

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Нижнетагильский технологический институт
Кафедра металлургических технологий

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ ПЕРЕД ГЭК

Зав. кафедрой металлургических технологий

О.И. Шевченко

« 14 » 02 2024 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ВДУВАНИЕ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ НАГРЕТОГО
ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА СОВМЕСТНО
С ДИСПЕРСНЫМ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИМ СЫРЬЕМ

Пояснительная записка
22.04.02 000 000 304 ПЗ

Руководитель

канд. техн. наук, доцент

К.Б. Пыхтеева

Консультант

д-р техн. наук, доцент

О.И. Шевченко

Консультант

канд. техн. наук, доцент

К.Б. Пыхтеева

Нормоконтролер

А.Ю. Лапина

Студент группы

ТМ-222204-НТ

Н.А. Антонов

Нижний Тагил
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт Нижнетагильский технологический

Кафедра металлургических технологий

Направление 22.04.02 Металлургия

Образовательная программа Металлургия

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой МТ
О.И. Шевченко
(подпись) (Ф.И.О.)

« 27 » 05 2024 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студента Антонов Никита Андреевич группы ТМ-222204-НТ
(фамилия, имя, отчество)

1 Тема ВКР Вдувание в доменную печь нагретого пылеугольного топлива совместно с дисперсным железосодержащим сырьем

Утверждена приказом по институту от «21» ноября 2023 г. №81/05 (НТ)

2 Руководитель Тыжесова К.Б., доцент, канд. тех. наук, доцент
(Ф.И.О., должность, ученое звание, ученая степень)

3 Исходные данные к работе отчеты работ доменных печей, теплотехнические инструкции доменных печей

4 Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

Кинетику процесса производства чугуна в УГЛОВОС 40 «Враз-
НТ и К» механизм работы реверсивного агрегата, вдува-
ние нагретого пылеугольного топлива совместно с дисперс-
ным железосодержащим сырьем, реакция температурных
параметров при вдувании шихты, температурная эф-
фективность процесса

5 Перечень демонстрационных материалов Схематич. и расчетные диа-
граммы агрегата, влияние температуры нагрева ТЭМ на тем-
пературные параметры, влияние вдувания железосодержа-
щих дисперсных материалов, варианты вдувания шихты
в доменную печь, возмущающие факторы для нагрева шихты, влия-
ние вдувания шихты на работу доменной печи

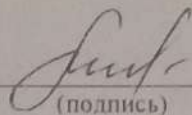
6 Консультанты по проекту (работе) с указанием относящихся к ним разделов проекта

Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		задание выдан	задание принял
Графическая часть (спецчасть)	О.И. Шевченко	20.05.2024	20.05.2024
Экономический	К.Б. Пыхтеева	27.05.2024	27.05.2024
Нормоконтроль	А.Ю. Лапина	03.06.2024	03.06.2024

7 Календарный план

Наименование этапов выполнения работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении
Технологическая часть	20.05.2024-22.05.2024	выполнено
Литературный обзор	23.05.2024-25.05.2024	выполнено
Разработка технологии	27.05.2024-31.05.2024	выполнено
Экономическая часть	03.06.2024-05.06.2024	выполнено
Графическая часть	05.07.2024-07.06.2024	выполнено
Нормоконтроль	10.05.2024-11.06.2024	выполнено

Руководитель


(подпись)

Пыхтеева К.Б.
Ф.И.О.

Задание принял к исполнению

(подпись)



Антонов Р.А.
Ф.И.О.

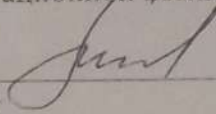
8 Выпускная квалификационная работа закончена «14» июня 2024 г.

Пояснительная записка и все материалы просмотрены

Оценка консультантов: * а) заочно 08.06.2024, б) заочно 08.06.2024
в) лично 08.06.2024, г) лично 08.06.2024

Считаю возможным допустить Антонова Р.А.
к защите его выпускной квалификационной работы в экзаменационной комиссии.

Руководитель



9 Допустить

Антонов Р.А.

к защите выпускной квали-

фикационной работы в экзаменационной комиссии (протокол заседания кафедры № 6
от « 14 » 06 2024 г.)

Зав. кафедрой

(подпись)

Шевченко О.И.
Ф.И.О.

ПЕРЕЧЕНЬ ЛИСТОВ ГРАФИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ

№ п.п	Наименование документа	Обозначение документа	Формат
1	Строение и расположение фурменного прибора	22.04.02 000 001 304	A1
2	Влияние подогрева ПУТ на технические параметры	22.04.02 000 002 304	A1
3	Влияние вдувания железосодержащих дисперсных материалов	22.04.02 000 003 304	A1
4	Варианты вдувания смеси в доменную печь	22.04.02 000 004 304	A1
5	Воздухонагреватель для нагрева смеси	22.04.02 000 005 304	A1
6	Влияние вдувания смеси на работу доменной печи	22.04.02 000 006 304	A1
7	Экономическое обоснование	22.04.02 000 007 304	A1

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего 45 наименований, 1 приложения. Работа включает 27 таблиц и 9 рисунков. Общий объем выпускной квалификационной работы – 71 страницы.

В пояснительной записке представлен проект по совершенствованию доменного процесса. Целью данного проекта является снижение себестоимости чугуна за счет экономии кокса. В проекте рассмотрена существующая технология вдувания нагретого пылеугольного топлива совместно с дисперсным железосодержащим сырьем, отмечены ее положительные стороны, а также проанализированы основные способы внедрения данной технологии.

Ключевые слова: доменная печь, фурменный прибор, комбинированное дутье, ПУТ, железосодержащая пыль, аспирационная пыль, химический состав чугуна и шлака, воздухонагреватель, расход кокса и условного топлива, рециклинг.

Теоретически обоснована актуальность и необходимость разработки и использования технических решений, позволяющих применять дисперсные отходы в качестве сырья для производства чугуна.

Была проведена оценка существующих способов совместного вдувания подогретых ПУТ и железосодержащей пыли, предложена технология подогрева воздухопроводом данного типа сырья. Установлена закономерность влияния вдувания ПУТ и аспирационной пыли на химический состав чугуна и шлака, производительность доменной печи и расход кокса. В данном проекте рассмотрены преимущества и возможности выбранной технологии, выполнены технологические и экономические расчеты.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА В УСЛОВИЯХ АО «ЕВРАЗ НТМК»	8
1.1 Технология выплавки ванадиевого чугуна.....	9
1.2 Основное оборудование цеха.....	13
1.2.1 Структура доменной печи	15
1.3 Шихтовые материалы и дутье доменной плавки	17
1.4 Продукты доменного производства	19
2 МЕХАНИЗМ РАБОТЫ ФУРМЕННЫХ ПРИБОРОВ.....	21
2.1 Суть процесса дутья.....	21
2.2 Конструкция фурменного прибора	23
2.3 Условия работы фурм	25
3 ВДУВАНИЕ НАГРЕТОГО ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА СОВМЕСТНО С ДИСПЕРСНЫМ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИМ СЫРЬЕМ.....	27
3.1 Вдувание топлива.....	27
3.2 Вдувание железорудных материалов.....	30
3.3 Вдувание железосодержащей пыли через фурмы	32
3.4 Экологическая сторона проблемы.....	34
3.5 Вдувание нагретого ПУТ с оксидами железа	36
4 ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВДУВАНИИ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ НАГРЕТОГО ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДИСПЕРСНЫМ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИМ СЫРЬЕМ.....	48
4.1 Изменение химического состава чугуна и шлака.....	48
4.2 Расчет технико-экономических показателей плавки	52
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТА	57
5.1 Расчет условно-годовой экономии	57
5.1.1 Расчет технико-экономических показателей плавки	58

5.2 Расчет прибыли	59
5.3 Расчет показателей фондоотдачи и фондоемкости	59
5.4 Расчет срока окупаемости проекта.....	60
5.5 Расчет рентабельности продукции	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	63
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	65
ПРИЛОЖЕНИЕ А ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ	71

ВВЕДЕНИЕ

Особое место среди металлургических переделов современной металлургии занимает доменное производство как самое энергоемкое, на долю которого приходится до 50% топлива, используемого в черной металлургии. Анализ показывает, что доменное производство относится к классу сложных и распределенных систем [1-3]. Доменная плавка является сегодня и остается на дальнюю перспективу важнейшим, наиболее сложным, самым трудоемким и одновременно самым эффективным, определяющим технологическим модулем в схемах производства черных металлов. При этом с каждым годом увеличивается потребность и требования к продукции комбината. Поэтому важно анализировать работу доменных печей, искать недочеты, предлагать оптимальные решения, внедрять новые технологии. Одним из путей увеличения производительности и качества продукции является рассмотрение и введение новых технологий в процессы производства.

Целью работы является рассмотрение внедрения технологии вдувания подогретого ПУТ с оксидами железа преимущественно полученных с отходов и изучение влияния этой методики на доменную печь. Тема является актуальной, так как приведет к улучшению технических параметров доменной печи и появлению нового источника сбыта отходов производства, тем самым улучшить экологическую обстановку в городе. Чтобы осуществить поставленную цель необходимо выполнить следующие задачи:

- изучить основные закономерности и факторы, влияющие на вдувание ПУТ и ЖРС в доменную печь,
- проанализировать исследования, в которых раскрыта данная тематика, и технологии, приемлемые для производства в НТМК,
- рассмотреть влияние данной технологии на технико-экономические показатели доменной плавки в условиях НТМК.

1 ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА

В УСЛОВИЯХ АО «ЕВРАЗ НТМК»

ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат (АО «ЕВРАЗ НТМК») – градообразующее предприятие г. Нижний Тагил, Свердловской области, один из крупнейших металлургических комплексов России, с полным производственным циклом, включающим коксохимическое, доменное и конвертерное производства и ряд сталепрокатных цехов.

В данный момент НТМК входит в состав металлургического производства ЕВРАЗ. «ЕвразХолдингом» продолжен курс на реконструкцию и переоснащение, который включает все свои пределы комбината. Преимущество по очередности и времени реконструкции расставлены по реальной значимости цехов и агрегатов для эффективного функционирования всего комбината и обеспечения выпуска конкурентной продукции. Сначала были проведены срочные работы в области энергетики, включая замену устаревших агрегатов ТЭЦ и восстановление генерирующих мощностей. Благодаря этому удалось достичь восстановления производства собственной электроэнергии до 50% от потребляемой мощности. В то же время удалось резко повысить надежность энергообеспечения в первую очередь доменного цеха.

Выплавка чугуна происходит 2-мя доменными печами №6 и №7, полезным объемом 2200 м³. Сталь и ванадиевый шлак производят в сталеплавильном цехе из выплавленного чугуна. Усовершенствованная конструкция печей, специальные огнеупорные материалы и системы охлаждения, а также высокая степень автоматизации позволяют с высокой эффективностью вести доменную плавку. На доменных печах получена производительность 3,3 т/м³ в сутки при удельном расходе кокса 335-350 кг/т чугуна.

1.1 Технология выплавки ванадиевого чугуна

Доменный процесс является совокупностью физических, физико-химических и механических явлений, протекающих в действующей доменной печи.

К шихтовым материалам, загружаемым в доменную печь, относятся кокс, железоблюс, окатыши агломерат, металлодобавки. По итогу протекания доменного процесса шихтовые материалы превращаются в ванадиевый чугун, шлак и доменный газ. Железоблюс используется при выплавке чугуна в роли блюсующей и ванадиевой добавки в составе железорудной части шихты равной величине от 7 до 15%.

В горн кокс попадает с температурой до 1400-1500°C. В районе окисления углерод кокса содействует с кислородом комбинированного дутья. При высокой температуре и избытке углерода, диоксид углерода в зонах горения становится неустойчивым и преобразуется в оксид углерода. Вне зон горения горнового газа содержит лишь оксид углерода, азот и небольшое количество водорода, которое возникло из разложения водяных паров или природного газа. Это означает, что за пределами горения состав горнового газа состоит из указанных компонентов. При нагревании смеси газов до 1800-2200°C происходит их подъем вверх, что приводит к передаче тепла материалам, опускающимся в горн в результате выгорания кокса, образования чугуна и шлака. Затем происходит периодический выпуск этих материалов из доменной печи. При достижении высокой температуры в печи происходит охлаждение газов до 150-450°C. В результате оксид углерода преобразуется в диоксид углерода, поскольку он отнимает кислород из оксидов железа. Содержание диоксида углерода в доменном газе на выходе из печи достигает 14-25%.

На этапе нагрева шихты вода и летучие материалы кокса удаляются, а также происходит разложение карбонатов. Под воздействием восстановительных газов оксиды железа медленно изменяют свои

окислительные степени от высших к низшим. После этого происходит переход к металлу по следующей модели: $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{-FeO-Fe}$.

Восстановленное железо сильно поглощает углерод уже в твердом агрегатном положении. В меру поглощения углерода температура расплавления его снижается. При температуре 1000-1100°C приступают восстанавливаться такие трудновосстанавливаемые элементы, как фосфор, ванадий, кремний и марганец за счет того, что восстановление железа почти заканчивается. Обезуглероженное железо, содержащее в среднем четыре процента углерода и небольшое количество фосфора, кремния и марганца, плавится при температуре 1120-1160°C и стекает на манер капелек чугуна в горн. В шахтной низовой зоне шахты начинается формирование расплавленного шлака из комплексных частиц пустой породы руды и добавок. Сокращению температуры расплавления шлака содействуют невозобновленные окислы марганца и железа. В стекшем вниз шлаке под влиянием повышенной степени теплоты постепенно плавится весь флюс и пустая порода, а следом за полным окислением кокса зола [4].

