугуна	487,1	423,0	404,2
Температура верхнего шлака, °С	1477	1520	1508
Содержание СО ₂ в колошниковом газе, %.	14,67	15,55	14,47
Выход колошникового газа, м ³ /т чугуна	2314	2042	2111
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна.	2160	1923	1966
Выход газов-восстановителей, кг/т чугуна	942,1	853	871
Время пребывания газов в печи, с	3,21	3,18	3,34
Высота верхней зоны теплообмена, м	2,49	2,68	2,58
Высота нижней зоны теплообмена, м	1,33	1,43	1,42
Теоретическая температура горения (по Рамму), °С	1948	1952	1922,6
Степень использования СО	0,353	0,368	0,346
Степень использования Н ₂	0,456	0,527	0,439
Степень прямого восстановления железа			
<i>r_д</i>	35,2	30,9	34,0
Тепловое значение углерода (по Павлову), кДж/кг углерода	22,88	23,05	21,75
Коэффициент использования тепловой энергии углерода, %	56,9	57,5	54,6

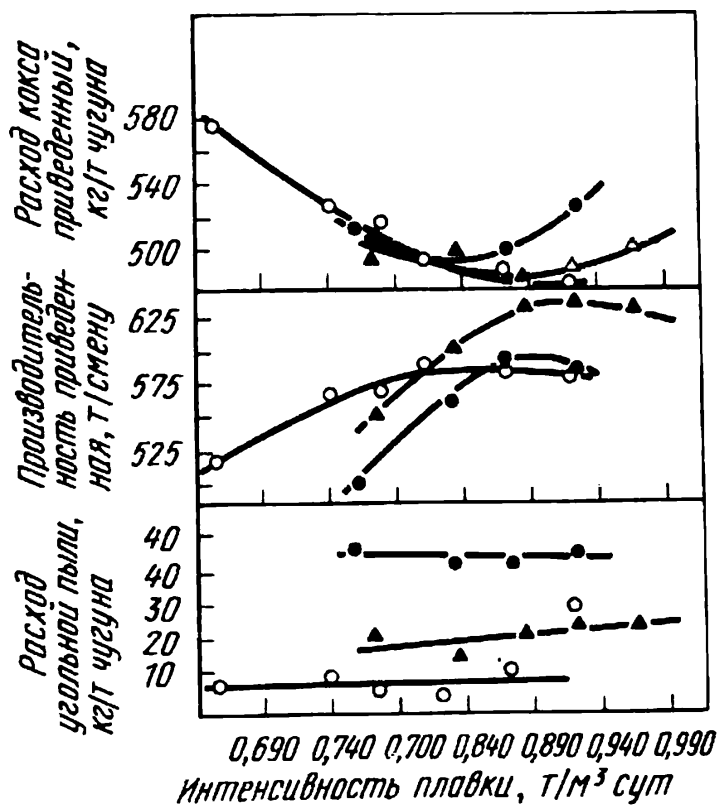


Рис. 44. Влияние интенсивности плавки на производительность доменной печи, ДМЗ, доменная печь № 2:

1 — до опытов; 2 — во время опытов; 3 — после опытов (цифры в кружках — число опытов)

роду составила соответственно 0,91, 0,89, 0,83 т/(м³·сут). Оптимальным значениям интенсивности отвечала производительность печи, равная 642, 598, 587 т/смену (рис. 44).

Соответственно расход кокса в опытном периоде был ниже на 6,1 и 26,9 кг/т чугуна, причем достигнуто это за счет более эффективного использования топлива.

В опытном периоде отмечено повышение устойчивости работы печи. Характерна в этом отношении зависимость показателей плавки от основности шлака. При вдувании пылеугольного топлива установлен достаточно четко выраженный оптимум основности ($\text{CaO/SiO}_2 = 1,32$), причем значительное повышение расхода кокса наблюдается уже при отклонениях основности более чем на 0,03–0,05 от оптимальной (рис. 45).

При работе доменной печи с вдуванием топливно-флюсовой смеси высокие показатели плавки наблюдали в более широком диапазоне основности шлака (1,25–1,45). Подобные изменения отмечены при колебаниях интенсивности плавки и содержания кремния в чугуне. В опытном периоде улучшился сход шихты, о чем свидетельствуют снижение выноса колошниковой пыли, перепада давлений горячего дутья и колошникового газа, а также улучшение качества чугуна. Так, выход чугуна с содержанием серы < 0,035 % увеличился от 41 до 49 %, максимум содержания серы сместился в сторону меньших содержаний на 0,005 % и возрос от 18,5 до 23 %. Выход чугуна с содержанием кремния в пределах $\pm 0,15$ % от среднего значения увеличился от 57,5 до 87,5 %.

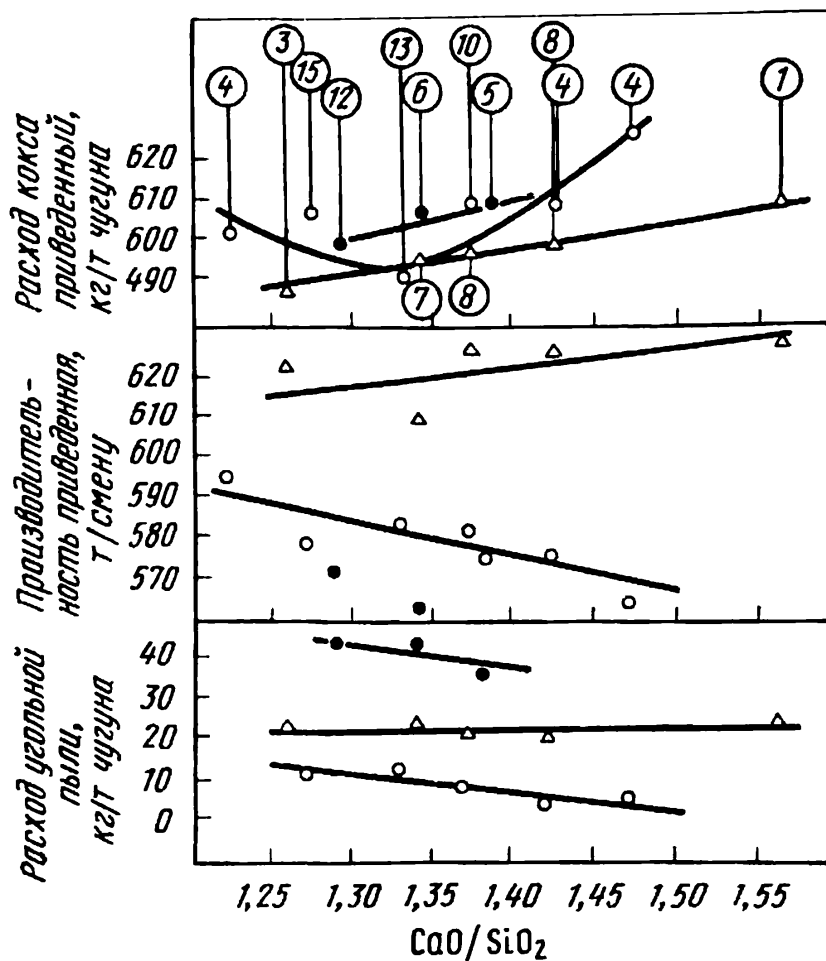


Рис. 45. Влияние основности шлака на основные показатели доменной плавки в разные периоды (цифры в кружках – число опытов)

Характерными являются материально-тепловые балансы проведенных плавок.

Общий приход материалов в опытном периоде сократился на 302,4–363,7 кг/т чугуна, прежде всего за счет снижения расхода кокса, дутья и выноса колошниковой пыли.

Свыше 92–94 % S вносится коксом и пылеугольным топливом, общий приход которой высок даже для условий Донбасса (9,94–11,15 кг/т чугуна). Такая же часть серы поглощается шлаком – 91,08–94,26 % и только 3,3–3,8 % – чугуном. Из печи выносятся 1,95–3,71 % серы.

Приход фосфора незначителен (0,58–0,61 кг/т чугуна), что определяется низким содержанием этого элемента во всех компонентах шихты. В чугун переходит 85,4–89,2 % P, в шлак – 4,55–8,38 %.

По ориентировочным расчетам, содержание фтора в шлаке, проходящем через фурменные зоны, при вдувании топливно-флюсовой смеси увеличилось на 0,2–0,3 %.

Преимущества работы печи в опытном периоде видны из анализа основных расчетных показателей. Так, в опытном периоде показана

тель степени прямого восстановления был ниже на 3,1–4,3 %, несмотря на меньший выход газов-восстановителей (18,0–88,9 м³/т чугуна, или 2,15–9,5 %). Соответственно повысилась степень использования восстановительной способности горновых газов: η_{CO} возросло от 0,353–0,346 до 0,368, а η_{H_2} — от 0,456–0,439 до 0,527. Коэффициент использования тепловой энергии углерода улучшился на 0,6–2,9 % (см. табл. 30).

Основной причиной улучшения работы печи в опытном периоде является вдувание в горн топливно-флюсовой смеси, содержащей на тонну чугуна 16,6 кг угля и 3 кг шлаковой корки. Механизм влияния указанной смеси определяется прежде всего прямым благоприятным влиянием увеличения в конечном и частично первичном шлаке содержания фтора и закиси марганца — активных шлакоразжижающих добавок.

Кроме того, вдувание шлаковой корки могло способствовать стабилизации температурного режима и объема фурменных зон.

Существенно повысить эффективность мероприятия могло и то обстоятельство, что дополнительный фтор и закись марганца вводились в шлак, который проходил через фурменные зоны: этот шлак подвержен наиболее значительным колебаниям и в решающей степени определяет работу доменной печи.

В условиях работы доменной печи на основных и тугоплавких шлаках указанные изменения способствовали существенному повышению устойчивости и подвижности конечных и первичных шлаков и, как следствие, улучшению дренажной способности горна, распределения газового потока, схода шихты и соответственно основных технико-экономических показателей.

Выплавка литейного чугуна

При выплавке литейного чугуна определяющим процессом является восстановление кремния, требующее высоких температур в горне и значительного избытка тепла. Этот процесс связан с относительно высоким расходом кокса, значительным выходом восстановительных газов, меньшей степенью использования его химической энергии, соответственно меньшим оптимальным расходом природного газа по сравнению с технологией выплавки передельного чугуна [33, 34].

Оптимизация шихтового, температурно-дутьевого и шлакового режимов плавки в сочетании с внедоменной десульфурацией чугуна выплавки высококачественного литейного чугуна марки ЛКР (по ГОСТ 5.1751–72) [57, 127, 128].

Применение пылеугольного топлива сопровождается значительным снижением расхода кокса и вызывает минимальные изменения температурного и газодинамического режимов плавки. Поэтому можно ожидать, что при выплавке литейного чугуна замена части природ-

ного газа угольной пылью будет способствовать повышению расхода дополнительного топлива при сохранении или повышении температуры горения, что в свою очередь определит повышение эффективности применения комбинированного дутья.

На ДМЗ наравне с передельным освоена технология выплавки литейного чугуна с вдуванием в горн пылеугольного топлива и природного газа. Опыты проведены на доменной печи № 2, выплавлявшей литейный чугун из сырых руд Криворожского бассейна и агломерата ЮГОК с использованием кокса Рутченковского КХЗ и природного газа. Для приготовления угольной пыли использовали концентрат тощего угля Моспинской ЦОФ [123].

Для оценки эффективности применения угольной пыли производительность печи и расход кокса привели к равным условиям по содержанию кремния, выходу шлака, расходу флюса и температуре дутья. По природному газу показатели не приводили к равным условиям, поскольку его снижение при вдувании угольной пыли является технологически необходимым.

Опыты проводили в течение 40 суток. За это время выплавляли около 50 тыс. т литейного чугуна при расходе угольной пыли 40–60 кг/т чугуна.

Применение угольной пыли в количестве 50 кг/т чугуна позволило снизить расход кокса на 10 %. Средний за весь период коэффициент замены составил 1,35 кг кокса на 1 кг топлива. Расход природного газа при этом сократился с 57 до 40–45 м³/т чугуна, температура дутья и его влажность не изменились. Следовательно, освоение технологии выплавки литейного чугуна с вдуванием 50 кг пылеугольного топлива на 1 т чугуна сопровождалось повышением теоретической температуры горения. В результате изменений в расходе указанных видов топлива общая стоимость топлива на 1 т чугуна снизилась на 2,8 руб. Производительность доменной печи при этом повысилась на 2 %, качество чугуна и его температура не изменились.

Сход шихты и устойчивость работы горна существенно не изменились.

За период опытной плавки сгорело 5 воздушных фурм, не было признаков ухудшения дренажной способности горна, что свидетельствует о полной газификации угольной пыли в пределах горна доменной печи.

Эффективность применения угольной пыли при выплавке литейного чугуна оказалась большей, чем при выплавке передельного.