При взаимодействии жидких продуктов плавки с раскаленным коксом в заплечиках и горне происходит усиленное восстановление кремния, марганца и фосфора из их оксидов, растворенных в шлаке. В ходе плавки металл поглощает серу, которая затем переходит в шлак. Степень восстановления кремния и марганца, а также полнота удаления серы из чугуна, в значительной степени зависят от температурных условий, химического состава шлака и его объема.

По мере скопления чугуна и шлака в горне их выпускают через чугунные летки. Все перечисленные процессы протекают в доменной печи одновременно с оптимальными параметрами технологического режима.

Важным условием для реализации доменного процесса является непрерывное встречное движение и взаимодействие движущихся шихтовых материалов, которые через колошник загружаются в печь, и движущегося потока газов. Газы образуются в области горна при возгорании углерода

кокса в нагретом до 1250°C воздухе (дутье), который обогащен кислородом. Содержание кислорода в дутье составляет 29-32%. Воздух нагнетается в верхнюю часть горна через 22 фурмы, которые расположены по его окружности. К дутью добавляются природный газ и ПУТ [5-6]. Железо на 70-80% восстанавливается в шахте (сухой зоне) газообразными восстановителями, а завершается процесс восстановления при температуре выше 1000°C при взаимодействии расплава с углеродом кокса в заплечиках и горне.

При ограниченных ресурсах и уменьшении количества богатых залежей переработка титаномагнетитового сырья, запасы которого на Урале и в Сибири практически неограниченны, является очень мощным источником чугуна с получением дополнительного продукта в виде ванадиевого шлака. Это касается особенно нижнетагильских металлургов уже сегодня и особенно на перспективу, если учитывать качественные изменения сырьевой базы при переходе с гусевогорских руд на качканарские. Эти изменения связаны с увеличением в рудах и концентратах соотношения содержания титана и железа, что отражается через изменение физических свойств шлаков на технологии доменной плавки.

Созданная и внедренная на НТМК технология выплавки ванадиевого чугуна из Качканарского доменного сырья в отличие от выплавки обычного передельного чугуна имеет некоторые особенности. Применение в плавке разноосновных железорудных материалов, при этом рост содержания серы в чугуне, ограничен низкой природной концентрацией ее в исходном сырье и слабым поглощением серы окатышами при твердофазном восстановлении в печи, сохраняя исходную форму. Использование в доменной шихте высокопрочных при восстановлении неофлюсованных окатышей КГОК улучшает газопроницаемость столба шихты и равномерность распределения газа в печи, что способствует повышению интенсивности плавки и улучшению степени использования газа.

В ходе совершенствования технологии выплавки ванадиевого чугуна был отработан и подобран шлаковый режим, обеспечивающий наилучшие условия фильтрации расплава в горне, нормальный выпуск его через чугунную летку, снижение потерь металла и ванадия и получение кондиционного по сере чугуна.

При выплавке ванадиевого чугуна из шихты с повышенным содержанием железа уменьшается выход шлака и одновременно увеличивается содержание двуокиси титана и глинозема в шлаках, содержание магнезии при этом не изменяется. На основании обработки практических данных, характеризующих влияние выхода шлака на коэффициенты распределения ванадия, серы, титана и на коэффициент извлечения ванадия, следует, что рост содержания железа в шихте и последовательное снижение выхода шлака вызывают повышение коэффициента распределения титана. При этом коэффициент извлечения ванадия возрастает до 90%. Это вызвано ростом содержания двуокиси титана и глинозема в шлаке. Коэффициент распределения серы в этом интервале также заметно снижается, что свидетельствует об уменьшении активности взаимодействия металла со шлаком. Таким образом, с точки зрения максимального извлечения ванадия и удаления серы, выход шлака в количестве 330-370 кг/т чугуна является оптимальным, что соответствует содержанию железа в сырье КГОКа на уровне 57,5-58%. Расход кокса уменьшается во всем диапазоне снижения выхода шлака при соответствующем приросте выплавки чугуна.

Эффективность доменной плавки ванадиевого чугуна во многом определяется применением комбинированного дутья. Вдувание в горн доменной печи углеводородов в виде жидкого топлива или природного газа обогащает восстановительные газы водородом, улучшает процессы восстановления в шихте и в то же время понижает температуру в фурменной зоне, затрудняя восстановление титана. Увеличение концентрации водорода в горновом газе наряду с обогащением дутья кислородом снижает

парциальное давление азота, что затрудняет условия образования нитридов титана в печи и облегчает отработку продуктов плавки. Выбранный интервал допустимых колебаний содержания кремния в чугуна определяется как условиями получения качественного ванадиевого шлака при переделе чугуна в конвертерах, так и технологическими требованиями сохранения устойчивого и ровного хода доменных печей. Повышение содержания кремния в чугуна и, как следствие, титана снижает эффективность деванадации чугуна в конвертере. Восстанавливаясь при высокой температуре в условиях доменной плавки, титан образует тугоплавкие, нерастворимые в шлаке и чугуна соединения с углеродом и азотом, способствует загромождению горна и предопределяет большие потери чугуна со шлаком. В то же время ограничение нагрева печи связано с недовосстановлением ванадия и повышением содержания серы в чугуна. Следовательно, для ванадиевой плавки специфично осуществление процессов, протекающих в горне, в весьма узком диапазоне допустимых колебаний теплового состояния и температур продуктов плавки [7].

1.2 Основное оборудование

В состав доменного производства помимо доменных печей №6, 7 так же входят следующие объекты и участки:

- рудный двор открытого типа полезной площадью 30 000 м². Рудный двор предназначен для приемки, выгрузки и складирования сырья и кокса, создания необходимых сезонных и технологических запасов. Двор оборудован тремя рудно-козловыми кранами-перегрузчиками,
- бункерная эстакада предназначена для приемки и разгрузки сырья, кокса и добавок в бункера доменных печей и на рудный двор, создания технологических запасов в бункерах, размещения оборудования загрузки доменных печей. Все шихтовые материалы для доменной печи поставляются железнодорожными вагонами на бункерную эстакаду. В своем составе система шихтоподачи ДП №6 имеет 16 расходных бункеров.

Для каждого шихтового материала выделено определенное количество бункеров с разным полезным объемом: для агломерата – бункера с общим полезным объемом в размере 1136 м³, для окатышей – 4 бункера с общим полезным объемом 1056 м³, для добавок – 4 бункера с общим полезным объемом 550 м³, Для железоблюса – 2 бункера с общим полезным объемом 284 м³, для кокса – 2 бункера с общим полезным объемом 1070 м³. Из бункеров шихтовые материалы подается через вибропитатели в весовые воронки, затем выгружаются на ленточный конвейер и транспортируются в весовые бункера. Мелочь агломерата и кокса отсеивается при помощи грохота после вибропитателей. Мелочь агломерата и кокса транспортируется конвейерами в бункера для мелочи. В весовой бункер для железорудного материала транспортируются агломерат, окатыши, железоблюс, металлодобавки. После набора нужного объема шихтовых материалов из весовых бункеров они загружаются в скипы. Далее скип транспортируется по наклонному мосту скипового подъемника с помощью скиповой лебедки наверх наклонного моста, где переворачивается и высыпает шихту в приемную воронку БЗУ. Попутно выгрузки скипа в верхах скипового подъемника, снизу другой скип берет шихту из весового бункера,

– бесконусное загрузочное устройство (БЗУ) предназначается для шлюзования и загрузки шихтовых материалов в печь с распределением их по сечению колошника в соответствии с заданной программой. Шихтовые материалы в доменную печь загружают подачами, которые распределяются на колошнике чередующимися слоями. Производят загрузку подач через 6-7 минут в меру расчистки пространства в области колошника после схода шихты,

– литейные дворы с расположенными на них устройствами для выпуска чугуна и шлака, и уборки результатов плавки. Литейные дворы располагают идентичным набор устройств: манипулятор, механизм для закрытия чугунной летки, установка для открытия чугунной летки, раскачивающийся желоб для разлива чугуна, разворотный желоб

для разливки шлака, пневмогрейфер, мостовой кран грузоподъемностью 32,5 тонн, железнодорожные проталкиватели на местах разливки шлака и чугуна,

- участок воздухонагревателей доменных печей, обеспечивающих нагрев дутья, подаваемого в печь,

- сухая газоочистка доменных печей (по одному сухому пылеуловителю на печь),

- участок подготовки и вдувания пылеугольного топлива в доменные печи, представленный пылеприготовительным отделением, предназначенным для помола и осушки углей для производства ПУТ, и распределительно-дозировочным отделением, предназначенным для равномерного распределения ПУТ по фурмам доменных печей.

Перечисленные участки являются основными и обеспечивают технологический процесс производства от загрузки печей, подачи и нагрева дутья до выдачи продуктов плавки, однако имеются также вспомогательные подразделения:

- отделение разливки чугуна в составе 4 разливочных машин,
- склад товарного (чушкового) чугуна открытого типа, оборудованный четырьмя магнито-грейферными кранами.

1.2.1 Структура доменной печи

Печь является комплексное возведение, складывающееся из большого количества частей. Основные: колошник, шахта, распар, заплечики, горн. В таблице 1 представлена техническая характеристика седьмой доменной печи. Печь выполнена с самонесущим кожухом и четырьмя опорными вертикальными колоннами. Печь установлена на усиленном монолитном железобетонном фундаменте. Профиль печи выполнен с переменным углом наклона и имеет толщину кожуха лещади и горна – 45 мм, заплечиков, распара, шахты и колошника – 40 мм.

Футеровка горна и лещади выполнена из углеродистых и графитированных блоков, защищенных внутренним керамическим «стаканом» из карборундового материала с низкой теплопроводностью и химической стойкостью против разрушения жидкими продуктами плавки. Применение керамического стакана позволяет снизить температуру углеродистой футеровки горна и уменьшить тепловые потери. Нижние два ряда лещади состоят из графитированных блоков ДБГ-1, выше находятся три ряда углеродистых блоков ДБУ-1 и два ряда ДБУ-2 повышенной теплопроводности. Фурменная зона горна выложена из алюмокарборундовых блоков. В таблице 1 представлены технологические характеристики ДП №7.

Таблица 1 – Техническая характеристика ДП №7 [8]

Наименование параметра	Единица величины	Значение параметра ДП №7
Полезный объем	м ³	2200
Диаметр горна	мм	9800
Диаметр колошника	мм	7100
Высота горна	мм	4100
Высота заплечиков	мм	4011
Высота распара	мм	3247
Площадь сечения горна	м ²	75,43
Число воздушных фурм	шт.	22
Число чугунных леток	шт.	2

Футеровка заплечиков, распара, нижней и средней части шахты предусмотрена из огнеупорного бетона, который наносится методом торкретирования по внутренней поверхности холодильников.

Охлаждение лещади в нижней части – воздушное с укладкой труб под донышко печи. Охлаждение кожуха горна и лещади выполняется методом наружного полива кожуха технической водой. Необходимая для этого вода поступает из холодильных плит фурменной зоны, фурм и фурменных холодильников, включенных в систему водопроточного охлаждения.

Холодильные плиты испарительного охлаждения заплечиков, средних и верхних рядов шихты, а также холодильные плиты водяного охлаждения фурменной зоны изготовлены из меди. Чугунные холодильники средней

части шахты выполнены с залитым карбидокремниевым кирпичом. Выше установлен один ряд С-образных вертикальных холодильных плит испарительного охлаждения из чугуна без нанесения торкрет-бетона. В нижней части шахты и в распаре установлены два ряда медных холодильников фирмы «Пауль-Вюрт» на испарительном охлаждении. Общая их высота – около 8 метров.

Для обеспечения лучшей герметичности и снижения шума в фурменных устройствах предусмотрены 22 фурменных прибора сильфонного типа фирмы «Пауль-Вюрт».

Оборудование и датчики для контроля, регулирования и прогнозирования процесса плавки, параметров энергосетей, диагностики состояния оборудования, металлоконструкций и огнеупорной кладки установлены в доменной печи. Среди них – амбразуры измерения статического перепада давления в шахте, термопары для замера температуры футеровки низа печи, кожуха и холодильных плит, два радиолокационных уровнемера шихты, две многоточечные термопары для измерения температур над уровнем шихты.

1.3 Шихтовые материалы и дутье доменной плавки

В условиях НТМК основным сырьем для доменной плавки являются агломерат и окатыши Качканарского ГОКа, которые обладают высокой прочностью в холодном состоянии. Преимуществом окатышей является их более высокое содержание железа, в то время как агломерат имеет более высокую прочность при восстановлении.

Железофлюс используется в качестве флюсующей и ванадиевой добавки при выплавке чугуна. Он добавляется в состав железорудной части шихты в количестве от 7 до 15%.

Доменный присад включает в себя вторичные черные металлы, такие как проржавевшая стальная и чугунная стружка, а также чугунный скрап, подвергшиеся длительному температурному или кислотному воздействию.