4.3. Совершенствование технологии выплавки чугуна при вдувании пылеугольного топлива с использованием промышленной установки

Особенности технологического режима выплавки чугуна в период освоения промышленной установки

Совершенствование технологии выплавки передельного чугуна с применением пылеугольного топлива в 1980–1983 гг. проходило в сложных технологических условиях. Это объясняется прежде всего крайне неравномерным во времени и по фурмам поступлением пылеугольного топлива, что явилось следствием строительных недоделок промышленной установки, низкого давления компрессорного воздуха, отсутствия систем стабилизации и оптимизации режима пневмотранспорта и приборов контроля фактического расхода топлива во времени и по фурмам. Вторым недостатком было низкое качество и непостоянный химический состав пылеугольного топлива: так, зольность топлива изменялась от 10 до 33 %, а сернистость — от 1,5 до 4,0 %. Данное обстоятельство объяснялось отсутствием постоянной

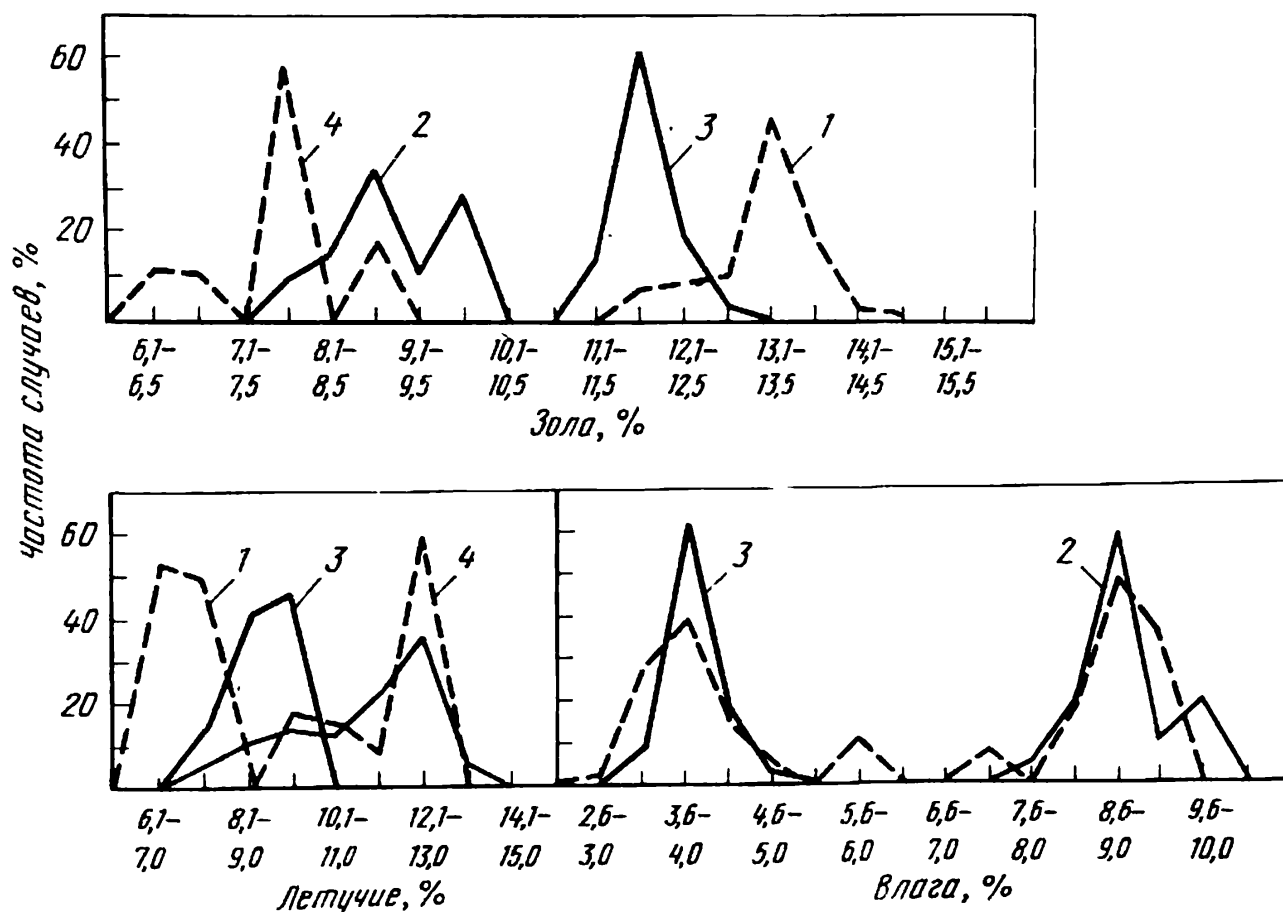


Рис. 46. Технический анализ пылеугольного топлива, используемого на промышленной установке Донецкого металлургического завода:

1 — уголь марки Т шахты Житомирская; 2 — уголь марки Т шахты "Рассвет";
3, 4 — концентрат угля марки Т Чумаковской ЦОФ

угольной базы для пылевдувания и поэтому работой на рядовых углях разных шахт Донбасса (рис. 46).

Неблагоприятными были также технологические условия работы доменных печей № 1 и 2 ДМЗ, что объяснялось непостоянством состава железорудной части шихты, загрузкой в шихту до 40–60 % агломерата со склада, низким качеством марганецсодержащих материалов, ухудшением качества кокса. Существенно усложняли работу доменных печей высокие приходы с шихтой серы (6–9 кг/т чугуна) и щелочей (7,07–10,06 кг/т чугуна).

В сложившихся технологических условиях доменные печи работали со значительными колебаниями нагрева горна и условий схода шихты, крайне нестабильными гарнисажом и дренажной способностью горна, что приводило к зарастанию профиля, формированию настелей и загромождению горна. Так, на доменной печи № 1, работающей в 1981 г. практически постоянно с вдуванием пылеугольного топлива, отмечено более 10 случаев нарушения профиля печи. Устранение этих нарушений сопровождалось, как правило, подачей большегрузных промывочных "пыжей", снижением расхода пылеугольного топлива и природного газа, общим значительным нарушением технологического режима, потерями производительности и перерасходом кокса.

Для обеспечения стабильной работы печей при вдувании в горн пылеугольного топлива были опробованы и внедрены следующие мероприятия.

Работа оборудования для приготовления и вдувания

Выполнена реконструкция распределительно-дозировочных отделений № 1 и 2, модернизированы аэрационные питатели, увеличен диаметр клапанов на наполнении промежуточной емкости и питающего резервуара, разработан и освоен метод определения фактического расхода пылеугольного топлива по фурмам, освоена работа автоматических систем стабилизации режима пневмотранспорта: пере-сыпки топлива, расхода аэрационного и транспортного воздуха, перепада давления питающий резервуар – горн, введен в эксплуатацию автономный воздухопровод, обеспечивающий повышение давления компрессорного воздуха до 0,45–0,50 МПа, освоена работа тепловых индикаторов движения топлива в фурмы, усовершенствована конструкция воздушной фурмы.

В итоге выполненной работы созданы режимные карты для РДО-1 и РДО-2, уменьшена неравномерность поступления топлива во времени и по фурмам до $\pm 10\%$, снижены до 2–3 % простои оборудования.

Улучшение качества пылеугольного топлива

С марта 1982 г. на установке для вдувания пылеугольного топлива стали использовать низкозольные концентраты угля марки Т Чумаковской ЦОФ. На угольном складе установки поддерживали неснижаемый запас угля в количестве 2—4 тыс. т. Поставка углей других шахт прекращена. Освоен ежесуточный контроль химического и фракционного состава пылеугольного топлива, освоен седиментационный метод определения фракционного состава пылеугольного топлива. Выполнены исследования и оптимизирована работа узла приготовления, рассчитанная на получение стабильного по фракционному составу и влажности пылеугольного топлива.

Перечисленные мероприятия способствовали значительному повышению эффективности применения пылеугольного топлива, однако не решали основной проблемы, связанной с низкими стабильностью гарнисажа шахты и нарушением дренажной способности горна. Решение этого и других вопросов технологии было, в основном, обеспечено за счет улучшения фракционного состава шихты, нейтрализации влияния щелочей, оптимизации системы загрузки шихты и других параметров технологического режима.

Улучшение фракционного состава шихты

Исследования показали, что в обычной практике ДМЗ приход с железорудной частью шихты фракции 5—0 мм составлял до 500—600 кг/т чугуна, т.е. превышал аналогичную величину на других металлургических заводах СССР в 2—5 раз. Основным поставщиком фракции 5—0 мм был агломерат ЮГОК, содержащий ее 26 %. Однако в обычной практике завода до 40—60 % агломерата загружали с рудного двора — "из резерва": содержание мелочи в таком агломерате повышалось до 35—45 %. При содержании в шихте 70 % агломерата и загрузке в шихту половины агломерата "из резерва" этот компонент шихты вносил до 70—80 % фракции 5—0 мм.

Много мелочи вносила чистурская марганцевая руда IV сорта, содержащая 50—60 % фракции 5—0 мм, расход которой составлял 50—100 кг/т чугуна. Значителен (до 3—5 %) выход фракции 5—0 мм и из окатышей ЦГОК, доля которых в шихте составляла до 20—50 %. Для улучшения фракционного состава шихты были внедрены следующие мероприятия:

увеличено от 15—18 до 28—30 количество бункеров для выгрузки агломерата:

разработаны и частично выполнялись графики равномерной поставки агломерата: по одному маршруту в сутки;

агломерат выдерживался "на колесах" в тех случаях, когда для этого были необходимость и возможность;

снижено содержание марганца в чугуне до 0,6—0,8 %;

частично или полностью заменена чиатурская марганцевая руда IV сорта шлаком силикомарганца и шлаковой коркой;

известняк фракции 20–80 мм заменен известняком 20–50 мм;

в составе промывочных шихт стали использовать сварочный шлак, шлак силикомарганца и криворожскую железную руду — прочные и кусковые материалы.

Реализация перечисленных и других мероприятий позволила уменьшить в 1983 г. долю "резервного" агломерата в шихте до 5–10%, значительно сократить расход или вывести полностью из шихты чиатурскую марганцевую руду IV класса. В итоге указанные и другие мероприятия позволили вдвое и более сократить приход с шихтой фракции 5–0 мм, что явилось фундаментом мероприятий по повышению стабильности профиля доменной печи.

Нейтрализация влияния щелочей и стабилизация профиля шахты

Высокие (7,07–10,06 кг/т чугуна) приход щелочей с шихтой и доля перехода их в газ определили превышение в 10–20 раз безопасных норм их концентрации в горновом газе [130; 131]. Из технической литературы следует, что, переходя в таких количествах в газ, щелочи вызывают значительное ухудшение прочности кокса и окатышей, нарушение условий распределения газового потока в печи, профиля печи, дренажной способности горна, способствуют настыванию. Указанные изменения значительно ухудшают технико-экономические показатели плавки, в частности, снижают производительность печей на 20% и более [130]. Вредное влияние щелочей значительно усугубляет большой приход с шихтой фракции 0–5 мм.

Исследования настывей, удаленных на доменных печах № 1 и 2, подтвердили, что в их состав входят кокс, графит, чугун, шлак, агломерат и окатыши. Шлак, являющийся основным связующим материалом, состоит преимущественно из кристаллов мелилита, гелинита, волластонита и щелочносодержащих минералов. Характерна слоистая структура настыва, в которой тонкими слоями располагались шлаки с высоким (в отдельных пробах до 35–54%) содержанием щелочей.

Приведенные данные свидетельствуют об интенсивной конденсации щелочей в шахте доменной печи и определяющем влиянии этого процесса на формирование гарнисажа.

Общепризнанными эффективными средствами борьбы со щелочами являются снижение их прихода с шихтой до безопасного уровня (1,5–4,5 кг/т чугуна), периодическое применение промывочных шихт из "кислых" материалов, периодическое или постоянное снижение основности шлака и нагрева горна с целью повышения степени ухода щелочей со шлаком до 80% и более. В условиях ДМЗ при работе печи с вдуванием пылеугольного топлива только 35,5–37,1% щелочей удалялось со шлаком (табл. 31).

Т а б л и ц а 31. Балансы щелочей по периодам работы доменной печи № 1

Шихтовые материалы продукты плавки	Июль 1981 г.				Октябрь 1981 г.			
	расход материала, кг/т	содержа- ние в ма- териала, %	приход на 1 т чугуна		расход материала, кг/т	содержа- ние в ма- териале, %	приход на 1 т чугуна	
			кг/т	%			кг/т	%
<i>Приход</i>								
Кокс скиповый (сух.)	522	0,38	1,98	27,9	507	0,40	2,03	25,9
Пылеугольное топливо.	19	0,68	0,13	1,8	33	0,68	0,23	2,9
Агломерат ЮГОК	918	0,24	2,20	31,0	1254	0,29	3,63	46,4
Окатыши ЦГОК	711	0,26	1,85	26,1	377	0,26	0,98	12,5
Железная руда	11	0,40	0,05	0,7	11	0,42	0,05	0,6
Марганцевая руда	39	1,55	0,60	8,5	32	1,62	0,52	6,6
Известняк.	133	0,12	0,16	2,3	120	0,20	0,24	3,1
Плавиковый шпат.	7	1,29	0,09	1,3	12	1,3	0,15	1,9
Шлаковая корка.	5	0,61	0,03	0,4	2	0,50	0,01	0,1
<i>Расход</i>								
Шлак	425	0,62	2,63	37,1	456	0,61	2,78	35,5
Колошниковая пыль	137	0,30	0,41	5,8	89	0,56	0,50	6,4
Вода газоочистки	17 м ³ /т	—	0,96	13,5	1,7 м ³ /т	—	0,96	12,3
Остается в печи (по разности)	—	—	3,01	43,6	—	—	4,56	45,9

Шихтовые материалы и продукты плавки	Ноябрь 1981 г.				21.4—02.5.83 г.				04—11.05.83 г.			
	расход материала, кг/т	содержание в материале, %	приход на 1 т чугуна, кг/т	%	расход материала, кг/т	содержание в материале, %	приход на 1 т чугуна, кг/т	%	расход материала, кг/т	содержание в материале, %	приход на 1 т чугуна, кг/т	%
<i>Приход</i>												
Кокс скиповый (сух.)	531	0,44	2,34	33,0	459,1	0,27	1,2306	22,7	507,1	0,25	1,2677	23,5
Пылеугольное топливо	22,0	0,63	0,14	2,0	82,3	0,25	0,2057	3,8	0	—	—	—
Агломерат ЮГОК	1058	0,22	2,33	33,0	1058,7	0,28	2,9644	54,3	974,7	0,26	2,5342	46,9
Окатыши ЦГОК	576	0,20	1,15	16,3	447,4	0,16	0,7158	13,1	464,7	0,16	0,7435	13,8
Железная руда	10	0,42	0,04	0,6	4,0	0,18	0,0072	0,1	54,4	0,18	0,0979	1,8
Марганцевая руда	43	1,41	0,61	8,6	—	—	—	—	47,6	1,58	0,7521	13,9
Известняк	114	0,26	0,30	4,2	148,3	0,006	0,0089	0,2	160,4	0,004	0,0064	0,1
Плавиновый шпат	11	1,30	0,14	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—
Шлаковая корка	5	0,40	0,02	0,3	50,8	0,62	0,3150	5,8	—	—	—	—
<i>Расход</i>												
Шлак	415	0,61	2,53	35,8	463,1	0,98	4,5384	83,2	438,4	0,94	4,121	76,3
Колошниковая пыль	101	0,44	0,44	6,2	82	0,64	0,5248	9,6	78	0,48	0,3744	6,9
Вода газоочистки	1,7 м ³ /т	—	0,96	12,3	1,7 м ³ /т	0,20	0,7600	13,9	4,9	0,47	2,3030	42,6
Шлам	—	—	—	—	16,0	0,48	0,0704	1,4	12,5	0,67	0,0838	1,6
Остается в печи (по разности)	—	—	4,10	44,5	—	—	-0,4450	8,1	—	—	-1,4804	27,4

Основными поставщиками щелочей были агломерат, марганцевые руды, кокс. Характерны значительные колебания содержания щелочей в шихтовых материалах (рис. 47, табл. 31).

Некоторое снижение прихода щелочей с шихтой удалось обеспечить за счет снижения расхода топлива (кокс + пылеугольное топливо), а также марганцевых добавок.

Само пылеугольное топливо вносит 2,0–4,2 % щелочей. Поэтому общий приход щелочей с применением пылеугольного топлива существенно не изменился. Тем не менее, применение пылеугольного топлива может усугубить негативное влияние щелочей благодаря

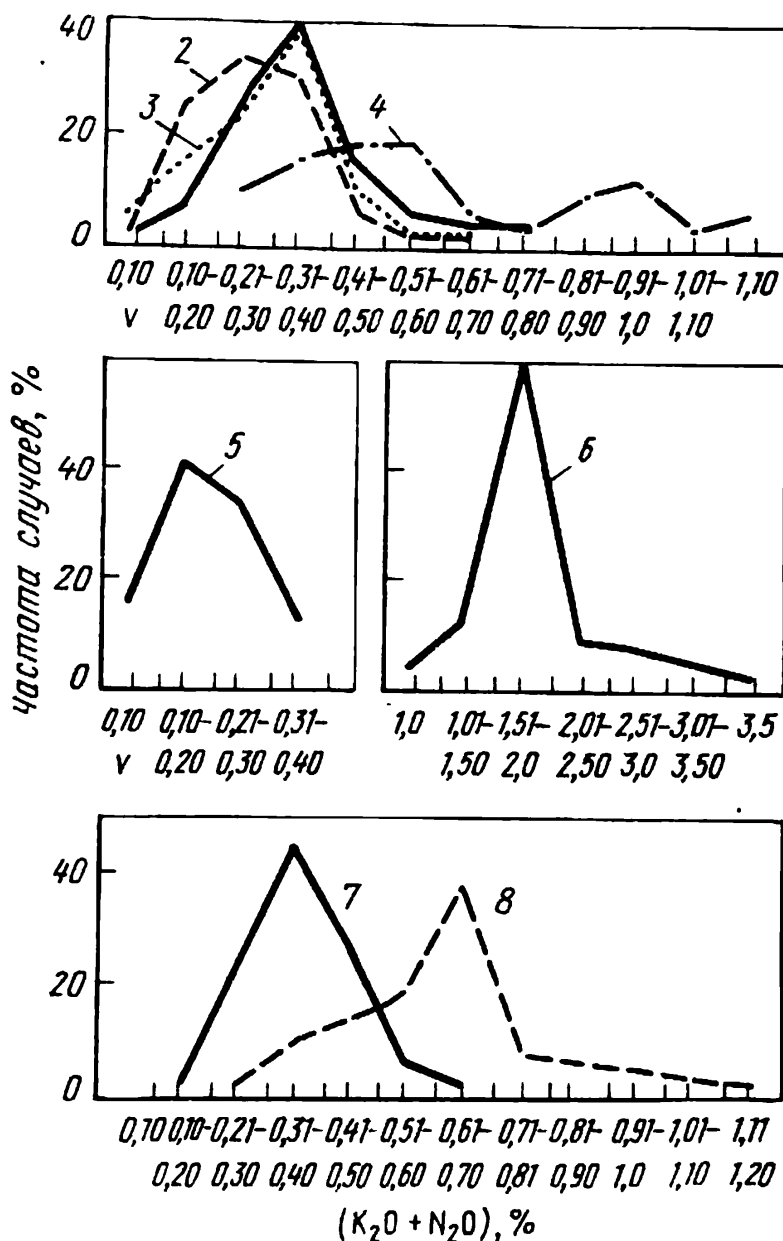


Рис. 47. Частотные диаграммы распределения суммарного содержания щелочей в шихтовых материалах и топливе:

1 – агломерат ЮГОК; 2 – окатыши ЦГОК (СевГОК); 3 – окатыши ПГОК; 4 – железная руда; 5 – известняк обычный; 6 – марганцевая руда; 7 – кокс; 8 – пылеугольное топливо

увеличению рудных нагрузок и прихода фракции 0–5 мм на 1 т кокса, что предопределяет ухудшение газопроницаемости шихты, устойчивости газового потока, температурного режима горна и шахты. При неизменном составе железорудной части шихты и кокса существенное снижение прихода щелочей затруднительно. Поэтому очевидно, что нейтрализация влияния щелочей в конкретных технологических условиях возможна лишь за счет мероприятий, обеспечивающих максимальный их перевод в шлак.

Статистический анализ подтвердил, что решающее влияние на удаление щелочей со шлаком оказывают основность шлака, содержание в нем закиси марганца и содержание в чугуне кремния (рис. 48, 49). До 70–90 % случаев изменения содержания щелочей в шлаке определяется этими показателями. Снижение основности шлака на 0,1 % и содержания в чугуне кремния на 0,1 % определяют увеличение перехода щелочей в шлак соответственно на 1,7 и 0,3 кг/т или ориентировочно на 20 и 4 %.

Из рис. 48 видно, что и устойчивый уровень удаления щелочей в шлак обеспечивался при содержании в чугуне кремния 0,6–0,8 % и основности шлака 1,21–1,30. Указанный режим, однако, не мог быть принят к внедрению, поскольку при данных параметрах работы печи выход некондиционного по сере чугуна увеличивался до 19–21 %.

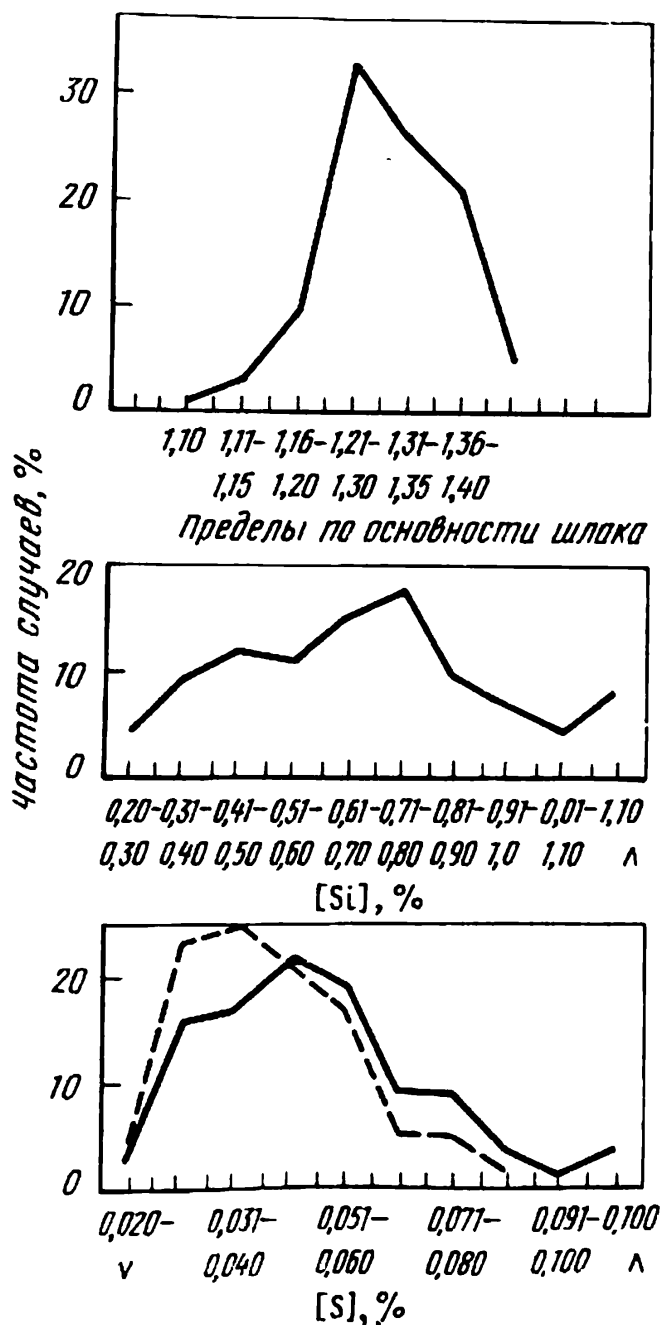


Рис. 48. Частотные диаграммы распределения основности шлака, содержания кремния и серы в чугуне при условии содержания в шлаке более 1,4 % щелочей

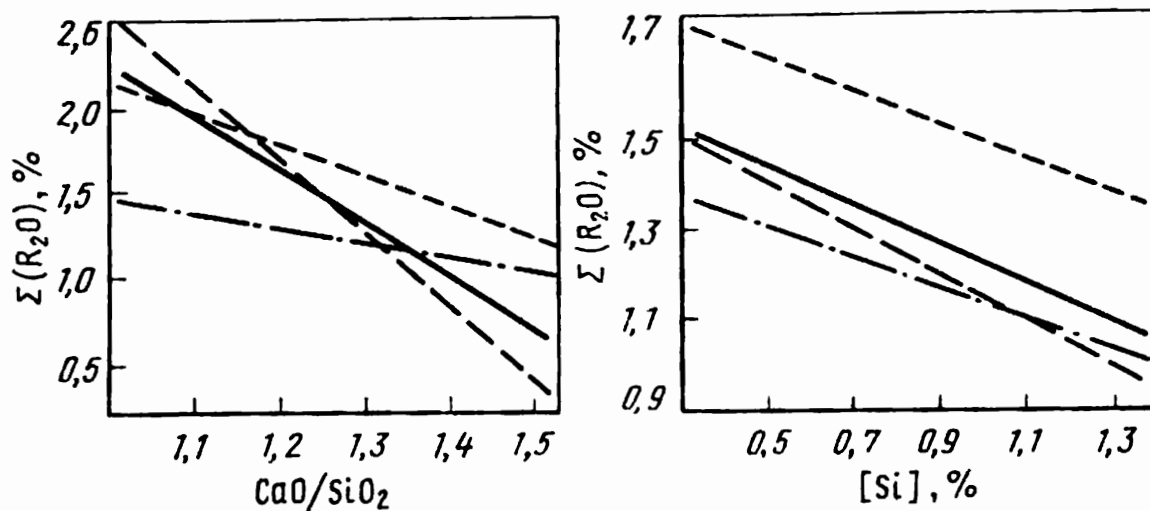


Рис. 49. Изменение содержания щелочей в шлаке в зависимости от технологических показателей доменных печей:
1, 3 – 1; 2 – 2

Принятая в 1981 г. методика периодической промывки профиля большегрузными подачами (до 50–200 т) имела успех лишь в случаях уже сложившегося и значительного нарушения профиля и не приносила успеха как профилактическое мероприятие.

Для улучшения профилактической работы против зарастания профиля печи с апреля 1982 г. на доменных печах № 1 и 2 начали систематически применять промывочные "кислые" материалы: железную руду, окатыши ПГОК и ЦГОК, марганцевую руду, шлак силико-марганца и шлаковую корку. Марганецсодержащие материалы полностью вводились в составе промывочных подач, известняк — в ограниченном количестве или полностью исключался. Масса кокса в промывочной подаче и система ее загрузки не изменялись по сравнению с основными подачами.

Анализ материальных балансов за 1983 г. показал, что принятые меры позволили снизить общий приход щелочей на 1 т чугуна, а степень их перехода в шлак повысить до 76,3–83,2 % (табл. 31). Улучшению перехода щелочей в шлак способствовали также ограничения основности шлака и содержания в чугуне кремния.

На доменных печах № 1 и 2 традиционной была система загрузки шихты "коксом вперед" при величине коксовой колоши 4,5–5,0 т. Однако по мере повышения рудных нагрузок и в условиях работы с большим приходом на 1 т чугуна фракции 0–5 мм, рациональным оказалось уменьшение веса коксовой колоши до 4,0–4,25 т при весе рудной части шихты 14–16 т, а также загрузка подачи агломератом (окатышами) "вперед".

В практике работы с применением пылеугольного топлива в 1968–1978 гг. основным параметром компенсации был природный газ, расход которого для сохранения на исходном уровне теоретической

Т а б л и ц а 32. Показатели работы доменной печи № 1 ДМЗ в период освоения технологии с применением пылеугольного топлива

Показатели	Январь	Февраль— апрель (А)	Июнь— август (Б)	Сентябрь	Октябрь
Производство чугуна (привед.), т/сут	1630,1	1649,8	1675,9	1717,9	1762,5
Расход кокса (привед.), кг/т чугуна	517,6	486,6	468,3	453,2	447,6
Расход сухих материалов, кг/т чугуна:					
агломерат ЮГОК	1011,5	994,6	1004,4	1023,8	1033,5
окатыши	536,8	526,2	516,0	501,9	455,2
марганцевая руда и марганецсодержащие добавки	50,7	56,1	40,6	31,4	31,6
сварочный шлак	0	0,2	11,6	5,0	0
известняк	178,6	139,2	154,1	148,5	124,0
металлодобавки	141,5	174,6	157,7	131,1	157,9
Дутьевой режим:					
количество, м ³ /мин.	2175	2099	2024	1933	1905
давление, МПа	0,230	0,238	0,239	0,239	0,228
температура, °С	1070	1078	1080	1088	1078
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	75,7	69,3	73,1	78,0	61,7
Расход пылеугольного топ- лива, кг/т чугуна	3,5	38,6	33,7	38,4	39,9
Колошниковый газ:					
температура, °С	264	284	335	321	307
давление, МПа	0,127	0,133	0,133	0,130	0,118
Химический состав, %:					
СО ₂	14,7	14,5	15,5	16,4	16,0
СО	25,7	25,3	24,5	24,0	23,8
Н ₂	5,3	5,4	5,5	5,8	5,4
Степень использования СО	0,364	0,364	0,388	0,406	0,402
Вынос колошниковой пы- ли, кг/т чугуна	62,9	81,6	77,1	73,77	67,4
Химический состав чугу- на, %:					
Si	0,98	0,90	0,81	0,87	0,85
Mn	0,77	0,77	0,65	0,55	0,64
S	0,039	0,039	0,034	0,035	0,039
Химический состав шлака, %:					
Al ₂ O ₃	9,1	9,1	8,7	8,9	9,2
MgO	4,0	3,9	4,0	3,0	3,9
S	1,99	2,12	2,06	1,97	1,96
MnO	0,68	0,96	1,25	0,66	0,71
FeO	0,58	0,59	0,57	0,51	0,49
CaO/SiO ₂	1,29	1,31	1,29	1,30	1,30
Выход шлака, кг/т чугуна	464,5	439,7	448,1	442,0	420,0
Текущие простои, ч—мин .	6—21	26—46	32—02	8—59	17—17

Показатели	Январь	Февраль— апрель (А)	Июнь— август (Б)	Сентябрь	Октябрь
Замена воздушных фурм, шт.		29	15	7	5
Технический анализ пыле- угольного топлива, %:					
влага	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6
зола	19,3	17,2	15,3	9,8	9,6
сера	2,19	1,67	1,80	1,76	2,25
Степень прямого восста- новления, %	41,8	40,6	36,2	38,7	42,1
Теоретическая температура горения, °С	2043	2016	2031	2048	2033
Суммарный расход углеро- да, кг/т чугуна	490,4	494,5	476,8	471,2	441,4
Суммарный расход услов- ного топлива, кг/т чугуна	581,5	591,6	567,4	—	—
Суммарная стоимость топлива, руб/т чугуна. . . .	34,54	33,71	32,62	32,50	29,92

температуры горения и выхода горновых газов на 1 т чугуна сокращался на 0,2—0,3 м³/кг пылеугольного топлива.