Химический состав шихтовых материалов разнообразен (примерный химический состав в таблице 2), поэтому каждая его часть применяется в определенной пропорции, которая может меняться в зависимости от состояния печи.

Таблица 2 – Химический состав используемых материалов [8]

Шихтовый материал	Химический состав, %								
	Fe	CaO	SiO ₂	V ₂ O ₅	MgO	Mn	S	P	Al ₂ O ₃
Окатыши	61,0	1,40	4,10	0,580	2,41	0,171	0,001	0,006	5,59
Агломерат	55,5	10,0	4,05	0,555	2,40	0,200	0,014	0,006	2,50
Доменный присад	52,3	15,1	10,5	0,945	8,2	3,2	0,12	0,182	3,1
Железофлюс	52,5	12,1	4,80	0,775	3,20	0,475	0,030	0,038	2,55

Кокс в доменном процессе выполняет несколько функций и является источником тепла (топливом), восстановителем, разрыхлителем столба шихты, обеспечивает наличие фильтрующей насадки и получение восстановительных газов [9].

При производстве чугуна природный газ используется в больших объемах. Он содержит преимущественно метан, который при высоких температурах распадается на углерод и водород. Полученный углерод сгорает, образуя оксид углерода, а общая реакция сгорания природного газа приводит к обогащению горнового газа восстановительными газами. Использование природного газа в производстве чугуна позволяет существенно сократить расход кокса. Коэффициент замены кокса природным газом составляет 0,7-0,8 кг/м³.

Инвестиционный проект ПУТ на комбинате реализован с целью сокращения затрат на технологическое топливо в доменном производстве путем замещения части дорогостоящего кокса в доменной плавке на более дешевую угольную пыль. Эффективное использование пылеугольного топлива достигнуто путем оптимизации загрузки шихты, теоретической температуры фурменных газов и повышения качества кокса. В таблицах 3-5 показаны технические параметры ПУТ.

Таблица 3 – Состав ПУТ [8]

Технический анализ, %				
влага	зола	летучие	S	углерод
1,56	6,9	19,0	0,35	74,2

Таблица 4 – Состав золы ПУТ [8]

Хим. состав золы, %									
Fe	Fe ₂ O ₃	S	P	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O
5,02	7,18	2,43	0,48	46,4	6,2	2,44	0,95	25,7	1,2

Таблица 5 – Расход ПУТ и природного газа на НТМК [8]

Название параметра	Значение параметра
Удельный расход природного газа, м ³ /т чугу	110-120
Удельный расход ПУТ, кг/т чугу	65-75

Коэффициент замены кокса ПУТом, то есть отношение количества выведенного из шихты кокса (кг/т чугуна) к количеству использованного ПУТ (кг/т чугуна) составляет 0,8-0,9 кг/кг.

1.4 Продукты доменного производства

На комбинате отработана уникальная технология выплавки чугуна в печах большого объема с низким содержанием кремния, титана и высоким содержанием ванадия, что позволяет получать ванадиевый шлак высокого качества в конвертерном цехе. В таблицах 6-7 показаны продукты доменной плавки.

В процессе производства чугуна также образуются побочные продукты: колошниковая пыль, доменный шлак и доменный газ, которые могут быть переработаны или использованы в других целях.

Таблица 6 – Примерный химический состав продуктов плавки [8]

Чугун	Хим. состав	Fe	Si	Mn	S	V	P	C	Cr	Ti
	Содержание, %	94,3	0,08	0,37	0,02	0,498	0,044	4,63	0,10	0,15
Шлак	Хим. состав	FeO	SiO ₂	MnO	S	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂
	Содержание, %	0,66	27,0	0,61	0,57	0,27	15,02	13,34	32,8	10,7

Таблица 7 – Технические данные колошникового газа [8]

Наименование параметра	Значение параметра
Давление под колошником, ати	2,15-2,25
Количество выпусков в сутки	12
Температура колошниковый газ, °С	150-200
Колошниковый газ состав: CO ₂ ,%	22,1
CO, %	21,7
H ₂ , %	6
N ₂ , %	49,2
Выработано доменного газа, м ³ /т	1170-1210

На Нижнетагильском металлургическом комбинате запущен в эксплуатацию участок переработки горячего шлака. Комплекс предназначен для слива и охлаждения раскаленных отходов доменного передела НТМК, образующихся в процессе производства чугуна. Отходы доставляются железнодорожным транспортом на шлаковый отвал, охлаждаются водой и отправляются на дробильно-сортировочную установку. Здесь из отходов извлекаются металлические включения, которые в качестве сырья возвращаются обратно в технологический процесс производства чугуна. В настоящее время цех включает в себя полный комплекс утилизации доменного шлака с несколькими видами конечной продукции.

Рассматривая работу доменного цеха и выплавку ванадиевого чугуна из титаномагнетитовых руд, можно сделать вывод о том, что во время процесса требуется уложиться в очень узкие временные и температурные рамки, а следовательно, добиться равномерной работы в горне. Главным инструментом регулирования процессов в горне являются фурменные приборы, так как от них зависит качество дутья и вдувания таких материалов как ПУТ и природный газ. Поэтому важно рассмотреть эксплуатацию фурм и возможные проблемы их содержания. Это также важно в связи с рассмотрением резервов для усовершенствования фурменных приборов при вдувании ПУТ, которая была внедрена для уменьшения себестоимости чугуна.

2 МЕХАНИЗМ РАБОТЫ ФУРМЕННЫХ ПРИБОРОВ

2.1 Суть процесса дутья

Газовый поток двигается через столб шихты кверху под действием разного количества давления, обусловливаемого величиной сопротивления материалов, загруженных в печь и количества дутья, инжектируемый в горн воздуходувным аппаратом. Проходя путь 23-27 метров в течение немного моментов, газовому потоку необходимо выполнить восстановительную и теплообменную работу и предоставить ровный спуск шихтовых материалов от колошника к горну. От налаженности движения и распространения шихты и газов в рабочем зоне доменной печи зависит высокоэффективная и экономная работа. Распределение газов и их ход в печи зависит от нескольких факторов, такие как: гранулометрический состав шихты, ее распределение на колошнике, перераспределение при движении в доменной печи. Газовый поток влияет на распределение шихты.

Под распределением шихты понимают количественное соотношение в слое крупных и мелких фракций и соотношение толщин слоев материалов различной кусковатости. Замерить количественное распределение загруженной в доменную печь шихты прямым путем невозможно. Потому распределение шихты оценивают косвенно, проверяя поддающиеся замеру параметры газового потока: химический состав, температуру и потерю напора, значение которых обуславливается распределением шихты в печи. При отклонении этих параметров газового потока от оптимальных значений меняют распределение материалов так, чтобы возобновить нужное распределение газов. Следовательно, газовый поток в доменной печи исполняет не только роль рабочего тела, но и служит своеобразным индикатором, который позволяет контролировать работу печи и управлять ходом выплавки. При обеспечении равномерного схода шихты в газовом потоке требуются противоречивые требования к распределению газов. Для наиболее полного использования тепла и восстановительной

способности газового потока газы по сечению печи должны распределяться равномерно, иными словами, температура и состав газов во всех точках сечения доменной печи должны быть одинаковыми, а шихта, в равной мере нагретой и восстановленной. Газовый поток должен проходить неравномерно по сечению печи, чаще всего у стен и в осевой зоне, где обычно меньше руды или агломерата.

Однако из-за специфических особенностей доменного процесса и конструкции доменной печи равномерное распределение газов по сечению невозможно достичь в действительности:

- потоки газов в доменной печи перемещаются через множество кривых каналов с различными сечениями и разной шероховатостью стенок, которые расположены параллельно друг другу. Распределяясь обратно пропорционально сопротивлению каналов, газы движутся предпочтительно по каналам большего сечения и меньшей протяженности,

- более интенсивному движению газа у стен печи способствует то обстоятельство, что каналы здесь, более гладкие и имеют меньшую протяженность. Кроме того, увеличение горизонтального сечения шахты за счет наклона стен по мере опускания материалов оказывает содействие оттеснению в периферийное кольцо газопроницаемого кокса более тяжелыми кусками агломерата,

- большие куски шихты скатываются к стенкам и к оси печи, что способствует усиленному движению газов,

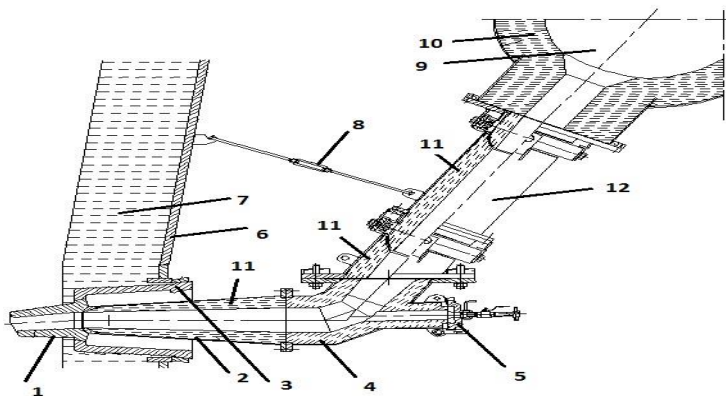
- горение углерода кокса в горне происходит в узком (шириной 1,4-1,8 м) периферийном кольце. Поэтому сформировавшиеся в зонах сгорания газы стараются двигаться по периферии печи. При увеличении количества дутья зоны горения увеличиваются. При проникновении газов в большем количестве в центр печи их распределение становится более равномерным. На распределение газов по сечению сказывается перераспределение шихты при движении ее от колошника к горну,

в результате разных скоростей опускания шихты в различных сечениях и по диаметру печи.

Самым главным фактором, показывающим расход по сечению столба шихты газового потока, является сравнение количества газов, проходящих через равные площади полного шихтой сечения печи в единицу периода. Согласно требованиям, предъявляемым к расходу дутья в печи, шихта при загрузке должна расходоваться неравномерно по сечению печи по компонентам шихты и по размерам. У стенок необходимо находиться много большого агломерата для улучшенного применения периферийных газов, но по оси более кокса. Огромная численность маленьких частей железистых компонентов у стенок печи неприемлемо для того, чтобы избежать тугой ход. Основу мелкой фракции нужно расположить промежуточно между центром и периферией.

2.2 Конструкция фурменного прибора

Фурменный прибор (см. рисунок 1) предназначен для подачи горячего дутья, а также газообразного, жидкого и пылеобразного топлива в воздушную фурму в горн доменной печи. Воздушные фурмы устанавливают в верхней зоне горна по окружности в один ряд в количестве от 12 до 42 шт.



- 1 – медная водоохлаждаемая фурма, 2 – сопло, 3 – медная водоохлаждаемая амбразура, 4 – колено, 5 – фланец фурменного колена, 6 – кожух доменной печи, 7 – футеровка доменной печи, 8 – тяга, 9 – кольцевой воздухопровод, 10 – футеровка кольцевого воздухопровода, 11 – футеровка сопла, колена и рукава, 12 – рукав

Рисунок – 1. Фурменный прибор [8]

В доменных печах №6 и №7 используются по 22 фурмы (см. рисунок 2).

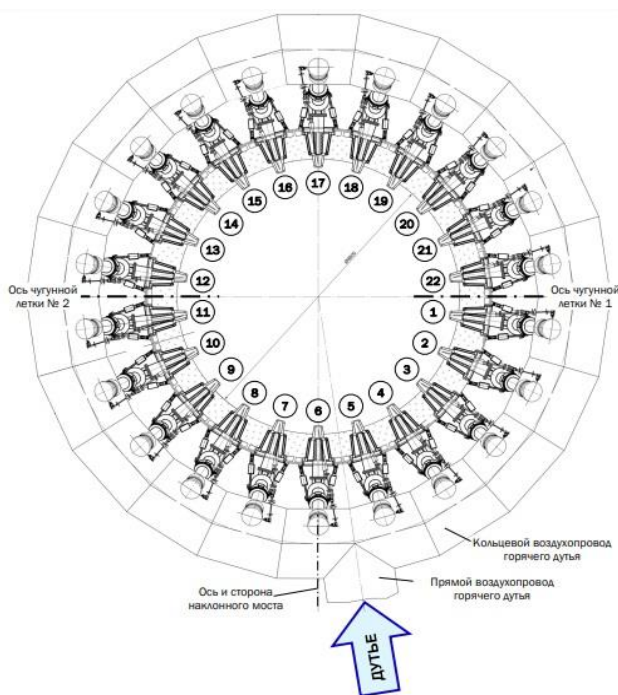


Рисунок – 2. Распределение фурм по оси печи №7 [8]

Фурменный прибор состоит из трех основных элементов: стационарной части, закрепленной на кожухе горна печи, воздухоподводящего (фурменного) рукава (см. рисунок 3), соединяющего стационарную часть прибора с кольцевым воздухопроводом горячего дутья, и пружинного устройства, зажимающего сопло между фланцами подвижного колена и фурмы. Конструкция фурменного рукава имеет преимущество в том, что возникающие вследствие высоких температур горячего воздуха различные деформации отдельных участков трубопроводов фурменного рукава выравниваются с помощью сильфонов, имеющих весьма малое количество гофров, без применения шаровых шарниров.

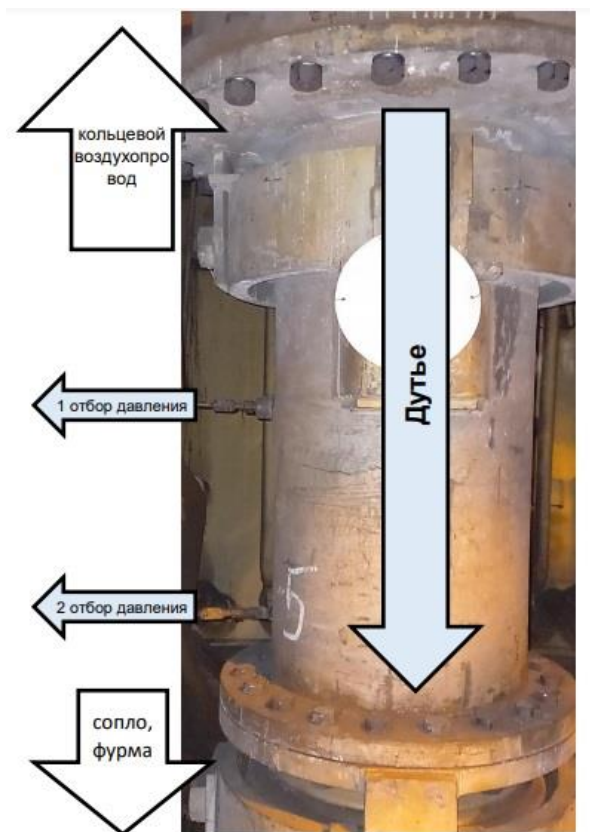


Рисунок – 3. Рукав фурменного прибора на НТМК

В этой конструкции фурменного рукава сопло, жестко напрессовывается посредством натяжного приспособления в помещенную в стенке доменной печи фурму. При этом контакт между соплом и фурмой выполняется в виде шаровой уплотнительной поверхности с тем, чтобы воспринимать относительные смещения между ними.

2.3 Условия работы фурм

Воздушные фурмы работают в наиболее тяжелых условиях: находясь в зоне максимальных температур, они подвергаются непрерывному истирающему действию шихтовых материалов и периодическому попаданию на охлаждаемую поверхность продуктов плавки с температурой более 1400 °С. Главными причинами поломок фурм являются:

- постоянный абразивный износ фурмыдвигающейся шихтой, протекающей в условиях высоких температур,
- непостоянство теплового режима доменной печи,

- повторяющиеся попадание на фурму расплавленных продуктов плавки, вызывающее проплав (пригорание) стенки,
- неудовлетворительная результативность отхода тепла фурмой из-за иррациональности способов доставки воды в охлаждающую полость,
- некачественная охлаждающая вода, создающая осложнение теплопередачи из-за образования накипи на стенке фурмы.

Две последних причины исполняют важную роль в прогаре материала фурмы. В соответствии иностранным экспериментам, воздушные фурмы доменных печей ломаются в основном из-за прогорания стенки и попадании на ее поверхность расплавленного металла – в среднем 69-74% от всей совокупности негодных фурм [10, 11].

Важным аспектом работы фурм являются вдуваемые материалы, так как они влияют на износ фурм [12, 13]. Так как в данный момент чаще всего используются ПУТ и природный газ, фурмы делают с эксплуатационными параметрами на основе их вдувания, однако для каждого предприятия имеется своя специфика, заключающаяся в количестве и качестве материалов и режиме плавки. Поэтому важно рассмотреть сырье, использующееся фурменными приборами доменной печи, их преимущества, недостатки и возможное взаимодействие между собой и дутьем.

3 ВДУВАНИЕ НАГРЕТОГО ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА СОВМЕСТНО С ДИСПЕРСНЫМ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИМ СЫРЬЕМ

3.1 Вдувание топлива

Целесообразность вдувания в доменную печь углесодержащих веществ, в частности углеводородов, признавали еще в 19-ом веке. Новым этапом для доменного процесса стало введение комбинированного дутья. Начали проводить опыты с вдуванием в горн угольной пыли в конце 40-х годов на металлургическом заводе имени Дзержинского. Барнетт в 1838 году предложил вдувать в доменные печи газы, содержащие углеводороды и смолы, а затем предлагали вдувать нефть и ее продукты, угольную пыль, каменноугольные пек, коксовый, попутный и природный (сырой и конвертированный) газы.

Опыты с вдуванием в горн угольной пыли в конце 40-х годов были проведены на металлургическом заводе им. Дзержинского. На металлургическом заводе им. Петровского были сделаны попытки вдувания мазута. Однако только с 1957 года на ряде заводов Украины внедрили технологию доменной плавки на дутье с добавкой природного газа. Это стало новым этапом для доменного процесса, плавка на комбинированном дутье [14].

Вдувание мазута. В процессе доменной плавки мазут демонстрирует аналогичное воздействие на газ природного происхождения. Отмечается, что мазут при сжигании в печи фурм выделяет больше тепла (в силу меньшей теплоты распада и большого содержания углерода), что приводит к образованию меньшего количества горновых газов и выделению меньшего количества водорода в процессе горения. Теплота сгорания мазута у фурм составляет 6100-6400 кДж/кг, то есть несколько меньше, чем для кокса, и значительно больше, чем для природного газа. Вдувание мазута в горн вызывает некоторое снижение температуры в горне печи. По опыту применения мазута в доменных печах Нижнетагильского металлургического

комбината, снижение теоретической температуры горения топлива в фурменной зоне печи составляет 4-6°С на 1 кг мазута в 1 м³ дутья.

Опыт промышленного производства показал, что 1 кг мазута экономит 0,9-1,3 кг кокса. Основной эффект воздействия мазута связан с прямой заменой углерода кокса углеродом мазута. При внесении водорода в печь в меньших количествах, чем при использовании природных и коксовых газов, улучшение восстановительных условий, включая уменьшение прямого восстановления, оказывает менее заметное влияние. Промышленный опыт подтверждает, что это не влияет на содержание серы в чугунах. Проблемой является транспортировка мазута в печь и равномерная подача его в зону горения. Необходимо подогревать мазут из-за его высокой вязкости при низких температурах. Ограничения на количество вдуваемого мазута в печь аналогичны ограничениям при использовании природного газа, что приводит к ухудшению газодинамики плавки и снижению температуры в горне печи [14].

Вдувание измельченного угля. Ключевым преимуществом пылевидного угля является его сравнительно невысокая стоимость по сравнению с другими видами топлива. В процессе вдувания ПУТ, затраты энергии на процесс термического его разложения минимальны, что способствует сравнительно высокому уровню поступления тепла в горн доменной печи. Влияние измельченного угля на технологический процесс основано результатом воздействия замененного углерода кокса на углерод ПУТ. Коэффициент замены зависит от содержания углерода, золы, серы и влаги в угле. Уголь почти не содержит водорода, поэтому его вдувание оказывает слабое воздействие на процессы восстановления.

Зола угля увеличивает выход шлака, что ухудшает экономию кокса. Сера в угле может переходить в чугун, поэтому нужно контролировать уровень серы. Особенности использования пылеугольного топлива не влияют на газодинамические условия плавки. Поэтому нагрев горна является основным лимитом для вдувания ПУТ. Уменьшение прихода тепла в горн

из-за меньшей по сравнению с коксом теплоты сгорания угля и наличия водяных паров, претерпевающих в горне диссоциацию, приводит к снижению температуры горна. Поэтому в доменной плавке следует использовать высушенные угли [14].

В 1980-х годах стали широко применять пылеугольное топливо. Улучшение техники вдувания привело к стабильному расходу топлива на уровне 160-210 кг/т. Исследования на горячих стендах и доменных печах на данный момент позволили получить знания оптимизации и изменения процессов замены кокса на пылеугольное топливо до 40-45%. Для этого необходимо использовать:

- качественный кокс,
- высокое качество угля, использующийся для создания, вдуваемого ПУТ,
- вдувание кислорода совместно с углем и обогащенное кислородом дутье,
- специализированное оборудование, поддерживающее совершенство усвоения в фурменной зоне ПУТ.

Основным условием для того, чтобы выполнить эти требования, является использование высококачественного кокса, который обладает высокой температурой плавления и высокой теплоотдачей. Основные требования к качеству углей, которые будут использоваться для вдувания в доменную печь, заключаются в следующем:

- сравнительно невысокая доля летучих веществ (не более 10-12%) и высокое количество летучих (30-40%),
- содержание серы, составляющее не более 1%,
- очень высокая температура, при которой происходит процесс плавления золы (1400оС),
- тончайшее измельчение (80% составляет 200 мкм),
- отличная способность к измельчению [14].

Зольностью вдуваемого угля, что обратнопропорциональна коэффициенту замены кокса ПУТ, определяется количество кремния в шихте и выход шлака. Значение абразивных свойств угля, которое влияет на устойчивость системы вдувания, тоже зависит от зольности углей. На 2004 год мировое потребление пылеугольных топлива составило более 35% на доменных печах Японии (все они оборудованы ПУТ-системами), а около 25% – на доменные печи других стран Азии. Установлено, что повышение расходов ПУТ более 200 кг/т приводят к увеличению доли несгорающего угля, а также уменьшению проницаемости тотермана кокса. В связи с уменьшением газостойкости столба, вводя значительное количество ПУТ, а также для того, чтобы печи работали на нужном уровне, расход дыма сокращается, обогащаясь кислородом его. Особенность технологии плавления при вдувании ПУТ заключается в создании коксовой отдушины в оси печи из больших кусков кокса. В связи с тем, что уголь не успевает сгорать в фурменной зоне, что для вдувания лучше использовать угли, несгоревшие частички которых имеют повышенную реакционную способность.

3.2 Вдувание железорудных материалов

Вдувание дисперсной железной руды в доменную печь через фурмы активно изучалась в 1980-х годах как многообещающая технология доменной печи следующего поколения. В то время исследования были сосредоточены на закачке руды в небольших количествах, примерно 50 кг на тонну чугуна, в качестве меры по снижению содержания Si в горячем металле, но поскольку требования к повышению производительности и гибкости производства стали более жесткими, акцент сместился на закачку 100 кг/т или более дисперсной руды [15]. Примерно в 1987 году компания IRSID (в настоящее время Arcelor), которая возглавила исследование применения плазмы в доменных печах, предложила технологию тонкой закачки руды через фурмы, получившую название процесса 4 плазменных фурм

mineraliproduct (PTMP). Корпорация NipponSteel также изучила технологию как возможный доменный процесс следующего поколения и сконструировала крупномасштабную горячую модель для ее тестирования [15]. На рисунке 4 и таблице 8 представлены данные этой модели. На территории СНГ этим направлением занималась Украина.

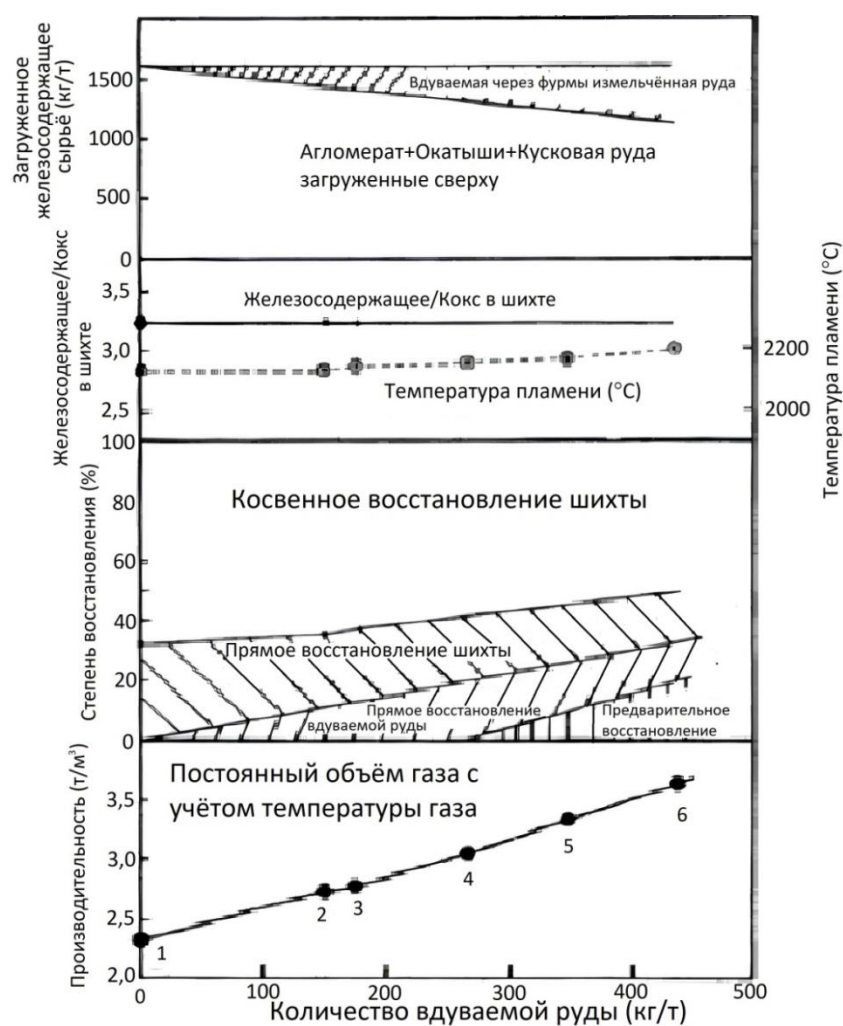


Рисунок – 4. Примеры работы доменной печи с вдуванием дисперсной руды из фурмы в зависимости от варианта [14]

В целом представленные режимы отличаются лишь максимальным использованием потенциала печи работы фурменных приборов.