Негативное влияние на газодинамику доменной печи замены части кокса пылеугольным топливом нейтрализуется при достижении суммарного коэффициента замены $\Sigma K_3 = 1,0$ и выше.

Следовательно, в данном случае компенсирующим может быть любое мероприятие, обеспечивающее увеличение ΣK_3 : снижение расхода сырого флюса и выхода шлака, повышение температуры дутья и снижение его влажности, металлизация шихты, повышение калорийности дополнительного топлива или кокса и т.д. При достижении уровня $\Sigma K_3 = 1,0$ расход природного газа может существенно не уменьшаться, что в итоге будет способствовать общему снижению расхода кокса.

В практике освоения промышленной установки повышение величины ΣK_3 до номинального уровня было обеспечено за счет снижения зольности пылеугольного топлива до 7—8 %, частичного вывода из шихты агломерата из "резерва" и чистурской марганцевой руды, внедрения промывочных подач и т.д.

Как показали промышленные плавки, указанных изменений оказалось достаточно для компенсации вдувания 30—40 кг пылеугольного топлива на 1 т чугуна без существенного изменения расхода природного газа.

Для количественной оценки эффективности мероприятий по ста-

билизации профиля печи были рассмотрены периоды работы печи № 1 по прежней технологии — февраль—апрель (период А) и по новой — июнь—август (период Б) (табл. 32). В опытный период значительно (61—91 %) повысился показатель устойчивого схода шихты, в 10 раз уменьшилось количество большегрузных промывочных "пыжей", подаваемых для устранения зарастания профиля и выравнивания хода печи, уменьшилось количество принудительных осадок и т.д.

Итоговыми показателями работы печи в опытный период стали прирост приведенных к равным условиям производительности печи на 1,6 % и снижение расхода кокса на 18,2 кг/т чугуна, или на 3,8 %.

Совершенствование и эффективность технологии выплавки передельного чугуна с применением пылеугольного топлива

Оценку эффективности применения пылеугольного топлива выполнили на примере доменной печи № 1, поскольку на ней имелся месячный период работы без пылеугольного топлива при устойчивом состоянии оборудования и технологического режима.

Среднемесячный расход топлива изменялся от 30 до 40 кг/т чугуна. Фактическое снижение расхода кокса по сравнению с I—II кварталами 1980 г. (начало внедрения пылеугольного топлива) составило в III—IV кварталах 1982 г. 70 кг/т чугуна, или более 70 тыс. т кокса в год, в том числе за счет применения пылеугольного топлива — 30 тыс. т (табл. 32, 33).

Как указывалось ранее, достигнутое снижение расхода кокса объясняется наравне с применением пылеугольного топлива принятием мер по стабилизации технологического режима плавки: нейт-

Т а б л и ц а 33. Фактические расходы топлива при выплавке передельного чугуна на Донецком металлургическом заводе в 1980—1987 гг. (по данным технического отчета завода)

Год	Расход пылеугольного топлива, кг/т чугуна	Расход природного газа, м ³ /т чугуна	Расход кокса сухого, кг/т чугуна	Суммарный расход условного топлива, кг/т чугуна	Стоимость топлива, руб/т чугуна
1980, I полугодие	0	82	592,0	681,2	41,46
1980, II полугодие	11	83	578,0	678,4	40,96
1981	19	73	554,7	651,0	39,53
1982	36	73	531,0	642,8	38,69
1983	33	77	517,2	631,1	37,73
1984	42	76	509,0	630,0	37,56
1985	63	70	501,7	634,7	37,83
1986	66	71	490,0	627,1	37,33
1987 (4 месяца)	69	72	479,0	620,0	36,73

рализация влияния щелочей, снижение зольности и сернистости пылеугольного топлива, сокращение расхода марганцевых добавок, оптимизация системы загрузки шихты, что обеспечило компенсацию негативных изменений газодинамического режима, определенных заменой части кокса пылеугольным топливом [115, 117].

Средний по периодам, приведенный к равным условиям коэффициент замены кокса составил 0,64 для пылеугольного топлива из рядового угля и 0,8 для топлива из концентрата угля Чумаковской ЦОФ.

Производительность печей по мере увеличения расхода топлива существенно не изменилась (см. табл. 32, 33).

Качество чугуна в периоды с вдуванием пылеугольного топлива также существенно не изменилось, несмотря на некоторое снижение содержания в чугуне марганца (табл. 32). Сопоставление периодов А и Б показывает, что стабилизация схода шихты, устранение зарастания профиля и снижение расхода кокса способствовали улучшению качества чугуна по содержанию кремния и серы. Так, выход некондиционного чугуна в марте и августе снизился соответственно по кремнию и сере от 42,4 до 24,8 % и от 19,1 до 15,6 %. При этом основность шлака также стабилизировалась: доля выпусков шлака с основностью более 1,35 снизилась от 24,4 до 15,1 % при средней основности 1,31 и 1,30 соответственно (рис. 50).

Применение пылеугольного топлива сопровождалось улучшением

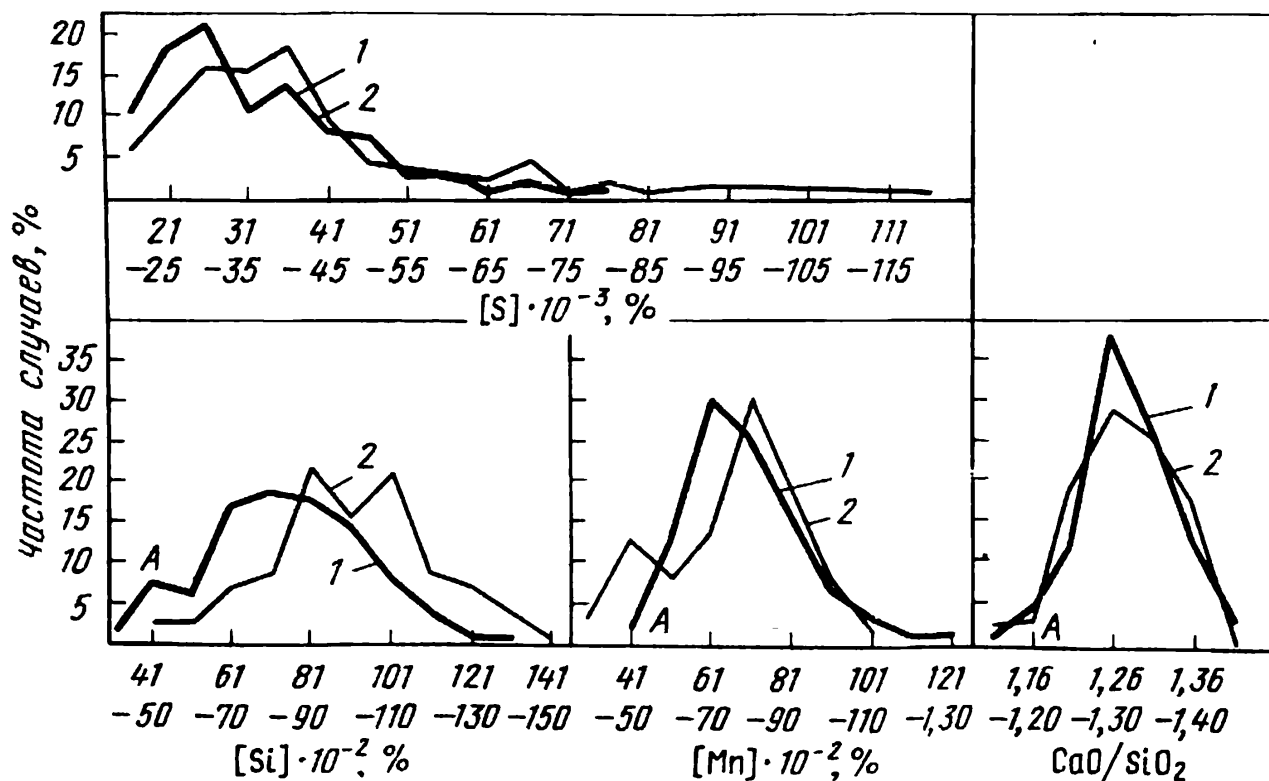


Рис. 50. Качество чугуна в периодах с применением (1) и без применения (2) пылеугольного топлива

основных комплексных показателей плавки. Так, степень использования восстановительного потенциала горновых газов повысилась на 1,3–4,2 %, теоретическая температура горения сохранилась на высоком исходном уровне: 2018–2059 °С (см. табл. 32).

Указанные изменения показателей плавки свидетельствуют о благоприятных изменениях технологического режима, определенных как непосредственной заменой части кокса пылеугольным топливом, так и комплексом технологических мероприятий, обеспечивающих дополнительное снижение расхода кокса, выхода горнового газа и повышение ΣK_3 до уровня более 1.

Опытно-промышленная плавка была проведена на доменной печи № 1 с целью уточнения основных параметров технологического режима при повышенном расходе пылеугольного топлива, приготовленного из низкозольного концентрата тощего угля Чумаковской ЦОФ ($A^c = 9\%$). В период опытной плавки выполнена поверка и корректировка показаний вагон-весов и коксовых головок, повышена точность определения веса пылеугольного топлива, обеспечено поддержание стабильного состава шихты и основных параметров шлакового и температурно-дутьевого режимов.

В опытных периодах поддерживался повышенный расход кислорода для обогащения дутья: 3,2 тыс. м³/ч, увеличен расход сварочного шлака, шлаковой корки и шлака силикомарганца с целью усиления промывок горна и профиля шахты. Характерной особенностью плавки было относительно малое снижение расхода природного газа на вдувание топлива: фактическая компенсация пылеугольного топлива природным газом составила $< 0,1$ м³/т пылеугольного топлива. Основными компенсирующими мероприятиями стали снижение зольности пылеугольного и обогащение дутья кислородом.

Из табл. 34 видно, что средний приведенный коэффициент замены составил 0,82–0,97 соответственно для расхода пылеугольного топлива 68,0–93,2 кг/т чугуна. Пылеугольным топливом было заменено 52,0–73,1 кг кокса (11,4–14,3 % соответственно). Расход условного топлива и общий расход углерода сохранялись практически на исходном уровне.

Приведенная производительность доменной печи и интенсивность по углероду также сохранились на исходном уровне и превышали плановый уровень.

Таким образом, указанными балансовыми опытными плавками подтверждена высокая технологическая и экономическая эффективность увеличения расхода низкозольного пылеугольного топлива до 60–80 кг/т чугуна.

После проведения опытных плавок на доменной печи № 1 поддерживался повышенный (на уровне проектной мощности установки — 65 кг/т чугуна) расход пылеугольного топлива: показатели эффектив-

Т а б л и ц а 34. Показатели работы доменных печей ДМЗ с вдуванием пылеугольного топлива

Показатели	V	VI	VII	IX
Продолжительность, сут.	10	15	12	53
Производительность, т/сут.	1781,9	1792,3	1735,0	1738,3
Расход кокса, кг/т чугуна, факт. . . .	519,9	466,8	459,1	439,3
Расход пылеугольного топлива, кг/т чугуна	0	68,0	93,2	78,7
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	75,2	70,8	68,8	63,9
Температура дутья, °С	1067	1062	1058	1063
Расход материалов, кг/т чугуна:				
агломерата	958,2	994,2	1058,7	895
окатышей	442,6	458,9	447,4	508,2
флюса	140,6	133,5	148,3	248,4
марганецсодержащие материалы	49,1	55,0	51,0	45,2
металлодобавки	214,8	179,2	171,5	174,3
Содержание в чугуне, %:				
Si	0,76	0,77	0,81	0,76
Mn	0,84	0,86	0,63	0,56
S	0,030	0,028	0,034	0,036
Выход шлака, кг/т чугуна	425,8	431,1	463,1	496,0
CaO/SiO ₂	1,28	1,29	1,30	1,27
Объемная доля кокса в шихте, % . . .	56,05	52,8	51,5	50,9
Средний диаметр кусков шихты, мм	37,9	36,6	36,1	36,2
Теоретическая температура горения, °С	2051	2042	2069	2057
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	2186,4	2207,8	2210,5	1901,0
Суммарный выход газов-восста- новителей, м ³ /т чугуна	886,2	832,2	830,3	710,9
Время контакта газа с оксидом же- леза η_K , с	0,573	0,520	0,609	0,554
Степени использования:				
водорода	0,346	0,330	0,384	0,402
оксида углерода	0,355	0,365	0,359	0,385
Степень прямого восстановления r_d , %	31,9	35,0	32,8	40,7
Коэффициент использования тепло- вой энергии углерода, %	57,01	56,55	56,06	57,56
К.п.д. тепла, %	78,48	80,41	80,0	90,79
Расход условного топлива, кг/т чугуна	578,5	583,6	591,5	550,4

ности применения пылеугольного топлива в основном сохранились на высоком уровне в режиме длительной промышленной эксплуатации (см. табл. 34) [116].

4.4. Совершенствование технологии выплавки чугуна при работе доменных печей с применением дополнительных топлив

На ДМЗ разработаны и освоены технологические мероприятия, способствовавшие наравне с другими компенсирующими мероприятиями повышению устойчивости и эффективности технологического режима доменной плавки при вдувании в горн пылеугольного топлива и природного газа.

Проведены промышленные испытания автоматических яркостных пирометров для измерения температуры фурменных зон доменных печей.