Таблица 8 – Вариант работы доменной печи

Параметры доменной печи	1	2	3	4	5	6
Температура дутья (°C)	1100	1100	1300	1800	1800	1800
Влажность дутья (г/н.м ³)	36	15	15	15	15	15
Кислород (н.м ³ /т)	0	10	90	0	80	82
ПУТ (кг/т)	0	87	80	87	87	85
Степень предварительного восстановления (%)	0	0	0	0	35	60

Несмотря на то, что вдувание различных материалов изучается достаточно давно, изучены не все их комбинации и взаимодействия. В частности, неизвестно как система может повести себя при вдувании вместе подогретого ПУТа, дисперсного железорудного сырья, природного газа в условиях работы доменных печей в НТМК. Поэтому необходимо рассмотреть не каждый материал по отдельности, а совместное использование.

3.3 Вдувание железосодержащей пыли через фурмы

Вдувание дисперсных железосодержащих материалов и пылевидного угля в доменную печь через фурмы в больших количествах обеспечивает следующие преимущества по сравнению с традиционными методами работы доменной печи:

- загрузка агломерата с верхней части печи может быть уменьшена, что значительно снижает нагрузку на агломерационную машину, что приводит к уменьшению требуемого количества работающих машин в долгосрочной перспективе. Меньшая нагрузка на агломерационную машину также позволяет шире использовать в качестве шихты железные руды с плохими агломерационными свойствами [15],

- удельный расход горячего дутья может быть значительно снижен, что приведет к увеличению производительности. Количество впрыска можно легко регулировать, и это обеспечивает повышенную гибкость в управлении производством,

- поскольку прямое измельчение руды перед фурмами увеличивается с закачкой руды, нагрузка на измельчение руды в шахте печи

уменьшается, по этой причине использование низкокачественной шихты может быть увеличено, и в долгосрочной перспективе высота шахты доменной печи может быть уменьшена.

Современные доменные печи представляют собой масштабный процесс и не способна гибко реагировать на меняющиеся требования производства. Это связано с тем, что после изменения структуры насадки (например, руды/кокса) в шахте требуется несколько дней, чтобы работа печи вышла на новый устойчивый режим. Кроме того, для ощутимого изменения работы печи обычно требуется множество тонких действий по различным параметрам работы. Однако, если можно изменить режим работы доменной печи только за счет воздействия на фурмы без изменения конструкции насадки шахты (особенно руды/кокса по отношению к закачке мелкозернистой руды), то появляется возможность оперативного изменения темпов добычи.

Вдувание дисперсных материалов через фурму дает указанную выше возможность, особенно в сочетании с такими мерами, как обогащение дутья кислородом, регулирование температуры и влажности дутья и изменение количества вдувания пылевидного угля. По идеальным вариантам для увеличения количества закачки мелкозернистой являются следующие условия: температура дутья была поднята до 1800°C , влажность дутья регулируется до 15 г/нм^3 , мелкозернистая руда предварительно измельчена до 60% и закачана с расходом 455 кг/т , кислород дутья увеличенный расход на $82 \text{ нм}^3/\text{т}$, и пылеугольного топлива, вводимого с мелкой рудой в количестве 85 кг/т . Более того, количество агломерата, загружаемого с колошника печи, составит лишь две трети по сравнению с базовым вариантом, а также уменьшит степень непрямого восстановления в шахте. По этой причине можно ожидать, что нагрузки на агломашины снизятся, а в перспективе и высота шахты доменной печи уменьшится [15].

3.4 Экологическая сторона проблемы

Ежегодно в атмосферу выбрасывается около 1 млрд т газообразных отходов, в гидросферу – около 15 млрд т жидких отходов, на землю попадает примерно 85 млрд т твердых отходов. В России накоплено около 125 миллиардов тонн отходов, из-за загрязнения окружающей среды они составляют примерно 11% от общего объёма ВВП страны [16].

В черной металлургии при переработке сырья ежегодно образуется большое количество технологических отходов в виде пылей, шламов, окалины и иных продуктов. В процессе металлургического производства на предприятиях с полным циклом встречается проблема отходов, которые составляют до 10% от общего объема производства первичного железа. Эти отходы богаты на содержание железа, превышающее показатели добываемых руд, а также содержат углерод, оксид кальция и другие полезные компоненты. Однако их переработка сталкивается с трудностями, вызванными традиционными технологиями металлургии. Натрий, калий, цинк, свинец – все это присутствует в отходах и попадает в процесс плавки в доменных печах, что отрицательно сказывается на экономических показателях и ускоряет износ облицовки. Отходы обладают высокой влажностью и дисперсностью, а также необычным составом элементов, что делает их утилизацию сложной без предварительной обработки [17, 18].

Содержание цинка более 0,3-0,5 мешает их использованию в доменной плавке. В шламах газоочистки конвертерных цехов уже сейчас содержится более 1,0% цинка, а в пыли электросталеплавильных цехов его содержание может достигать 20-35%. В мире проблема цинкосодержащих отходов решается двумя способами: утилизацией и захоронением в отвалах и шламонакопителях [19, 20].

Из всех отходов производства стали пыль и шламы представляют наибольшую опасность для окружающей среды. Эти материалы имеют мелкодисперсный характер, превышающий 80% частиц размером менее одного микрона. Они легко растворяются в воде и могут быть вынесены

в атмосферу, загрязняя почву. Кроме того, отходы газоочистки сталеплавильных цехов содержат высокие концентрации токсичных и хорошо растворимых в воде цианидов, радонидов и других опасных веществ [19, 20].

В ряде работ тем или иным способом рассматриваются способы утилизации отходов работы металлургических комбинатов: восстановление без доступа к кислороду в трубчатой печи предварительно высушенных шламов и пылей с получением железосодержащего продукта и цинкового концентрата [21], окускование и использование в виде шлакообразующего в сталеплавильном производстве [19, 20], или в качестве брикетов [22], утилизация дисперсных отходов литейного производства с помощью вдувания в горн доменной печи и создания металлизированных форм [23], вдувание в горн вагранки высокоосновных и железосодержащих отходов [24], смешивание железосодержащей фазы с восстановителем и шлакообразующим с получением чугуна в восстановительной печи [25].

Существуют много проблем и недостатков у последнего метода, которые до сих пор не были решены: трудности в утилизации тепла отходящих сильно запыленных газов в сочетании с высокой энергоемкостью, выделение вредных веществ в процессе высокотемпературной обработки (что негативно сказывается на экологии), а также значительные капитальные вложения. Кроме того, процессы пока не вышли за рамки экспериментов и требуют создания сложного оборудования. Однако возможность утилизации значительной части дисперсных железорудных материалов без их предварительной обработки может привести к снижению затрат на эти процессы [26, 27].

Утилизация значительной доли дисперсных железорудных материалов без их предварительного окускования дает возможность снизить затраты на эти процессы. Предварительное нагревание ПУТ приведет к повышению температуры в горне, которое будет необходимо из-за вдувания пылевидного сырья, которое из-за восстановительных процессов и нагревания будет

забирать некоторую часть тепла. По этой же причине целесообразно увеличить концентрацию кислорода в дутье.

В таблице 9 представлен химический состав тонкодисперсных материалов, которые могут быть использованы в качестве добавки при вдувании через фурменные приборы в условиях НТМК.

Таблица 9 – Химический состав тонкодисперсных материалов

Сырье	Fe	V ₂ O ₅	Mn	S	MgO	CaO	Zn	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Аспирационная пыль, %	59,0	0,46	0,25	0,219	1,48	3,64	0,2	1,27	1,525	2,24
Колошниковая пыль, %	44,6	0,54	0,35	0,160	3,73	5,92	0,3	2,35	3,62	5,79
Шламы КЦ, %	66,9	0,31	0,38	0,037	2,08	3,23	-	-	0,957	1,01

Помимо представленного химического состава имеются следы никеля, хрома, меди, свинца и щелочей. Основность пылей равна 1,60 для аспирационной пыли, 1,03 для колошниковой пыли, основность шламов КЦ 3,25. Также содержание химических элементов достаточно сильно варьируются: Fe – 52,7-68,4%, V₂O₅ – 0,410-0,580%, Mn – 0,18-0,47%, MgO – 0,43-2,67%, Zn – 0,06-0,38% для аспирационной пыли, Fe – 40,58-50,38%, V₂O₅ – 0,400-0,690%, Mn – 0,15-0,53%, MgO – 1,72-4,61%, Zn – 0,02-0,38% для колошниковой пыли. Для шламов КЦ Fe – 64,7-70,8%, V₂O₅ – 0,230-0,420%, Mn – 0,28-0,48%, MgO – 1,68-2,60%. Помимо прочего шламы необходимо измельчать, так как они имеют структуру комков пыли. Эти обстоятельства дополнительно усложняют использовать пыли в качестве сырья для плавки в доменной печи, поэтому требуется специальное усреднение хим. состава. Также из минусов использования – это наличие повышенного содержания серы и фосфора, присутствие цинка и титана, которые являются вредными примесями для работы печи.

3.5 Вдувание нагретого ПУТ с оксидами железа

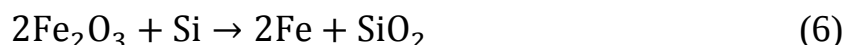
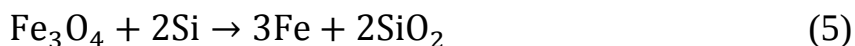
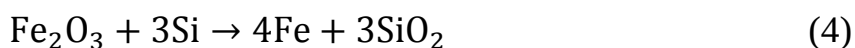
С целью оптимизации работы доменных печей, переход на технологию ПУТ является важной задачей, которая требует поиска способов увеличения ее эффективности. Один из потенциальных резервов - предварительный

нагрев твердого топлива и использование пылевидных оксидов железа (FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3) в процессе вдувания с ПУТ. [28-30].

Однако известные методы вдувания окисленных железорудных материалов имеют недостаток: из-за их большой поверхности они быстро прогреваются, плавятся в циркуляционной зоне и активно реагируют с углеродом кокса по реакциям:



Так как реакции (1)–(3) идут со значительным поглощением тепла, то это приведет к значительному понижению температуры в зоне циркуляции, для сохранения которой потребуются повышение прихода тепловой энергии. Также не исключено ход реакций окисления кремния:



Реакции (4)–(6) могут привести к понижению содержания кремния в чугуне и, соответственно, повышению в шлаке [31].

Для нагрева в печи требуется значительное количество энергии из-за вдувания в горн холодных топливных добавок и железосодержащей пыли. Путем внесения дополнительного физического тепла в печь, увеличения полноты сгорания и уменьшения внешних тепловых потерь, достигается экономический эффект от вдувания нагретой топливной добавки в ДП [32-34].

С учетом внешних тепловых потерь в системе охлаждения, можно оценить изменения в тепловой работе ДП и ее технико-экономические

показатели при вдувании предварительно нагретого ПУТ и пылевидных оксидов железа с помощью балансового зонального теплоэнергетического метода расчета доменной плавки И. Д. Семикина [32, 33]

В ходе модернизации доменного цеха была учтена возможность подогрева ПУТ и вдувания пылевидных оксидов железа. Для расчета выбран период работы ДП объемом 1513 м^3 , где максимальные показатели расхода вдуваемого ПУТ и производства продукции сочетаются с минимальным расходом кокса [35].

Условия работы ДП включают расход дутья около $\sim 3000 \text{ нм}^3/\text{мин}$, концентрацию кислорода (O_2) в дутье 23-24%, температуру дутья в диапазоне $\sim 1100\text{-}1150$ градусов Цельсия, расход ПУТ примерно $\sim 19\text{-}24$ тонн в час, расход пара на увлажнение дутья от 0,1 до 0,5 тонн в час, рудную нагрузку на кокс в пределах 4,3-4,9 тонн на тонну, содержание железа в шихте около $\sim 55\text{-}56\%$, и тепловые потери в системе охлаждения порядка $\sim 10\text{-}15 \text{ МВт}$. С использованием материального баланса по системе учета В. П. Ижевского определялся прогнозный выход шлака для различных величин расхода вдуваемого оксида железа при составлении теплоэнергетического баланса [30, 36].

Аналитические исследования влияния на показатели тепловой работы ДП вдувания в горн предварительно нагретого до 400°C ПУТ проведены для двух вариантов:

- при нагреве и одинаковом расходе ПУТ при прочих равных условиях,
- при нагреве ПУТ и поддержании постоянной температуры фурменной зоны за счет увеличения расхода ПУТ,

Результаты расчета показали, что при постоянном расходе ПУТ его предварительный подогрев на каждые 100°C перед подачей в горн позволит сократить расходы кокса на 0,8 кг/т чугуна ($\sim 0,2\%$) и условного топлива на 1,5 кг/т чугуна ($\sim 0,3\%$), при этом производительность печи повысится на 0,8%.

Для достижения сокращения потребления кокса и условного топлива, а также повышения эффективности работы печи при вдувании предварительно нагретого ПУТ, применяются следующие методы:

- повышение степени прямого восстановления на 0,5% благодаря добавлению дополнительного количества теплоты и увеличению усвоенной тепловой мощности,
- увеличение КИТ топлива в технологических зонах печи на 0,3-0,4% путем добавления дополнительного количества физической теплоты, что приводит к повышению среднего коэффициента использования теплоты,
- увеличение усвоенной тепловой мощности на 1-2 МВт в технологических зонах печи за счет роста КИТ.

Путем внедрения процесса нагрева ПУТ в горн ДП, можно увеличить приток тепла в технологические зоны печи, что способствует развитию процессов прямого восстановления. Повышенная усвоенная тепловая мощность способствует росту производительности печи за счет увеличения количества чугуна, производимого из железа, восстановленного твердым углеродом и оксидом углерода, выделившимся в процессе прямого восстановления.

Увеличение температуры фурменной зоны достигается через вдувание предварительно нагретого пылеугольного топлива в горн, что приводит к повышению температуры на 15°C при каждом подъеме температуры ПУТ на 100°C. Для поддержания стабильной температуры фурменной зоны рекомендуется увеличивать расход ПУТ при его подогреве.

Расчет вдувания в горн предварительно нагретого ПУТ при поддержании температуры фурменной зоны на постоянном уровне показал, что на каждые 100°C увеличения температуры ПУТ производительность печи повышается на 0,3%, при этом уменьшаются расход кокса (на 11 кг/т чуг., или на 3%) и степень прямого восстановления (на 0,2%).

При вдувании в горн предварительно нагретого ПУТ и поддержании температуры фурменной зоны на постоянном уровне, производительность печи увеличивается менее интенсивно, а экономия кокса достигается в большей степени, чем при только подогреве ПУТ. Слабый рост производительности печи объясняется вдуванием дополнительного количества ПУТ, что в свою очередь уменьшает средний КИТ и мощность, усвоенную в разных зонах печи. Дополнительное вдувание ПУТ позволяет увеличить количество водорода и долю производительности, получаемую косвенным путем, а также сэкономить больше кокса.

На металлургических предприятиях в настоящее время наблюдается приближение расхода ПУТ к 200 кг/т чугуна. Увеличение этого показателя приводит к ухудшению газопроницаемости слоев шихты в сухой зоне, что отрицательно сказывается на развитии теплообменных и восстановительных процессов из-за увеличения рудной нагрузки на кокс в ДП [28-30, 37].

Исследования показывают [35, 38], что вдувание железорудного сырья в горн ДП может выровнять соотношение коксовых и железорудных слоев, что в свою очередь увеличит газопроницаемость столба шихты за счет снижения содержания мелочи. Путем уменьшения расходов металлургического комбината можно добиться оптимизации процесса утилизации мелкодисперсных железорудных материалов без необходимости предварительного окучивания. Известны попытки реализации технологии совместного вдувания ПУТ и пылеобразных железосодержащих материалов во Франции и Японии с целью уменьшения содержания кремния в чугуне [39].

Исследование воздействия введения пылевидных оксидов железа на показатели энергетической эффективности ДП проведено с использованием расчетов теплоэнергетики при добавлении их в горн в объеме до 250 кг/т чугуна в различных вариациях. Эксперименты включали:

- в процессе замещения части аглошихты, поступающей через колошник, пылевидными FeO , вводимыми через фурмы, и при сохранении постоянных значений температуры в зоне печи и расхода кокса, добавляем дополнительный технологический кислород и ПУТ,

- инъекцию оксидов FeO , Fe_3O_4 и Fe_2O_3 по отдельности с поддержанием стабильной температуры фурмы за счет введения дополнительного технологического кислорода,

- добавление FeO с поддержанием постоянного уровня температуры фурмы, расхода кокса и рудной загрузки путем введения дополнительного технологического кислорода и ПУТ.

Увеличение концентрации кислорода в дутье является целесообразным для поддержания постоянного уровня температуры в зоне печи, поскольку введение пылевидных оксидов железа приводит к снижению температуры в этой зоне.

Расчеты показали, что вдувание FeO , Fe_3O_4 и Fe_2O_3 в горн ДП благоприятно влияет на показатели тепловой и газодинамической работы печи, открывая новые возможности для совершенствования технологии доменной плавки. Например, при постоянном расходе ПУТ, равном 23,5 т/час, и поддержании температуры фурменной зоны на одном уровне за счет увеличения концентрации кислорода в дутье вдувание оксидов железа позволит:

- увеличить производительность печи при вдувании FeO на 3%, Fe_3O_4 – на 2-2,5%, Fe_2O_3 – на 2%,

- уменьшить рудную нагрузку в «сухой» зоне печи при вдувании FeO на 2,4%, Fe_3O_4 – на 1,8%, Fe_2O_3 – на 1,4%,

- повысить газопроницаемость «сухой» зоны печи (за счет уменьшения рудной нагрузки на кокс),

- понизить степень прямого восстановления на 1% (за счет уменьшения количества невосстановленного железа),

– увеличить выход колошникового газа на 1% (за счет увеличения выхода CO и H_2), теплоту сгорания сухого колошникового газа на 1-3% и выход ВЭР – на 1-5% (см. рисунок 5, 6 и 7).

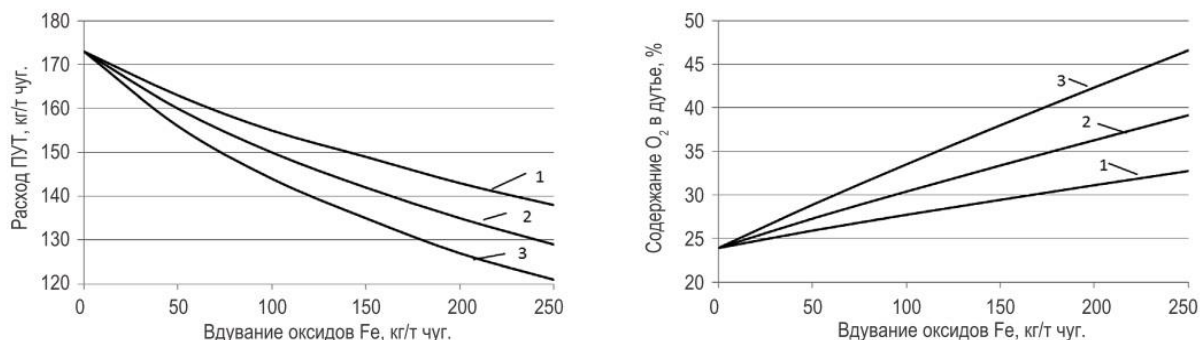
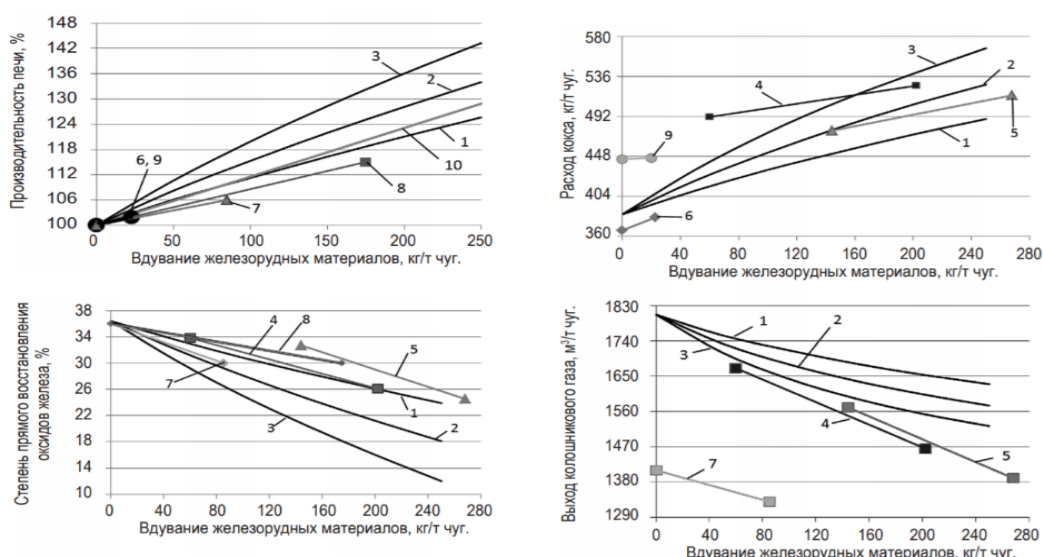


Рисунок – 5. Зависимости удельного расхода ПУТ и содержания кислорода в дутье от расхода оксидов железа (1 – FeO , 2 – Fe_3O_4 , 3 – Fe_2O_3) при поддержании температуры фурменной зоны на постоянном уровне [40]

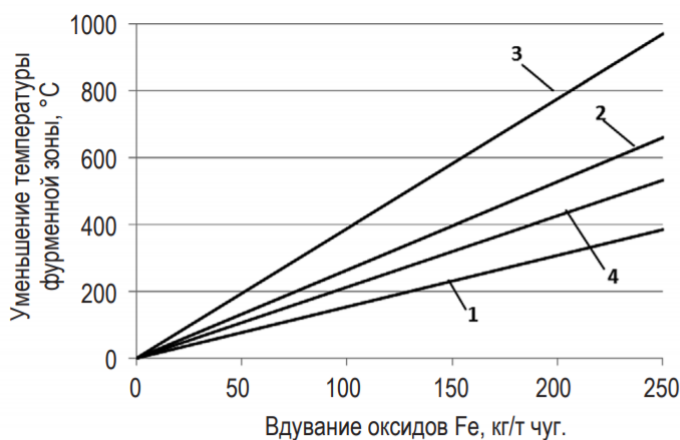


1-3 – по теплоэнергетической модели (1 – FeO , 2 – Fe_3O_4 , 3 – Fe_2O_3),
 4-5, 10 – по результатам моделирования японских исследователей [39] (4 – $T_{\text{дуть}} = 1100^\circ\text{C}$,
 5 – $T_{\text{дуть}} = 1350^\circ\text{C}$), 6 – практика работы ДП № 2 в Дюнкерке (Франция) [38],
 7, 8 – по результатам моделирования Жана Мишара и Мишеля Шнайдера [39]
 (7 – вдувание руды, 8 – вдувание металлизированной руды), 9 – практика работы
 ДП № 1 в Солмере (Франция) при вдувании водородной пульпы, содержащей
 85% измельченной руды [40]

Рисунок – 6. Влияние вдувания железорудных материалов на производительность печи, расход кокса, степень прямого восстановления и выход сухого колошникового газа:

Вдувание пылевидных оксидов железа в доменную печь при поддержании температуры фурменной зоны на постоянном уровне за счет вдувания дополнительного технологического кислорода приводит

к увеличению расхода кокса, для компенсации которого предлагается вдувать дополнительное количество ПУТ.



1-3 – по теплоэнергетической модели (1 – FeO , 2 – Fe_3O_4 , 3 – Fe_2O_3),
4 – по экспериментальным исследованиям Г. В. Гуденау [37]

Рисунок – 7. Влияние вдувания железорудных материалов на температуру фурменной зоны

Вдувание дисперсной руды в доменную печь через фурмы была изучена много лет назад, но из-за возникшей в то время озабоченности по поводу износа транспортирующих и нагнетательных каналов этот процесс не стал популярным. Однако, благодаря прогрессу в технологии материалов, таких как керамика, в наши дни проблему износа можно решить гораздо проще. Теперь, когда ожидается, что истощение запасов железной руды в скором времени станет серьезной проблемой, вдувание дисперсной руды является важной технологией для поддержки работы доменной печи в будущем [41, 42].

Вдувание дисперсной железной руды в доменную печь с помощью фурмы, которая составляет основу комбинированной технологии продувки фурмы, является важной начальной технологией для будущей доменной печи. Это быстро действующая мера, позволяющая значительно повысить гибкость производства доменной печи, особенно для изменения производительности при сохранении структуры насадки в шахте печи практически неизменной. Поскольку вдувание дисперсной руды уменьшает

загрузку агломерата с верхней части печи, это дает возможность увеличить использование некачественных марок руды.

Данные о работе доменной печи при инъекции дисперсной руды в фурму были оценены для изучения максимального количества инжектируемой дисперсной руды с использованием специального испытательного устройства горячей модели и для получения следующих результатов:

При условии поддержания соответствующего баланса тепла и материалов в передней части фурмы и во всей печи максимальное количество закачиваемой руды было рассчитано следующим образом: 144 кг/т при повышении температуры дутья с нынешних 1100 до 1350°C, максимально достижимого при текущем состоянии оборудования, и влажность дутья уменьшилась примерно на 20 г/нм³, и примерно на 268 кг/т, когда кислород обогащен на 9,1% (100 нм³/т) в дополнение к вышеуказанному. В случае, когда измельченный уголь закачивается вместе с дисперсной рудой, максимальное количество закачки дисперсной руды составляет приблизительно 184 и 100 кг/т при 100 и 200 кг/т ПУТ соответственно.

Внедрение предварительного нагрева и совместной подачи различных материалов, таких как окисленное железо, глубокообогащенные концентраты и колошниковая пыль, в горн доменной печи является перспективным шагом в улучшении технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ.