Возможность качественной оценки уровня нагрева горна по показаниям яркостных пирометров является их основным, но не единственным преимуществом. По показаниям этих приборов можно поддерживать такую температуру в фурменных зонах, которая является оптимальной с точки зрения ровного схода шихты, достижения высокой степени использования восстановительной способности горновых газов и т.д. Измерение температуры во всех фурменных зонах дает возможность установить неравномерность работы печи по окружности. Непрерывный контроль за состоянием фурменных зон дает возможность своевременно установить нарушения технологического режима плавки, выражающиеся в глубоком похолодании горна, оползании гарнисажа, одностороннем сходе шихты, появлении настывлей, попадании в шахту печи воды из прогоревших холодильников. Непрерывное измерение температуры фурменных зон яркостными пирометрами устраняет субъективность в оценке теплового состояния горна и фурменных зон [94].

Измерение температуры чугуна и верхнего шлака на выпуске необходимо для контроля за изменением теплового состояния горна и поддержания этого показателя на уровне, наиболее благоприятном для получения качественного чугуна и высокого уровня остальных показателей плавки. Измерение температуры чугуна и шлака на выпуске может оказаться необходимым при освоении новых видов сырья, при внедрении каких-либо изменений технологического режима, при отработке оптимального режима плавки или устранения длительных нарушений работы печи. В этих условиях измерение температуры чугуна и шлака на выпусках дает возможность иметь надежный и прямой показатель нагрева горна и качества чугуна, что в значительной мере облегчит и ускорит решение поставленных задач [94, 132].

Анализ технической литературы и опыт работы доменных печей Донецкого металлургического завода показывают, что между расходом кокса и технологическими параметрами плавки существует экстремальная зависимость. Разработана и опробована программа расчета

на ЭЦВМ "Минск-32" экстремальных значений основных параметров плавки, обеспечивающих работу доменной печи с минимально возможным в данных технологических условиях расходом кокса. Расчеты, выполненные для условий доменной печи № 1 ($V_{\text{п}} = 1033 \text{ м}^3$), показывают, что между расходом кокса, с одной стороны, и интенсивностью плавки, расходом природного газа, содержанием в чугуна марганца и кремния, показателями качества агломерата и кокса, с другой, имеется устойчивая экстремальная зависимость. При экстремальных [133] значениях параметров расхода кокса мог быть на 4–8 % ниже фактического.

В условиях работы доменных печей на основных ($\text{CaO/SiO}_2 = 1,25 \div 1,35$) шлаках освоение технологии выплавки передельного чугуна с введением в шихту фторсодержащих шлакоразжижающих материалов способствовало стабилизации их физических свойств и химического состава, улучшению схода шихты и качества передельного чугуна. На основе фтористых шлаков освоена технология выплавки маломарганцовистого передельного чугуна из шихты, содержащей до 50–100 % окатышей [134].

Применение наклонных воздушных фурм эффективно при выплавке чугуна разных видов.

Применение фурм с наклоном $9\text{--}15^\circ$ к горизонту при выплавке ферромарганца существенно улучшило дренажную способность горна, что способствовало снижению расхода кокса и повышению производительности печи на 1 %, увеличению срока службы воздушных фурм и амбразур в 2–3 раза, снижению простоев печи в 2 раза, уменьшению расхода марганцевой руды на 15–20 кг/т чугуна и повышению температуры чугуна на выпуске до $1550\text{--}1600^\circ\text{C}$, что в общем итоге обеспечило для доменной печи объемом 1033 м^3 получение годового экономического эффекта в размере 135 тыс. руб. [135, 136].

Применение воздушных фурм с наклоном $4,5\text{--}8^\circ$ при выплавке передельного и литейного чугуна способствовало увеличению их срока службы и значительному снижению текущих простоев печи. При выплавке литейного чугуна отмечено также улучшение условий восстановления кремния и десульфурации чугуна в печи [137].

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАМЕНЫ ЧАСТИ КОКСА ПЫЛЕУГОЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ

Были рассмотрены комплексная оценка эффективности замены части кокса пылеугольным топливом с учетом изменений в металлургической и коксохимической подотраслях, а также в горнорудной промышленности, эффективность строительства промышленных уста-

новоков приготовления и вдувания пылеугольного топлива в доменные печи Ждановского "Азовсталь" и Коммунарского металлургических комбинатов, фактическая эффективность использования пылеугольного топлива на примере работы опытно-промышленной и промышленной установок для приготовления и вдувания пылеугольного топлива в доменные печи ДМЗ.

5.1. Комплексная оценка эффективности применения пылеугольного топлива в доменном производстве

Широкое промышленное внедрение технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива, приготовленного из недефицитных марок угля, может сопровождаться:

снижением потребности в металлургическом коксе на 10–20 %, что создает предпосылки для обновления и ремонта печного фонда КХЗ;

выводом из коксошихты части неспекающихся и слабоспекающихся углей, что улучшает качество кокса и показатели работы доменных печей;

уменьшением выброса в атмосферу пыли, серы и других вредных материалов, а также загрязнения водного бассейна;

уменьшением капиталоемкости, площадей, занятых оборудованием, повышением производительности труда при расчете этих показателей для комплекса коксохимической и металлургической промышленности [138].

С учетом изложенного был выполнен комплексный расчет эффективности массового промышленного внедрения пылеугольного топлива для основных доменных цехов Украины*.

Условия, принимаемые при экономической оценке

Возможными ресурсами угля для приготовления пылеугольного топлива, удовлетворяющими требованиям технологии доменной плавки, являются менее дефицитные неспекающиеся и слабоспекающиеся обогащенные угли марок Г и Т, которые могут поставляться следующими обогатительными фабриками: Чумаковской, Советской, Кондратьевской, Углегорской, Краснолиманской и Павлоградской.

Намеченные для получения пылеугольного топлива ресурсы обеспечиваются запасами углей и существующими мощностями для их добычи.

В дальнейшем потребность в сырье для приготовления пылеугольного топлива может удовлетворяться за счет газовых углей.

* В выполнении расчета принимали участие сотрудники УХИН – П.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан, УкрНИИ углеобогащение – И.Е. Святец, ДонНИИчермета – А.И. Стрелец, Л.Я. Воронова, Л.П. Брусов и др.

На основании теоретических исследований, а также промышленного опыта для расчета экономической эффективности приняли относительный расход пылеугольного топлива равным 100 кг/т чугуна [11, 26, 37, 38]. Возможные в 1986–1990 гг. выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива и потребность в угле (концентрате) приведены в табл. 35.

Минуглепромом СССР определены ресурсы углей Донецкого, Львовско-Волынского, Печорского, Кузнецкого и Карагандинского бассейнов для производства планируемых на коксохимических заводах Украины кокса. При вдувании в доменные печи концентрата тощих углей потребность в шихте для коксования уменьшается на 6,0 млн. т за счет снижения производства доменного кокса на 4,5 млн. т. В этом случае марочный состав шихты, используемой для коксования, улучшится. Так, содержание газовых углей уменьшится на 4,7 млн. т, а тощие угли будут полностью выведены из сырьевой базы коксования.

При вдувании в доменные печи газовых углей ($A^c = 7,5 \%$) потребность в доменном коксе снижается на 3,6 млн.т, а потребность в шихте уменьшается соответственно на 5,0 млн.т, что также позволит полностью отказаться от использования для целей коксования

Т а б л и ц а 35. Возможная годовая потребность в углях (концентратах) при выплавке чугуна с применением пылеугольного топлива в 1986–1990 г.

Металлургические комбинаты (заводы)	Возможные изменения показателей при вдувании пылеугольного топлива			
	потребность в угле (кон- центрате), тыс. т	потребность в сухом пы- леугольном топливе, тыс. т	Снижение потребности доменном коксе при ис- пользовании углей концентрат Т, тыс. т	Снижение потребности доменном коксе при ис- пользовании углей концентрат Г, тыс. т
Макеевский	370	323,8	340	290
Енакиевский	360	314,5	330	280
Коммунарский (без доменных печей № 1 и 2)	360	360,0	330	280
Донецкий (без доменной печи № 3)	140	124,5	130	110
Имени Ильича	600	520,3	600	510
Криворожский (без доменной печи № 9)	1000	913,5	960	810
Имени Дзержинского.	500	438,0	460	390
"Запорожсталь"	500	426,5	460	390
"Азовсталь"	680	596,1	630	530
Имени Петровского.	260	222,6	230	200
В с е г о	4770	4200	4470	3790

тощих углей и уменьшить долевое участие газовых углей на 3,7 млн.т. Содержание углей основных марок (Ж, К и ОС) в шихте возрастает в первом случае на 6,0, а во втором на 5,0 %.

Известно, что повышение содержания углей основных марок в шихте за счет снижения слабоспекающихся газовых и неспекающихся тощих углей приводит к улучшению качества кокса по показателям прочности и истираемости.

Указанное изменение состава шихты на коксохимических заводах обеспечит улучшение качества кокса по показателям прочности $M_{2,5}$ на 2,2 %, а истираемости $M_{1,0}$ на 1,1 % при вдувании тощих углей. В случае вдувания газовых углей эти показатели улучшаются на 1,8 и 0,9 % соответственно.

Изменение затрат при производстве кокса в связи с выводом из коксовых шихт газовых и тощих углей и передачи их на приготовление пылеугольного топлива

Изменение состава шихт для коксования повлечет повышение их стоимости на 0,43 и 0,50 руб/т соответственно при выводе газовых и тощих углей, что в расчете на 1 т валового кокса составит 0,57 и 0,66 руб. Одновременно с этим изменяются и выходы продуктов коксования: выход кокса увеличится, а химических продуктов коксования — снизится. Влияние изменения выхода продуктов коксования незначительно — 3—5 коп на 1 т сухого валового кокса. Суммарное влияние факторов удорожания шихты и изменение выходов продуктов коксования приведет к повышению себестоимости одной тонны сухого валового кокса на 0,54 и 0,61 руб., металлургического на 0,35 и 0,40 руб.

За счет улучшения качества кокса в результате вывода из шихт для коксования газовых и тощих углей цена металлургического кокса увеличится на 1,62 и 1,92 руб.

Расчеты показывают, что изменение текущих затрат и стоимости вырабатываемой коксовой продукции определяет повышение затрат в среднем на 20 млн. руб. Стоимость же реализованной продукции (в расчете на намечаемый объем производства) за счет повышения качества кокса увеличится на 58—66 млн.руб. При этом отпадает необходимость в реконструкции коксовых цехов суммарной мощностью 3,6—4,5 млн.т кокса, т.е. экономия капитальных вложений в коксохимическое производство на перекладку коксовых батарей может составить 50—70 млн.руб. Высвобождение рабочих составит 400—550 чел.

Изменение затрат на углеобогатительных фабриках

При определении изменения затрат на углеобогатительных фабриках за базовый вариант при обогащении тощих углей в условиях Чумаковской ЦОФ принята зольность концентрата 7,5 % (норма по

Т а б л и ц а 36. Цена концентрата тощего угля в зависимости от зольности на ЦОФ "Чумаковская"

Товарные продукты	Выход, %	Зольность, %	Цена 1 т, руб.	Стоимость реализации с учетом выхода, руб/т	Изменение стоимости реализации по сравнению со стоимостью, руб/т	Цена 1 т концентрата с учетом компенсации снижения реализации, руб/т	Стоимость реализации товарной продукции с учетом новой цены концентрата, руб.
Концентрат	60,9	7,5	30,96	18,85	—	—	—
Промпродукт	3,6	30,9	11,90	0,43	—	—	—
Итого	64,4	—	—	19,28	—	—	—
Концентрат	59,6	7,3	31,09	18,53	—	31,29	18,65
Промпродукт	4,9	26,8	12,89	0,63	—	—	0,63
Итого	64,5	—	—	19,16	-0,12	—	19,28
Концентрат	56,8	7,1	31,22	17,74	—	32,03	18,20
Промпродукт	7,6	21,5	14,6	1,08	—	—	1,08
Итого	64,4	—	—	18,82	-0,46	—	19,28

техническим условиям). При такой глубине обогащения, как показал опыт работы, выход концентрата из рядовых углей составляет 60,9 %; выход промпродукта зольностью 30,9 % составляет 3,6 %. С учетом такого соотношения выхода продуктов обогащения стоимость реализации продукции составит 19,28 руб/т.

При более глубоком обогащении углей и доведении зольности концентрата до 7,3; 7,1; 6,9 % выход концентрата уменьшается соответственно с 60,9 % (базовый вариант) до 59,6; 56,8; 53,4 %. Выход промпродукта при этом повышается с 3,6 % до 4,9; 7,6; 11,0 %. Такое изменение соотношений приводит к понижению стоимости реализации годного продукта. Расчет цен на концентрат с учетом компенсации снижения реализации приведен в табл. 36.

Результаты использования кокса повышенного качества при выплавке чугуна

Вывод из шихт для коксования газовых и тощих углей улучшит качество металлургического кокса по показателям M_{25} и M_{10} , что повлечет повышение цен на кокс соответственно на 1,62 и 1,92 руб/т, т.е. дополнительные затраты при выплавке чугуна за счет увеличения цен на кокс составят 50544 и 58752 тыс. руб соответственно при выводе из шихт для коксования газовых и тощих углей.

Однако при использовании в доменных цехах кокса лучшего качества снизятся затраты на выплавку чугуна за счет уменьшения его удельного расхода и повышения производительности доменных печей. Так, увеличение показателя прочности кокса M_{25} на 1 %

приведет к увеличению производительности доменных печей на 0,7 % и снижению удельного расхода кокса на 1 %. Уменьшение показателя прочности кокса M_{10} на 1 % обеспечит увеличение производительности доменных печей на 3 % и снизит расход кокса на 1,5 %.

Улучшение качества кокса в результате вывода из шихт для коксования газовых и тощих углей снизит расход кокса соответственно на 3,25 и 3,85 % и повысит производительность доменных печей на 4,03 и 4,84 %.

Снижение затрат на выплавку чугуна за счет улучшения качества кокса определено по стандартной методике и составило для варианта с вдуванием концентратов газовых углей 58,38 млн.руб и для варианта с вдуванием концентратов из тощих углей 59,27 млн.руб.

Определение эффективности использования пылеугольного топлива для вдувания в горн доменных печей

Эффективность использования пылеугольного топлива в доменном производстве определена для 14 вариантов: при использовании углей основных марок (рядовых и концентратов) зольностью 4,5—30 %.

Эффективность определяли при полном использовании мощностей установок по приготовлению и вдуванию пылеугольного топлива из расчета 100 кг топлива на 1 т выплавляемого чугуна. Расход угля для приготовления 1 т угольной пыли принят 1,15 т. Затраты на приготовление 1 т пыли, транспортирования и вдувания рассчитаны исходя из опыта работы донецкой промышленной установки и составили 5,4 руб/т.

Т а б л и ц а 37. Заготовительная стоимость 1 т пылеугольного топлива в зависимости от качества используемого угля

Марка угля	Содержание золы в угле, %	Заготовительная стоимость 1 т угольной пыли, руб.
Концентрат Т — тощего угля	6,9	42,36
	7,1	42,20
	7,3	42,05
	7,5	41,90
	14,0	36,98
Рядовые тощие угли	17,0	32,69
	30,0	25,42
	7,5	46,39
Концентрат Г — газового угля	14,0	39,92
	17,0	33,18
Рядовые газовые угли	30,0	27,85
	4,5	63,43
Антрациты (концентраты)	7,5	59,46
	25,0	29,95
Антрациты рядовые		

Заготовительная стоимость 1 т пылеугольного топлива определена с учетом качества угля и затрат на его перевозку от обогатительных фабрик к металлургическому заводу, внутривозовских перевозок и разгрузки угля, а также затрат на помол, транспортирование и вдувание пылеугольного топлива (табл. 37).

На основании аналитического расчета, а также анализа опыта промышленного применения пылеугольного топлива из разных марок угля приняли следующие основные показатели работы доменных печей при замене им части кокса:

Показатели	Зольность топлива, %	Коэффициент замены кокса пылеугольным топливом	Изменение производительности доменных печей, %
Исходное сырье:			
концентрат Т тощего угля	7,5	1,02	+ 2,8
	14,0	0,90	-0,8
рядовые тощие угли	17,0	0,82	-1,9
	30,0	0,70	-6,2
концентраты Г газовых углей.	7,5	0,87	-1,0
	14,0	0,82	-2,0
рядовые газовые угли	17,0	0,79	-2,0
	30,0	0,65	-4,0
Антрациты (концентрат)	4,5	1,18	+ 5,6
	7,5	1,08	+ 4,3
Рядовые антрациты	25,0	0,76	-2,8

Т а б л и ц а 38. Изменение затрат в доменном производстве Минчермета УССР в

Применяемый вид угля	Содержание золы в углях, %	Потребность в угле, тыс.т/год	Изменение производительности доменных печей, тыс.т/год
Газовые угли	7,5	4782	-420
	14,0	4733	-840
	17,0	4714	-1208
	30,0	4637	-1680
	6,9	4975	+ 1260
	7,1	4970	+ 1218
	7,3	4965	+ 1176
	7,5	4965	+ 1176
Тощие угли	14,0	4791	-336
	17,0	4738	-798
	30,0	4531	-2604
Антрациты	4,5	5100	+ 2352
	7,5	5038	+ 1806
	25,0	4695	-1176

Изменение затрат в доменном производстве в связи с использованием пылеугольного топлива определено по формуле:

$$\Delta = \left[\sum_{i=1}^n \Delta C_i - E_H (K_2 - K_1) \right] A_2, \quad (43)$$

где 1 ... i ... n — статьи эксплуатационных затрат, на которые влияет использование указанной технологии; ΔC_i — изменение затрат по i-той статье, руб/т; E_H — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (0,15); K_1 ; K_2 — удельные капитальные вложения в производственные фонды до и после использования новой технологии, руб/т; A_2 — предполагаемый объем выплавки чугуна с использованием пылеугольного топлива, тыс. т.

Результаты изменения затрат приведены в табл. 38. Как видно из приведенных данных, максимальное снижение расхода кокса и повышение производительности могут быть достигнуты при вдувании в горн доменных печей малозольных ($A^c = 4,5\%$) антрацитов. Тем не менее, применение антрацитов менее эффективно, чем тощих углей, прежде всего из-за высокой заготовительной стоимости топлива.

При одинаковом качестве углей по зольности (7,5 %) использование тощих углей в сравнении с газовыми обеспечивает большую на 22 % экономию кокса. Годовой экономический эффект при этом возрастает в 1,8 раза.

Меньшая эффективность применения пылеугольного топлива из

связи с использованием пылеугольного топлива для вдувания в горн доменных печей

Экономия кокса, тыс.т/год	Расход условного топлива, кг/т чугуна	Снижение себестоимости чугуна, руб/т	Снижение приведенных затрат, руб/т	Годовой экономический эффект, млн.руб.
3617	600,7	2,51	1,89	118,2
3375	599,8	2,75	2,09	125,7
3238	601,4	3,15	2,48	141,3
2621	608,3	2,46	1,73	109,4
4412	609,3	3,74	3,26	184,4
4408	609,0	3,76	3,28	185,4
4404	609,7	3,77	3,29	188,6
4404	609,5	3,79	3,31	190,5
3750	618,5	3,08	2,47	150,5
3378	631,2	2,70	2,05	132,0
2757	636,3	2,27	1,45	104,7
5233	583,1	2,78	2,39	106,0
4731	590,7	2,44	2,00	87,6
3103	628,1	2,38	1,70	69,4

Т а б л и ц а 39. Количество выбросов в атмосферу при производстве кокса и пыле

Производство	Количество вредных компонентов в выбросах,			
	пыль	сероводород и другие серосодержа- щие газы	оксид углерода	аммиак
Кокс	3160	2030,5	380	140
Пылеугольное топливо	5000	—	—	—

газовых углей определяется меньшим содержанием углерода в топливе и соответственно меньшим коэффициентом замены кокса пылеугольным топливом, значительным сопутствующим снижением расхода природного газа.

Применение менее зольных концентратов, хотя и обеспечивает дополнительную экономию в доменном производстве, тем не менее в итоге оказывается менее эффективным из-за ухудшения показателей обогащения и высокой заготовительной цены топлива.

В расчете эффективности ввиду сложности методики не отражены благоприятные экологические последствия замены кокса пылеугольным топливом. Из табл. 39 следует, что замена пылеугольным топливом из концентрата тощего угля ($A^c = 7,5\%$) 4,4 млн. т кокса в год позволит предотвратить выброс в атмосферу 13,2 тыс. т сероводорода, 5,1 тыс. т прочих вредных веществ, в том числе 270 т окислов азота и 44 т синильной кислоты.

По ориентировочным данным, принятым по аналогии с другими отраслями техники, отмеченные благоприятные экологические последствия могут обеспечить повышение эффективности применения пылеугольного топлива на 5–10 %.

В свете принятых законов об охране окружающей среды и ужесточения соответствующих требований к технологическим процессам указанные благоприятные экологические последствия, получаемые без дополнительного и специального строительства, могут оказаться существенным фактором, определяющим перспективность новой технологии.

На основании проведенной и других работ, а также опыта работы промышленной установки на Донецком металлургическом заводе Минчерметом СССР утверждены в качестве основной угольной базы для расширения внедрения пылеугольного топлива Чумаковская ЦОФ, производящая с 1982 г. концентрат тощего угля. Минуглепром, Минчермет УССР, а также "Укрглавуголь" утвердили в 1984 г. временные технические условия на концентрат марки Т средней золь-

угольного топлива

т/млн.т продукта

фенол	углеводороды	синильная кислота	оксиды азота	итого
86,8	300	9,9	61,3	6168
—	—	—	—	5000

ностью 7,4 % (максимальная 8,0) как сырье для получения пылеугольного топлива, отвечающее перспективным условиям доменной плавки.

5.2. Эффективность внедрения промышленных установок для вдувания пылеугольного топлива в доменные печи Ждановского "Азовсталь" и Коммунарского металлургического комбинатов

Обе спроектированные промышленные установки рассчитаны на использование концентрата тощего угля Чумаковской ЦОФ, годовая потребность в котором составит 415 тыс. т.

Основные показатели стоимости и эффективности указанных промышленных установок приведены в табл. 40, из которой следует,

Т а б л и ц а 40. Показатели эффективности применения пылеугольного топлива на Коммунарском и Ждановском "Азовсталь" металлургических комбинатах

Показатели	Коммунарский Ждановский Сумма		
	металлургический комбинат	металлургический комбинат	по двум комбинатам
Стоимость промышленного комплекса обогатительного, млн.руб.	12,9	17,9*	30,8
Расход угля на пылевдувание, тыс.т/год	191,0	290,0	481,0
Принятый в расчете коэффициент замены кокса топливом, кг/кг	0,95	0,90	—
Принятое изменение производительности	0	0	0
Снижение расхода кокса, тыс. т/год	175,0	217,2	392,2
Снижение расхода природного газа, млн.м ³ /год	88,5	86,9	175,4
Снижение себестоимости чугуна, млн.руб./год	1,89	4,16	6,05

* Без природоохранных мероприятий.

что основной эффект определен снижением расхода кокса на 394,2 тыс. т, а также некоторым снижением расхода природного газа.

Общее снижение себестоимости чугуна составит 6,05 млн. руб/год, окупаемость соответственно для Ждановского и Коммунарского металлургических комбинатов — 6,0 и 7,0 лет.

5.3. Эффективность замены кокса пылеугольным топливом на примере эксплуатации опытно-промышленной и промышленной установок

В 1968—1978 гг. на ДМЗ с использованием опытно-промышленной установки были проведены представительные (~ 1400 сут) плавки по оценке эффективности применения пылеугольного топлива. Опытные плавки проведены на доменных печах № 3 ($V_{\text{п}} = 700 \text{ м}^3$) и 2 ($V_{\text{п}} = 1033 \text{ м}^3$) при выплавке передельного и литейного чугуна и значительном изменении сырьевых условий плавки. Так, на доменной печи № 3 передельный чугун выплавлялся из сырых руд агломерата ЮГОК и окатышей.

Во всех исследованных режимах применение пылеугольного топлива оказалось эффективным (табл. 41).

Т а б л и ц а 41. Эффективность применения пылеугольного топлива на ДМЗ

Показатели	Тип установки		Итого
	опытно-промышленная	промышленная	
Характер эксплуатации установки	Периодический	Непрерывный	—
Номера печей, работающих с вдуванием пылеугольного топлива	2,3	1,2	—
Количество суток работы с вдуванием пылеугольного топлива	1390	830	—
Количество чугуна, выплавленного с применением пылеугольного топлива, млн.т	1,38	3,22	4,6
Израсходовано угля, тыс.т	80	115	195
Расход кокса при вдувании пылеугольного топлива, кг/т чугуна	689,3	547,3	—
Снижение расхода кокса за счет применения пылеугольного топлива, тыс. т	79,7	87,7	167,4
То же, кг/т чугуна	51,7	29,0	—
То же, %	7,0	5,5	—
Снижение расхода природного газа, млн.м ³	16,7	32,1	48,8
То же, м ³ /т	12,8	7,9	—
Снижение себестоимости чугуна, млн.руб.	1,78	4,19	5,97
Экономическая эффективность, млн.руб.	1,38	2,11	3,49

За период эксплуатации опытно-промышленной установки использовано ~ 80 тыс. т угля, средний расход которого на 1 т чугуна составил 50 кг. С пылеугольным топливом выплавлено 1,38 млн. т чугуна, им заменено 7 % кокса при среднем коэффициенте замены 0,99. При этом расход природного газа снизился на 12,8 м³/т чугуна, качество чугуна и производительность печей существенно не изменились. Общая эффективность применения пылеугольного топлива составила 1,38 млн.руб., или 1 руб/т чугуна.

За время эксплуатации промышленной установки было использовано > 400 тыс. т угля, выплавлено с применением топлива > 7,0 млн. т чугуна (см. табл. 41). Освоены технологические режимы с вдуванием на 1 т чугуна 60–80 кг пылеугольного топлива, приготовленного из концентрата угля марки Т, обеспечивающего замену 12–15 % кокса при среднем коэффициенте замены кокса топливом 0,9. Достаточно полно эффективность освоения промышленной установки для вдувания пылеугольного топлива характеризуется фактическими показателями расхода кокса и природного газа в период 1980–1987 гг. (см. табл. 33).

Из табл. 33 видно, что вдувание в горн пылеугольного топлива в сочетании с рядом других компенсирующих мероприятий позволило снизить в 1987 г. фактический расход кокса до 479 кг/т чугуна, или на 19,1 % по сравнению с периодом до начала освоения установки (I–II кварталы 1980 г.).