С использованием модернизированного теплоэнергетического метода расчета доменной плавки И. Д. Семикина дано технико-экономическое обоснование целесообразности предварительного подогрева ПУТ перед его подачей в доменную печь и вдувания в горн пылевидных оксидов железа FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃, уточнены закономерности и выполнена количественная оценка влияния этих мероприятий на показатели тепловой работы печи.

В результате исследования было выявлено, что внедрение новой технологии в процесс плавки металла с использованием предварительно

нагретого ПУТ при постоянной температуре в печи приводит к увеличению производительности на 0,3% при каждом повышении температуры на 100°C, а также снижению расхода кокса на 2,8%.

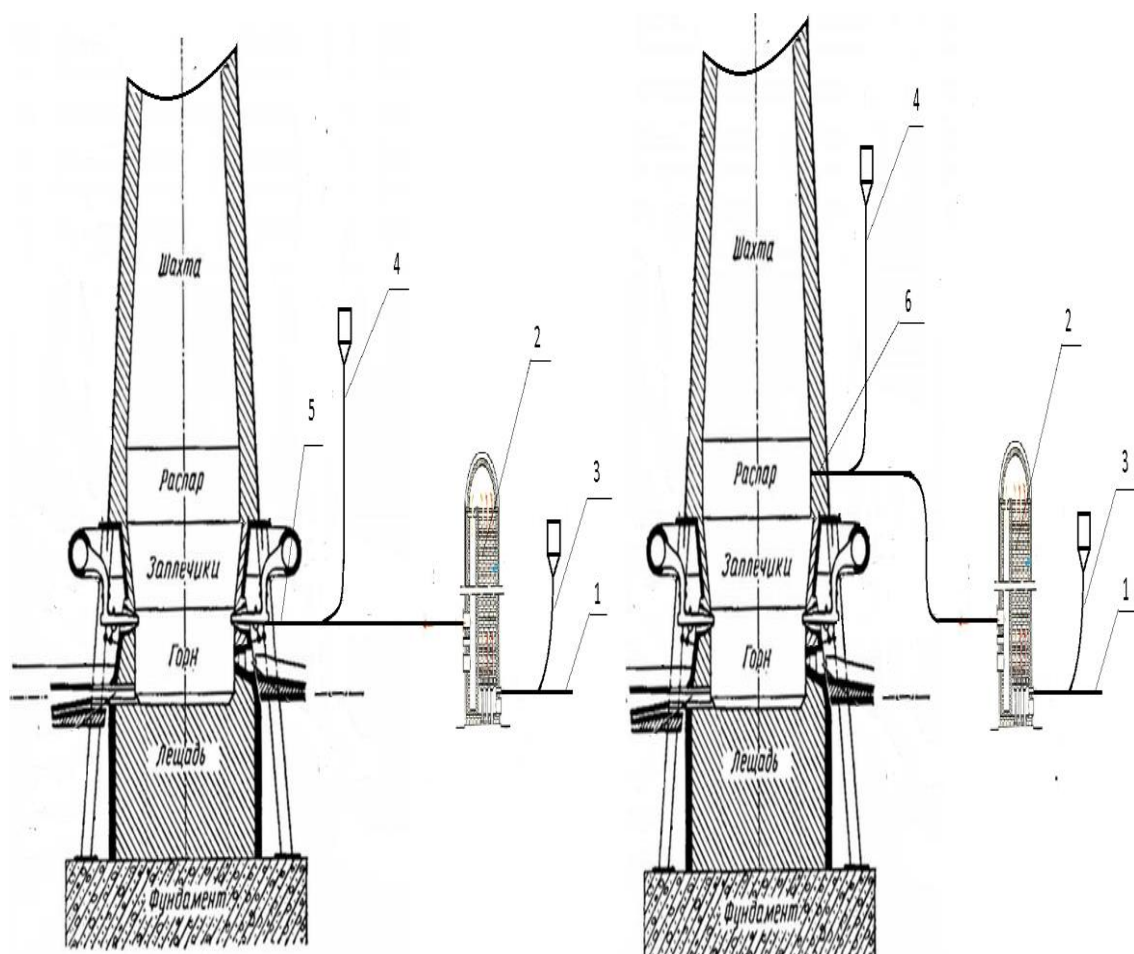
Также было показано, что добавление пылевидных оксидов железа FeO и технологического кислорода при неизменных показателях расхода кокса и рудной нагрузки позволяет увеличить производительность печи на 2,6% за каждый дополнительный процент O₂ в дутье. При этом сохраняются оптимальные условия для рудной нагрузки, газопроницаемости сухой зоны печи, а также уменьшается количество невосстановленного железа и повышается выход колошникового газа и ВЭР. Повышение газопроницаемости сухой зоны печи и снижение рудной нагрузки на кокс являются одними из преимуществ работы печи при использовании вдуваемых пылевидных железорудных материалов вместо части загружаемой шихты.

Отмечено, что одним из преимуществ работы печи при замещении доли загружаемой шихты вдуваемыми пылевидными железорудными материалами является снижение рудной нагрузки на кокс в «сухой» зоне печи и повышение газопроницаемости этой зоны.

Одним из вариантов исполнения данной технологии является продувка через уменьшенную версию воздухонагревателя, в котором сжигается доменный газ. Огнеупоры, используемые для воздухонагревателя должны иметь высокую абразивную стойкость, но при этом могут иметь меньшую огнеупорность за счет пониженной температуры нагрева регенаратора.

Транспортировка ПУТ и железосодержащей пыли в общем транспортном трубопроводе производится с концентрацией 35-40 кг на 1 кг азота и скоростью в начале трубопровода 5-7 м/с. Поскольку смесь экстремально абразивна, для поддержания минимальных скоростей транспортирования диаметр трубопровода ступенчато увеличивается по мере удаления от резервуаров по мере снижения давления и уменьшения

плотности газовой части потока. Таким образом, можно транспортировать подогретый ПУТ и железосодержащую пыль. (см. рисунки 8 и 9).



1 – первый способ вдувания железосодержащей пыли, 2 – подвод компрессорный воздух,
 3 – печь для нагрева смеси, 4 – второй способ вдувания железосодержащей пыли,
 5 – подаваемая смесь через фурмы, 6 – подаваемая смесь в распар,
 Рисунок – 8. Примеры работы доменной печи с вдуванием дисперсной пыли через распар
 или фурмы

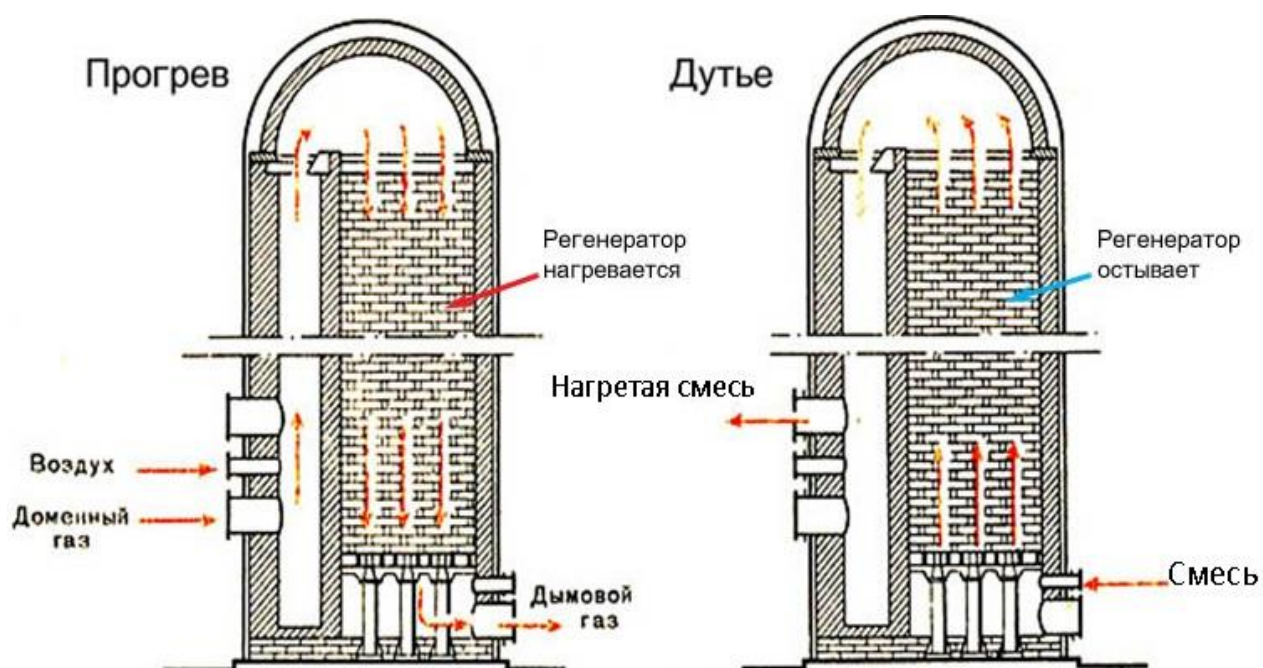


Рисунок – 9. Воздухонагреватель для нагрева смеси азота, ПУТ и железосодержащей пыли

Имеется несколько способов вдувания смеси в доменную печь: в распаром, в фурменной зоне или через фурмы [43, 44]. Вдувание смеси через фурмы является более приоритетным вариантом, так как в таком случае появляется возможность более полного усвоения вдуваемых материалов и гибкого управления процессами печи. Также принято решение смешивать ПУТ и железосодержащую пыль до воздухонагревателя для нагрева всех компонентом и большему приходу тепла. В качестве источника железа выбрана аспирационная пыль. Поэтому дальнейшие вычисления будут производиться именно в таких условиях.

4 ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВДУВАНИИ НАГРЕТОГО ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДИСПЕРСНЫМ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИМ СЫРЬЕМ

При совместном вдувании ПУТ и железосодержащей пыли их количество должно быть примерно равным для более полного взаимодействия и влияния вносимого тепла от нагрева, но не крупным для обеспечения работоспособности оборудования. В качестве пыли принята аспирационная пыль, так как ее не нужно измельчать как шламы, и она имеет более подходящий химический состав. Количество железофлюса будет уменьшено 1 к 1 по отношению к приходу аспирационной пыли. Содержание кислорода увеличено для более полного сжигания и взаимодействия топлива. В таблице 10 представлены проектные параметры доменной плавки.

Таблица 10 – Технологические параметры плавки

Параметры	Базовые	Проектные
Удельный расход агломерата КГОК, кг/т. чугуна	593	593
Удельный расход окатышей КГОК, кг/т. чугуна	849	849
Удельный расход железофлюса, кг/т. чугуна	206	106
Удельный расход аспирационной пыли, кг/т. чугуна	0	100
Удельный расход кокса, кг/т. чугуна	334	334
Удельный расход природного газа, м ³ /т. чугуна	115	115
Удельный расход ПУТ, кг/т. чугуна	72	100
Температура ПУТ и железосодержащей пыли, °С	25	400
Содержание кислорода в дутье, %	32	34
Удельный расход металлодобавок, кг/т. чугуна	30	30

4.1 Изменение химического состава чугуна и шлака

Расчет прихода химических элементов позволит предсказать состав чугуна и шлака, а также изменение технических показателей печи. В таблицах 11-20 рассчитаны базовые балансы и проектные прихода химических элементов из шихты.