За период эксплуатации промышленной установки пылеугольным топливом заменено свыше 350 тыс. т кокса, что обеспечило получение экономического эффекта в размере 7,5 млн. руб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кириллин В.* Энергетика — проблемы и перспективы//Коммунист. 1975. — № 1. — С. 43—51.
2. Coal injection for blast furnace operation//Industrial Heat. — 1968. — Vol.35. N 6. P. 1098; 1100.
3. *Griffin Stuart.* Nippon Steel plans cut by half its furnace fuel oil use//Steel Times. — 1980. — Vol. 208, N 5. P. 354; 356.
4. *Kajikawa Y., Nakajima R., Kishimoto S.* Operation of blast furnace without liquid fuel//Trans. Iron and Steel Inst. Japan. 1982. Vol. 22, N 2, P. 134—142.
5. Доменная шлавка на дутье, обогащенном кислородом до 30 % с расходом мазута до 100 кг/т чугуна/*В.Н. Вакулин, Н.Е. Дунаев, В.В. Емушинцев и др.*//Сталь, 1976. № 7. С. 585—591.
6. *Пефтуев И.М., Попов А.Г., Воробьев А.П.* Выплавка чугуна с использованием мазута и природного газа на заводе им. Ильича//Сталь. 1978. № 2. С. 107—113.
7. *Gasper D.* Evolution of the energy crisis//J. Iron and Steel Engineer. 1974. — Vol. 51, N 7, P. 65—70.
8. Капиталистический рынок промышленного сырья и топлива: Краткий справочник. Бюллетень иностранной коммерческой информации. — М.: Внешторгиздат. 1974. № 9. С. 28—59.
9. *Петров Б.* Что такое КАТЭК//Известия, 1975, 5 янв.
10. *Bell S.A., Pugh I.L., Snyder B.I.* Coal injection Bellefonte furnace//J. Metals. — 1968. — Vol 20, N 4. — P. 85—88.
11. *Bell S.A., Pugh I.L., Sexton T.R.* Armco coal injection//AIME Ironmaking Conference and Proceedings. — 1975. — Vol. 34. — P. 307—325.
12. Blast furnace operation with low fuel rate/*Togino Y., Tateoka M., Sugata M. et.al*//Trans. Iron and Steel Institute of Japan. — 1980. Vol. 20, N 12. P. 842—848.
13. *Fitzgerald F.* Reducel coke consumption in the blast furnace through injection//Steel Times. — 1985. — Vol. 213, N 12, P. 585—589.
14. *Ridgion J.M.* Blast furnace performance with injection at the tuyeres//J. Iron and Steel Institute — 1961. N 2. P. 135—143.
15. Освоение доменной шлавки с применением природного газа на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате/*В.К. Корнев, И.И. Пушкаш, Б.Л. Лазарев и др.*//Сталь. 1968. № 3. с. 199—201.
16. Опыт работы доменных печей на мазуте и природном газе/*А.А. Агашин, Н.Н. Бабарыкин, Ю.П. Волков и др.*//Сталь. 1965. № 5. С. 393—400.
17. Применение пылеугольного топлива для выплавки чугуна/*С.Л. Ярошевский, А.И. Рябенко, А.А. Антонов и др.* — Киев: Техніка, 1974. 188 с.
18. Результаты промышленных шлавков с вдуванием в горн доменной печи до 60—100 кг/т пылеугольного топлива/*И.Н. Красавцев, С.Л. Ярошевский, Л.З. Суплин и др.*//Новое в аглодоменном производстве. Донецк. 1973. С. 271—276.
19. *Chaurat P.* Injection pneumatique de charbons secs au haut fourneau N 2 de la Compagnie des Hauts Fourneaux de Chasse//Rev. de métallurgie. 1963. N 1. P. 39.
20. *Summers E.M.* Coal injection into N 5 blast furnace at Stanton and Stavely, Ltd.//J. Iron and Steel Institute. 1963. Vol. 201, N 8. P. 666—667; 678—692.
21. Применение жидкого топлива в доменных печах Нижне-Тагильского металлургического комбината/*Ю.С. Борисов, В.К. Корнев, И.И. Пушкаш и др.*//Сталь. 1965. № 6. с. 497—503.
22. Вдувание коксового газа в доменную печь на заводе в Японии//Бюл. науч.-техн. информ. — 1963. Вып. 8. С. 51.
23. Pulverized coal injection cuts blast furnace coke rate//J. Iron Age. 1968. Vol. 201, N 2. P. 67—68.
24. *Brandy J.L.* Amanda and Bellefonte, answers to ironmaking//J. Metals. 1964. Vol. 16, N 8. P. 637—643.

25. Материально-тепловые балансы доменной плавки при вдувании в горн пылеугольного топлива и природного газа//С.Л. Ярошевский, И.Н. Красавцев, В.В. Степанов и др.//Сталь. 1976. № 11. С. 979–982.
26. Ярошевский С.Л., Красавцев И.Н., Афанасьева З.К. Технология доменной плавки с вдуванием в горн природного газа и 100–200 кг/т чугуна пылеугольного топлива//Изв. вузов. Черная металлургия. 1976. № 6. С. 35–39.
27. Некрасов З.И., Юрко Л.Д., Ободан Я.М. Конструкция и промышленное освоение пневмоустановок ИЧМ для подачи пылеугольного топлива в горн доменной печи//Металлургия чугуна. М.: Металлургия, 1973. – Вып. 1. С. 91–109.
28. Ярошевский С.Л., Красавцев И.Н., Степанов В.В. Оптимизация технологического режима плавки при вдувании пылеугольного топлива и природного газа//Металлург. 1974. № 12. С. 11–14.
29. Wannot I., Matlinski W., Kowalchuk L. Snizovani spotrebu koksu ve vysokopechnim procesu cestou pridavani spolecne fohaneho uhelneho pvachu a zemniho olynu do hesteje vysoke rese//Mezo–Ved.–techn. konf. vysokopec.–Ostrava.–1970. Sb. 4. S. 244–256.
30. Carbee A.K. Use of pulverized coal in ironmaking blast furnaces: State of the art and current Armco operations//ILFA–Blast Furnace Congress. – Buenos Aires.– 1978. August. P. 25–35.
31. Consideration for coal injection in ironmaking//Steel Plant Furnace, Industrial Heating. 1984. Vol. 31, N 8. P. 1485–1486.
32. Изучение процесса горения дополнительного топлива в фурменных зонах доменной печи//С.Л. Ярошевский, А.Т. Анисимов, Н.И. Ефанова и др.//Сталь. 1985. № 2. С. 9–13.
33. Оптимальный расход природного газа при выплавке передельного и литейного чугуна//С.Л. Ярошевский, Г.А. Панев, И.Н. Красавцев и др.//Металлург. 1973. № 1. с. 8–11.
34. Выплавка литейного чугуна с применением природного газа//С.Л. Ярошевский, Н.Н. Попов, И.Н. Красавцев и др. – Киев: Техніка, 1971. 63 с.
35. Дунаев Н.Е., Гусаров А.К. Технологичность доменного процесса с вдуванием измельченного твердого топлива в горн доменной печи//Металлургия чугуна. М.: Металлургия, 1973. Вып. 1. – С. 111–119.
36. Емушинцев В.В., Галемин И.М., Дунаев Н.Е. Выплавка передельного чугуна с различным расходом пылеугольного топлива//Сталь. 1969. № 6. С. 489–493.
37. Colnot B. Injection de charbon puerise aux tuyeres du haut fourneau 3 d'Uckande//Rev. métallurgie. – CIT. 1982. Vol. 79, N 11. – P. 877–887.
38. Guo Yun-zhi, Liu-cai (SISC). Injection de poudre de charbon dans le haut fourneau//Rev. de métallurgie. CIT. 1980. Vol. 77, N 10, P. 841–851.
39. Carbee A.K.//HF–80: Congr. Int. Haut Fourneau Theor et Prat, Arles, 2–4 Juin, 1980. Vol. 3. S. 11.4/1–11.4/14.
40. Pulverized coal injection into N 1 blast furnace at Oita works//M. Kawabe, S. Makuri, M. Baba et al.//Tetsu to Hagane. 1982. N 15. P. 329–334.
41. Pulverized coal injection working at Oita N 1 furnace//J. Iron and Steel Engineer. 1982. N 6. p. 78.
42. Bogdandy L. Mechenishes, thermishes und chemishes Verhalten Kleiner Kohlerkörnner beim Einblasen in den Hochogen und die sich dabei ergebenden Veränderungen der Hochofenbetriebsdaten//Arch. Eisenhüttenwesen. 1964. Bd. 35, N 10, S. 936 – 976.
43. Воскобойников В.Г., Михалевич А.Г. Пути дальнейшего снижения расхода кокса в доменных печах//Сталь. 1969. № 7. С. 584–588.
44. Логинов В.И., Орешкин Г.Г., Половченко И.Г. Вдувание пылеугольного топлива в горн доменной печи//Сталь. 1956. № 8. С. 675–682.
45. Labes C.J. Armco uses pulverized coal injection at Ashland//J. Iron and Steel Eng. 1976. Vol. 53, N 8, p. 51–52.

46. Kohlenstaub—Einblssystem im Hochofen Nr. — 1 des Oita—Werks der Nippon Steel Corporation//Stahl und Eisen. — 1982. Bd. 102, N 10. — S. 52.
47. Coal injection in blast furnace/D. Roy, B.N. Məjumder, V. Ganda et al//J. Institution Engineering (India). — 1976. — Vol. 57. P. 20—24.
48. Анализ освоения и эксплуатации промышленной установки для приготовления и вдувания пылеугольного топлива на Донецком металлургическом заводе/С.Л. Ярошевский, А.И. Рябенко, А.А. Ярмаль и др.//Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. "Перспективы использования пылеугольного топлива и других порошкообразных материалов в доменных печах". — М. 1981. с. 40—44.
49. Разработка и освоение промышленной установки для вдувания пылеугольного топлива в горн доменных печей/А.А. Ярмаль, С.Л. Ярошевский, М.В. Чемикосов и др.//Металлургическая и горнорудная промышленность. 1985. № 3. С. 5—7.
50. Пути совершенствования основной схемы и оборудования для приготовления и вдувания пылеугольного топлива/А.М. Камардин, В.В. Степанов, С.Л. Ярошевский и др.//Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. "Перспективы использования пылеугольного топлива и других порошкообразных материалов в доменных печах". — М., 1981. С. 46—49.
51. Некрасов З.И., Ободан Я.М., Приходько Ю.Л. Усовершенствование оборудования установки для вдувания пылеугольного топлива в горн доменной печи//Металлургическая и горнорудная промышленность. 1970. № 6. С. 1—5.
52. Работа доменной печи при совместном применении природного газа, пылеугольного топлива и обогащенного кислородом дутья/З.И. Некрасов, Л.Д. Юпко, П.Я. Мухин и др.//Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема. — М.: Металлургия. 1978. № 4. С. 22—29.
53. А.с. 239979 СССР. Фурма для подачи воздуха и твердого реагента в металлургический плавильный агрегат/З.И. Некрасов, Я.М. Ободан, Г.Г. Побегайло и др.//Открытия. Изобретения. 1969. № 12. С.
54. Aliare B., Grafeuille F., Lag D. Usinor—Dunkerque. Injection de charbon sur le haut fourneau 2 d'Usinor —Dunkerque//Rev. de métallurgie. — 1985. — Vol. 82, N 11. P. 789—799.
55. Венецкий И.Г., Венецкая В.И. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе: Справочник. — М.: Статистика. 1979. 448 с.
56. Ostrovski E.J., Dietz I.R. Blast furnace operations with coal at Weirton//J. Metals. 1965. N 12. P. 1289—1291.
57. Дунаев Н.Е., Кудрявцева З.М., Кузнецов Ю.М. Вдувание пылевидных материалов в доменные печи. — М.: Металлургия, 1977. — 207 с.
58. Доменная плавка с вдуванием угля на доменной печи объемом 2000 м³ Западно-Сибирского металлургического завода/Н.Е. Дунаев, А.К. Гусаров, Б.И. Ашпин и др.//Металлургия чугуна. — М.: Металлургия, 1973. — Вып. 1. С. 119—127.
59. Вдувание угольной пыли в горн доменной печи/С.Л. Ярошевский, А.А. Ярмаль, Л.З. Суплин и др.//Сталь. 1976. № 9. С. 788—792.
60. Lu W.—K., Holditch. Alkali control in blast furnace: Theory and Practice//HF—80.— Blast Furnace Conference. — 1980. P. 1—18.
61. Pulverized coal injection working smoothly at Oita N 1. BF//Nippon Steel News.— 1982. February. P. 55.
62. Андронов В.Н. Об эффективности вдувания дополнительных топлив в горн доменных печей//Сталь. 1976. № 8. С. 694—698.
63. Воловик Г.А. Эффективность использования углерода и водородсодержащих добавок в доменной плавке//Сталь. 1980. № 12. С. 1062—1064.
64. Паршаков В.М., Боковиков Б.А., Шкляр Ф.Р. Методика расчета и определе-

- ние экономически выгодных уровней параметров высокотемпературного комбинированного дутья//Сталь. 1980. № 3. С. 169–173.
65. *Товарский И.Г., Хомич В.Н., Боярская Г.П.* Исследование эффективности применения дутьевых добавок в доменном процессе//Сталь. 1980. № 11. С. 941–949.
 66. Технологические аспекты применения в доменной плавке топливных добавок, вводимых в фурменные зоны совместно с дутьем, обогащенным кислородом/*В.Г. Воскобойников, Н.Е. Дунаев, Б.Л. Жураковский и др.*//Сталь. 1980. № 10. С. 888–896.
 67. *Tizuka Motohiko, Kichimoto Sumiyuki.* Blast furnace operation with low fuel//Tetsu to Hagane. J. Iron and Steel Inst. Japan. – 1980. Vol. 66, N 3. P. 1966–1974.
 68. *Gutzke Manfred*//Stahl und Eisen. – 1978. Bd. 98, N 23, S. 1243–1244.
 69. *Mijadzaki T.* Study at conditions of pulverized coal combustion in blast furnace hearth//Tetsu to Hagane. – 1982. – Vol. 68. N 4. P. 4–5.
 70. *Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Л.* Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия. 1966. – 355 с.
 71. Некоторые особенности теплового режима горна при работе на комбинированном дутье высоких параметров и оценка влияния этих параметров на основные показатели доменной плавки/*А.В. Дидевич, С.Л. Ярошевский, Л.П. Брусов и др.*//Молодые ученые – науч.-техн. прогрессу в черной металлургии: Материалы 2-й науч.-техн. конференции. – Донецк. 1981. С. 63–74.
 72. Определение оптимальных технологических параметров доменной плавки с использованием пылеугольного топлива/*С.Л. Ярошевский, Л.П. Брусов, А.В. Дидевич и др.*//Тез. докл. Всесоюз.науч.-техн. совещ. "Перспективы использования пылеугольного топлива и других порошкообразных материалов в доменных печах". – М.: 1981. С. 14–19.
 73. Распределение температур по радиусу горна доменной печи при вдувании природного газа/*Г.А. Панев, А.Г. Кузуб, П.П. Чувпыло и др.*//Сталь. 1966. № 3. С. 200–205.
 74. *Ярошевский С.Л., Дидевич А.В., Степанов В.В.* Основные пути компенсации ухудшения температурного и газодинамического режимов плавки при значительной замене кокса дополнительными видами топлива//Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Теория и практика современного доменного производства". – Днепропетровск. 1983. С. 140.
 75. Прогнозирование режима доменной плавки при работе на комбинированном дутье и применении его на практике/*В.Ю. Цымбалюк, П.О. Коростик, В.А. Сорокин и др.*//Контроль и регулирование параметров доменного процесса.– Киев: Наукова думка, 1972. С. 103–111.
 76. Технологические факторы, определяющие теоретическую температуру горения/*Ю.М. Потеня, Р.Г. Рихтер, Т.А. Тулуевская и др.*//Сталь. 1982. № 10. С. 14–17.
 77. *Бабий В.И., Иванова И.П.* Длительность воспламенения и горения частиц пыли различных марок углей//Горение твердого топлива: Материалы III Всесоюз. конф. по теории горения твердого топлива. – Новосибирск: Наука, 1969. С. 82–92.
 78. Оценка коэффициента замены кокса пылеугольным топливом/*С.Л. Ярошевский, В.И. Терещенко, З.И. Либерова и др.*//Металлургическая и горно-рудная промышленность. 1981. № 2. С. 10–14.
 79. *Похвиснев А.Н., Клемперт В.М.* О минимальном расходе кокса в доменной печи по условиям газодинамики процесса//Сталь. 1969. № 12. С. 1077–1079.
 80. Опытные доменные плавки с использованием в аглошихте бедной марганцевой руды/*В.А. Улахович, В.И. Солодков, В.И. Нетронин и др.*//Сталь. 1981. № 5. С. 4–6.

81. Работа доменной печи Череповецкого завода на комбинированном дутье высоких параметров/*Л.А. Бялый, Б.Л. Жураковский, А.Г. Михалевич и др.*// *Сталь*. 1978. № 9. С. 782–787.
82. Опытные плавки в доменной печи объемом 2000 м³ на дутье с концентрацией кислорода до 35 %/*З.И. Некрасов, С.В. Колпаков, В.Ф. Андреев и др.*// *Сталь*. 1973. № 2. С. 97–104.
83. 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.
84. Эффективность выплавки литейного чугуна с применением пылеугольного топлива и природного газа/*Г.Е. Нехаев, В.В. Степанов, В.Б. Брага и др.*// *Металлург*. 1987. № 3. С. 15–17.
85. Работа доменной печи с низкой степенью компенсации кислорода природным газом/*Л.А. Бялый, В.А. Улахович, Б.Л. Жураковский и др.*//*Сталь*. 1981. № 11. С. 31–35.
86. Совершенствование технологии доменной плавки на печи объемом 2700 м³ Череповецкого металлургического завода/*В.А. Улахович, В.И. Солодков, А.П. Котов и др.*//*Сталь*. 1978. № 6. С. 492–497.
87. *Le Scour C. Amelioration de la mise au mille au haut fourneau 3 d'USINOR Dunkerque*//*Circ Informs Techn. Cent. Doc. Sider.* – 1972. Vol. 29, N 1. P. 159–167.
88. *Ярошевский С.Л., Дидевич А.В., Брусов Л.П.* Некоторые особенности доменной плавки при вдувании в горн концентратов газовых и энергетических углей//*Материалы 3-ей науч.-техн. конф. "Молодые ученые науч.-техн. прогрессу в черной металлургии"* – Донецк, 1981. С. 25–28.
89. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 303 с.
90. *Жаворонков Н.М.* Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередача в скрубберах. – М.: Советская наука, 1944. – 44 с.
91. *Сполдинг Д.Б.* Конвективный массоперенос (перевод с англ.). М.; Л.: Энергия, 1965. – 384 с.
92. Доменный процесс по экспериментальным данным//*Сб. трудов ЛПИ, посвященный 80-летию со дня рождения Павлова М.А.* – Л.: 1949. – т. 2. – 345 с.
93. *Козлович И.З.* Исследование работы горна доменной печи № 1 ММК//*Советская металлургия*. 1936. № 9. С. 5–18.
94. *Ярошевский С.Л., Гайворонский Я.С., Попов Н.Н.* Контроль теплового состояния горна доменной печи. – Киев: Техніка, 1968. – 184 с.
95. А.с. 1062268 СССР. Устройство для отбора проб из горна доменной печи/*С.Л. Ярошевский, Г.Е. Горяинов, А.М. Камардин и др.*//*Открытия. Изобретения*. 1983. № 47. С. 116.
96. *Ярошевский С.Л., Анисимов А.Т., Ефанова Н.И.* Изучение процесса горения дополнительного топлива в фурменных зонах доменной печи/*Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Теория и практика современного доменного производства"*. – Днепропетровск. – 1983. – С. 118.
97. *Остроухов М.Л., Ходак Л.З.* Новые исследования процесса горения кокса у фурмы доменной печи//*Сталь*. 1956. № 10. С. 867–872.
98. *Хромов В.А.* К вопросу о температуре газов в горне в связи с работой доменной печи на обогащенном кислородом дутье. *Бюл. НТИ УкрНИИ металлов*. – М.: Металлургиздат, 1958. № 7. С. 22–41.
99. *Бабарыкин Н.Н., Юшин Ф.Л.* Изменения доменного процесса при работе на офлюсованном агломерате//*Сталь*. 1958. № 12. С. 1057–1065.
100. Основы практической теории горения/*В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.В. Ахмедов и др.* – Л.: Энергия, 1973. – 264 с.

101. *Ярошевский С.Л., Дунаев Н.Е.* Влияние природного газа на нагрев и химический состав чугуна//*Сталь*, 1962. № 4. С. 296–300.
102. *Логонов В.И., Бехтер В.И.* Вдувание пылеугольного топлива и влияние этого фактора на нагрев горна и окислительную зону//*Изв. вузов. Черная металлургия*. 1972. № 4. С. 28–31.
103. *Пластинин Б.П., Железнов Р.З.* Исследование процессов горения и характера газораспределения при вдувании угольной пыли в доменную печь//*Комплексная переработка руд черных металлов Казахстана*. – Алма-Ата: Наука. 1969. Т. 6. С. 42–48.
104. Аэрационный питатель угольной пыли для установок вдувания пылеугольного топлива в горн доменной печи/*С.Л. Ярошевский, А.А. Ярмаль, А.И. Рябенко и др.*//*Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печи большого объема*. – М.: Металлургия. 1977. Вып. 3. С. 72–78.
105. *Металлургия стали*/*В.И. Явойский, Ю.В. Кряковский, В.П. Григорьев и др.* – М.: Металлургия, 1983. – 583 с.
106. *Чуйко Н.М., Чуйко А.Н.* Теория и технология электроплавки стали. – Киев; Донецк: Вища школа, 1983. – 248 с.
107. Влияние пылеугольного топлива на температуру и химический состав чугуна/*С.Л. Ярошевский, В.П. Терещенко, Г.Е. Нехаев и др.*//*Сталь*. 1979. № 5. С. 328–332.
108. А.с. 933709 СССР. Питатель для подачи угольной пыли в доменную печь/*В.И. Мачикин, Н.Т. Лифенко, С.Л. Ярошевский и др.*//*Открытия. Изобретения*. 1982. № 21. С. 112.
109. *Дидевич А.В., Шевкаленко В.М., Ярошевский С.Л.* Влияние изменения содержания золы в пылеугольном топливе на величину коэффициента замены// "Мол. ученые и спец. – науч.-техн. прогрессу в металлургии". Материалы 4 науч.-техн. конф. Донецк. НИИ черн. металлургии. Донецк. 24–26 мая, 1983. 4.1–Донецк, 1984. с. 55–57. – Деп. в Укр. НИИ НТИ 13.02.85. № 327 Ук–85 Деп.
110. А.с. 734285 СССР. Способ доменной плавки/*С.Л. Ярошевский, Н.Н. Попов, В.Н. Андронов и др.*//*Открытия. Изобретения*. 1980 № 18. С. 172.
111. А.с. 670616 СССР. Способ ведения доменной плавки/*С.Л. Ярошевский, В.Н. Андронов, Г.А. Воловик и др.*//*Открытия. Изобретения*. 1979. № 24. С. 87.
112. Оперативное регулирование теплового режима доменной плавки/*А.И. Бабич, С.Л. Ярошевский, О.В. Митасов и др.*//*Сталь*. 1982. № 5. С. 7–9.
113. *Варшавский О.Г.* Регулирование тепловых металлургических процессов. – М.: Металлургия. 1968. – 312 с.
114. Оперативный контроль теплового состояния горна доменной печи/*А.И. Бабич, С.Л. Ярошевский, А.И. Иванов и др.*//*Металлург*. 1982. № 5. С. 11–13.
115. Разработка и освоение промышленной установки для вдувания пылеугольного топлива в горн доменных печей/*А.А. Ярмаль, С.Л. Ярошевский, М.В. Чемикосов и др.*//*Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1985. № 3. С. 5–7.
116. Разработка и освоение технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива и природного газа/*С.П. Ефименко, С.Л. Ярошевский, А.М. Камардин и др.*//*Сталь*. 1986. № 10. С. 23–29.
117. Опыт эксплуатации установок по вдуванию угольной пыли/*Н.Н. Попов, А.А. Бачинин, С.Л. Ярошевский и др.*//*Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. "Повышение технического уровня и совершенствование технологии доменного производства"*. – Липецк. 1982. – С. 34–35.
118. Особенности температурного режима горна при работе доменных печей с вдуванием природного газа и пылеугольного топлива/*С.Л. Ярошевский, С.Т. Плискановский, А.М. Камардин и др.*//*Сталь*. 1986. № 4. С. 7–11.

119. Выплавка чугуна с вдуванием в горн доменной печи пылеугольного топлива/С.Л. Ярошевский, И.Н. Красавцев, Л.З. Суплин и др.//Металлургическая и горнорудная промышленность. 1974. № 4. С. 7–9.
120. Эффективность доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива/С.Л. Ярошевский, А.В. Дидевич, З.К. Афанасьева и др.//Металлургическая и горнорудная промышленность. 1979. № 2. С. 5–6.
121. Ярошевский С.Л. Использование пылеугольного топлива в доменном производстве//Тез. докл. на II советско-индийск. симпоз. по черной металлургии "Экономия материалов и энергии в черной металлургии". – Донецк, 1982. С. 7–8.
122. Куликов И.С. Десульфурация чугуна. – М.: Metallurgizdat. 1962. – 306 с.
123. Выплавка литейного чугуна с применением пылеугольного топлива и природного газа/С.Л. Ярошевский, В.В. Степанов, Л.З. Суплин и др.//Металлургическая и горнорудная промышленность. 1976. № 6. С. 77–78.
124. Доменная плавка с вдуванием в горн топливной смеси/С.Л. Ярошевский, Е.Н. Складановский, Г.Е. Нехаев и др.//Металлургическая и горнорудная промышленность. 1981. № 4. С. 28–31.
125. Опытные плавки с вдуванием в горн доменной печи флюсоотопливной смеси//С.Л. Ярошевский, О.К. Ануфриев, З.К. Афанасьева и др.//Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. совещ. "Перспективы использования пылеугольного топлива и других порошкообразных материалов в доменных печах". – М., 1981. – С. 30–34.
126. Внепечное рафинирование чугуна и стали/И.И. Борнацкий, В.И. Мачикин, В.С. Живченко и др. – Киев: Техніка. 1979. – 167 с.
127. О соотношении оптимальных расходов природного газа при выплавке передельного и литейного чугуна/С.Л. Ярошевский, Г.А. Панев, И.Н. Красавцев и др.//Сталь. 1973. № 6. С. 487–491.
128. Производство литейного чугуна повышенного качества/В.И. Мачикин, Е.Н. Складановский, С.Л. Ярошевский и др.//Металлургическая и горнорудная промышленность. 1981. № 3. С. 1–3.
129. Совершенствование технологии доменной плавки с целью уменьшения отрицательного влияния щелочей и цинка/О.Ф. Корякова, В.В. Щепанский, А.Б. Парцевский и др.//Черная металлургия: Бюл. науч.-техн. информ. – 1980. – Вып. 15. – С. 13–33.
130. Hatano M., Miyazaki T., Iwanaga Y. Effect of alkali circulation in blast furnace on its working regime//Tetsu to Hagane. J. Iron and Steel Inst. Japan. 1979. Vol. 65., N 12, P. 1663–1673.
131. Hatano M., Miyazaki T., Iwanaga Y. Effect of alkalies on coke properties//Tetsu to Hagane. J. Iron and Steel Inst. Japan. – 1979. Vol. 65, N 10, P. 1509–1515.
132. Аналитическое исследование влияния технологических параметров доменной плавки на температуру чугуна и шлака/А.И. Иванов, С.Л. Ярошевский, А.И. Бабич и др.; ДонНИИчермет – Донецк, 1982. – 9 с. – Деп. 3. 06.82. № 1614 – ЧМ.
133. Оптимизация технологии выплавки чугуна с использованием методов математической статистики и ЭЦВМ/С.Л. Ярошевский, В.Н. Андронов, Н.И. Великий и др.//Сталь. – 1975. – № 3. – С. 205–208.
134. Ярошевский С.Л., Степанов В.В., Нестеренко С.В. Применение плавикового шпата в шихте доменных печей//Сталь. 1981. № 3. С. 14–15.
135. Совершенствование технологии выплавки ферромарганца/И.Ф. Котельников, В.В. Диденко, И.Я. Устищенко и др.//Металлург, 1976. № 5. С. 11–13.
136. Эффективность применения наклонных воздушных фурм в доменных печах/И.В. Котельников, В.В. Диденко, И.Я. Устищенко и др.//Сталь. 1975. № 12. С. 1075–1077.

137. Выплавка литейного чугуна на наклонных фурмах/*И.Н. Красавцев, Е.Н. Складановский, А.И. Спирин и др.*//*Металлург.* 1973. № 11. С. 19–20.
138. Комплексная оценка эффективности применения пылеугольного топлива для выплавки чугуна/*Г.А. Панев, С.Л. Ярошевский, С.А. Толстых и др.*//*Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема.* – М.: *Металлургия*, 1977. – Вып. 3. – С. 55–59.
139. Оптимальность и эффективность технологических режимов доменной плавки с применением пылеугольного топлива/*С.Л. Ярошевский, Л.П. Брусов, А.А. Ярмаль и др.*//*Сталь*, 1985. № 8. С. 12–16.
140. *Leightner M.W.* Developments in Iron and Steelmaking//*Blast Furnace and Steel Plant.* 1966. Vol. 54. P. 1025.

Производственное издание

Станислав Львович Ярошевский

ВЫПЛАВКА ЧУГУНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Редактор издательства О.В. Медведовская
Художественный редактор А.А. Якубенко
Технический редактор О.Б. Маркова
Корректоры Г.Ф. Лобанова, Л.М. Зинченко
Обложка художника Е.Н. Волкова

ИБ № 3457

Подписано в печать 05.10.88. Т-17478. Формат бумаги 60x90 1/16
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл.печл. 11,0. Усл.кр.-отг. 1
Уч.-издл. 12,84. Тираж 1450 экз. Заказ 3495 Цена 65 к. Изд. № 17
Имен-ский, 5.82.

Набрано в издательстве "Металлургия"
на НПТ оператором Г.В. Красюк

ма-
й

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Металлургия", 119857, ГСП, Москва, Г-34,
2-й Обыденский пер., д. 14

Московская типография № 9 НПО "Всесоюзная книжная палата"
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
109033, Москва, Волочаевская ул., 40