Таблица 11 – Расчет базового баланса железа

Компонент шихты	Fe, %	Расход компонента		Приход Fe	
		кг	%	кг	%
Агломерат	55,5	593	35,34	329,12	33,57
Окатыши	61	849	50,60	517,89	53,34
Железофлюс	52,5	206	12,28	108,15	11,14
Металлодобавки	52,3	30	1,79	15,69	1,62
Итого	57,86	1678	100,00	970,8	100

Таблица 12 – Расчет проектного баланса железа

Компонент шихты	Fe, %	Расход компонента		Приход Fe	
		кг	%	кг	%
Агломерат	55,5	593	35,34	329,12	33,68
Окатыши	61	849	50,60	517,89	52,99
Железофлюс	52,5	106	6,32	55,65	5,69
Металлодобавки	52,3	30	1,79	15,69	1,61
Аспирационная пыль	58,98	100	5,96	58,98	6,03
Итого	58,24	1678	100,00	977,3	100

Таблица 13 – Расчет базового баланса ванадия и КИВ

Коэффициент перевода V из V ₂ O ₅	0,56		
Компонент шихты	Расход, кг/т	Содержание V ₂ O ₅ , %	Приход V, кг
Агломерат КГОК	593	0,555	1,843
Окатыши КГОК	849	0,580	2,758
Железофлюс	206	0,775	0,894
Металлодобавки	30	0,945	0,159
Итого	1678		5,653
КИВ, %	91,980		
[V] в чугуна, %	0,520	(V ₂ O ₅) в шлаке, %	0,30
Перешло V в чугун, кг/т	5,20	V ₂ O ₅ в шлаке, кг/т	0,939

Таблица 14 – Расчет проектного баланса ванадия

Коэффициент перевода V из V ₂ O ₅	0,56		
Компонент шихты	Расход, кг/т	Содержание V ₂ O ₅ , %	Приход V, кг
Агломерат КГОК	593	0,555	1,843
Окатыши КГОК	849	0,58	2,758
Железофлюс	106	0,775	0,460
Металлодобавки	30	0,945	0,159
Аспирационная пыль	100	0,461	0,258
Итого	1678		5,478
КИВ, %	91,980		
[V] в чугуна, %	0,504	(V ₂ O ₅) в шлаке, %	0,29
Перешло V в чугун, кг/т	5,04	V ₂ O ₅ в шлаке, кг/т	0,910

Таблица 15 – Расчет базового баланса серы

Компонент шихты	S, %	Расход компонента		Приход S	
		кг	%	кг	%
Агломерат	0,014	593	28,50	0,083	3,33
Окатыши	0,001	849	40,80	0,008	0,34
Железофлюс	0,030	206	9,90	0,062	2,48
Металлодобавки	0,120	30	1,44	0,036	1,44
Кокс	0,62	334	15,91	2,052	82,30
ПУТ	0,35	72	1,18	0,252	10,11
Итого		2084	100	2,494	100
Приход серы кг/т чугуна	2,494				
[S] в чугуне, %	0,024	(S) в шлаке, %	0,49		
Перешло S в чугун, кг	0,24	S в шлаке, кг	1,53		
% от прихода	9,62				

Таблица 16 – Расчет проектного баланса серы

Компонент шихты	S, %	Расход компонента		Приход S	
		кг	%	кг	%
Агломерат	0,014	593	28,12	0,083	2,99
Окатыши	0,001	849	40,26	0,008	0,31
Железофлюс	0,030	106	5,03	0,032	1,14
Металлодобавки	0,120	30	1,42	0,036	1,30
Аспирационная пыль	0,219	100	4,74	0,219	7,88
Кокс	0,62	334	15,70	2,052	73,81
ПУТ	0,35	100	4,742	0,35	12,59
Итого		2112	100	2,781	100
Приход серы кг/т чугуна	2,781				
[S] в чугуне, %	0,027	(S) в шлаке, %	0,54		
Перешло S в чугун, кг	0,27	S в шлаке, кг	1,71		
% от прихода	9,62				

Таблица 17 – Расчет базового баланса марганца

Компонент шихты	Mn, %	Расход компонента		Приход Mn	
		кг	%	кг	%
Агломерат	0,200	593	35,34	1,186	25,92
Окатыши	0,171	849	50,60	1,452	31,72
Железофлюс	0,420	206	12,28	0,979	21,38
Металлодобавки	3,2	30	1,79	0,960	20,97
Итого		1678	100	4,58	100
Приход марганца кг/т, чуг	4,576				
[Mn] в чугуне, %	0,31	(MnO) в шлаке, %	0,49		
Перешло Mn в чугун, кг	3,1	MnO в шлаке, кг	1,53		
% от перехода	67,74				

Таблица 18 – Расчет проектного баланса марганца

Компонент шихты	Mn, %	Расход компонента		Приход Mn	
		кг	%	кг	%
Агломерат	0,200	593	35,34	1,186	27,26
Окатыши	0,171	849	50,60	1,452	33,36
Железофлюс	0,475	106	6,32	0,504	11,57
Металлодобавки	3,2	30	1,79	0,96	22,06
Аспирационная пыль	0,25	100	5,96	0,25	5,75
Итого		1785	100	4,35	100
Приход марганца кг/т, чугу	4,35				
[Mn] в чугу, %	0,295	(MnO) в шлаке, %	0,46		
Перешло Mn в чугун кг	2,95	MnO в шлаке, кг	1,44		
% от перехода	67,74				

Таблица 19 – Расчет базового баланса кремния

Компонент шихты	SiO ₂ , %	Расход компонента		Приход SiO ₂	
		кг	%	кг	%
Агломерат	4,05	593	28,50	24,02	27,85
Окатыши	4,1	849	40,80	34,81	40,36
Железофлюс	4,8	206	9,90	9,89	11,46
Металлодобавки	10,5	30	1,44	3,15	3,65
ПУТ	3,2	72	3,46	2,30	2,67
Кокс	3,65	334	15,91	12,08	14,01
Итого		2084	100	86,2	100
Приход оксида кг/т, чугу	84,8				
[Si] в чугуне, %	0,08	(SiO ₂) в шлаке, %	27		
Перешло Si в чугун, кг	0,8	SiO ₂ в шлаке, кг	84,51		

Таблица 20 – Расчет проектного баланса кремния

Компонент шихты	SiO ₂ , %	Расход компонента		Приход SiO ₂	
		кг	%	кг	%
Агломерат	4,05	593	28,12	24,02	28,39
Окатыши	4,1	849	40,26	34,81	41,02
Железофлюс	4,8	106	5,03	5,09	6,02
Металлодобавки	10,5	30	1,42	3,15	3,72
Аспирационная пыль	2,24	100	4,74	2,24	2,65
ПУТ	3,2	100	4,74	3,2	3,78
Кокс	3,65	334	15,69	12,08	14,28
Итого		2112	100	84,6	100
Приход оксида кг/т, чугу	84,6				
[Si] в чугуне, %	0,078	(SiO ₂) в шлаке, %	26,5		
Перешло Si в чугу, кг	0,78	SiO ₂ в шлаке, кг	82,88		

Состав чугуна определяется согласно требованиям ТИ 102-Д-132-2021 [45]. Для передела ванадиевого чугуна должно содержаться кремния от 0,05 до 0,10%, не более 0,40% марганца, не более 0,030% серы.

Основность шлака составляет в пределах от 1,15 до 1,25. Полная основность шлака $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ устанавливается в пределах 1,70-1,73. В таблице 21 представлены химические составы базовой работы печи и проекта, основность и полная основность составляют 1,216 и 1,725 соответственно.

Таблица 21 – Сравнение базового химического состава шлака и чугуна и проектного

Хим. состав чугуна			Хим. состав шлака		
Хим. элемент	До	После	Хим. состав	До	После
Fe	94,3	94,4	FeO	0,84	0,84
C	4,63	4,63	SiO ₂	26,1	25,5
Si	0,08	0,078	MnO	0,49	0,466
Mn	0,31	0,295	V ₂ O ₅	0,30	0,29
V	0,520	0,504	S	0,49	0,54
S	0,024	0,027	TiO ₂	11,89	12,0
Ti	0,15	0,14	CaO	32,1	31,0
-	-	-	Al ₂ O ₃	15,64	15,12
-	-	-	MgO	13,22	13,00

Как видно по таблице 21 все технические условия и условия по качеству выполняются, однако стоит обратить внимание на увеличение серы и понижению ванадия в чугуне.

4.2 Определение технико-экономических показателей

Расчеты расхода кокса и производительности проведены по ТИ 102-Д-132-2021 [45] по формулам (7)–(8):

$$\Delta\P = \Pi_{\text{б}} \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta_{\text{ф}}} \right) \cdot \frac{\Delta_{\text{п}}}{100} = 38,969 \text{ т/сут}, \quad (7)$$

$$\Delta\text{К} = \left(\frac{\Delta}{\Delta_{\text{ф}}} \right) \cdot (\Delta_{\text{к}}) = -1,642 \text{ кг/т чуг}, \quad (8)$$

где $\Pi_{\text{б}}$ – базовая производительность;

Δ – изменение параметры;

$\Delta_{\text{ф}}$ – фиксированное изменение параметра;

$\Delta_{\text{п}}$ – влияние изменения параметра на производительность;

$\Delta_{\text{к}}$ – влияние изменения параметра на кокс.

Влияние изменения содержания Fe в шихте:

$$Fe_{исх} = \frac{55,5 \cdot 593 + 61 \cdot 849 + 52,5 \cdot 206 + 52,3 \cdot 30}{1678} \cdot 100\% = 57,86\%$$

$$Fe_{изм} = \frac{55,5 \cdot 593 + 61 \cdot 849 + 52,5 \cdot 106 + 58,98 \cdot 100 + 52,3 \cdot 30}{1678} \times \\ \times 100\% = 58,24$$

$$\Delta Fe = 58,24 - 57,86 = 0,38\%$$

$$\Delta P_{Fe} = 7325 \cdot \left(\frac{0,38}{1}\right) \cdot \frac{1,4}{100} = 38,969 \text{ т/сут}$$

$$\Delta K_{Fe} = \left(\frac{0,38}{1}\right) \cdot (-4,32) = -1,642 \text{ кг/т чугу}$$

Влияние изменения удельного расхода ПУТ рассчитывается по формуле (9):

$$K_{ПУТ} = \Delta ПУТ \cdot КЗК = -24,024 \text{ кг/т чугу} \quad (9)$$

где КЗК – коэффициент замены кокса.

КЗК рассчитывается по формуле (10):

$$КЗК = \frac{C_{ПУТ}}{C_K}, \quad (10)$$

где $C_{ПУТ}$ – углерод ПУТ;

C_K – углерод кокса.

$$КЗК = \frac{73,75}{85,93} = 0,858$$

$$ПУТ_{исх} = 72 \text{ кг/т. чугу}$$

$$ПУТ_{проект} = 100 \text{ кг/т. чугу}$$

$$\Delta ПУТ = 100 - 72 = 28 \text{ кг/т чугу}$$

$$K_{ПУТ} = 28 \cdot (-0,858) = -24,024 \text{ кг/т чугу}$$

Влияние изменения содержания серы в чугуне:

$$[S]_{исх} = 0,024\%$$

$$[S]_{\text{проект}} = 0,027\%$$

$$\Delta[S] = 0,027 - 0,024 = 0,003\%$$

$$П[S] = 7325 \cdot \frac{0,003}{(-0,001)} \cdot \frac{(-0,16)}{100} = 3,516 \text{ т/сут}$$

$$К[S] = \frac{0,003}{(-0,001)} \cdot 0,5 = -1,500 \text{ кг/т чугу}$$

Влияние изменения содержания марганца в чугуне:

$$[Mn]_{\text{исх}} = 0,31\%$$

$$[Mn]_{\text{проект}} = 0,29\%$$

$$\Delta[Mn] = 0,29 - 0,31 = -0,02\%$$

$$П[Mn] = 7325 \cdot \frac{-0,02}{(-0,1)} \cdot \frac{(0,1)}{100} = 1,465 \text{ т/сут}$$

$$К[Mn] = \frac{-0,02}{(-0,1)} \cdot -0,35 = -0,070 \text{ кг/т чугу}$$

Изменение производительности и расхода кокса:

$$П_{\text{изм}} = 38,696 + 3,516 + 1,465 = 43,677 \text{ т/сут}$$

$$К_{\text{изм}} = -1,642 - 24,024 - 1,5 - 0,070 = -27,236 \text{ кг/т чугу}$$

$$П_{\text{проект}} = 7325 + 43,677 = 7369 \text{ т/сут}$$

$$К_{\text{проект}} = 334 - 27,236 = 307 \text{ кг/т чугу}$$

Определение удельного расхода эквивалентного кокса формуле (11):

$$K_э = K_c + ПГ \cdot 0,74 + ПУТ \cdot КЗК, \quad (11)$$

где $ПГ$ – расход природного газа.

$$K_{\text{эбаз}} = 334 + 115 \cdot 0,74 + 72 \cdot 0,858 = 480,876 \text{ кг/т}$$

$$K_{\text{эпроект}} = 307 + 115 \cdot 0,74 + 100 \cdot 0,858 = 477,900 \text{ кг/т}$$

Определение удельного расхода суммарного углерода по формуле (12):

$$C_{\Sigma} = C_K + C_{ПГ} + C_{ПУТ}, \quad (12)$$

где $C_{ПГ}$ – углерод в природном газе.

$$C_{\Sigma \text{баз}} = \frac{85,932 \cdot 334}{100} + 115 \cdot 0,536 + \frac{73,75 \cdot 72}{100} = 401,753 \text{ кг/т}$$

$$C_{\Sigma \text{проект}} = \frac{85,932 \cdot 307}{100} + 115 \cdot 0,536 + \frac{73,75 \cdot 100}{100} = 399,201 \text{ кг/т}$$

Определение теоретической температуры горения (13):

$$\text{ТТГ} = 49 \cdot O_2 + 0,68 \cdot t_D - 53 \cdot \left(\frac{Q_{\text{ПГ}} \cdot 100}{Q_D} \right) - 5,1 \cdot W - 9,01 \cdot Q_{\text{ПУТ}} + 524, \quad (13)$$

где O_2 – содержание кислорода в дутье, %;

t_D – температура дутья;

$Q_{\text{ПГ}}$ – расход природного газа в минуту;

$Q_{\text{ПУТ}}$ – расход ПУТ в час;

Q_D – расход дутья в минуту;

W – влажность дутья;

$Q_{\text{ПУТ}}$ – расход ПУТ.

$$Q_{\text{ПГбаз}} = \frac{115 \cdot 7325}{60 \cdot 24} = 584,98 \text{ м}^3/\text{мин}$$

$$Q_{\text{ПГпроект}} = \frac{115 \cdot 7369}{60 \cdot 24} = 588,50 \text{ м}^3/\text{мин}$$

$$Q_{\text{ПУТбаза}} = \frac{72 \cdot 7325}{24 \cdot 1000} = 21,975 \text{ т/ч}$$

$$Q_{\text{ПУТпроект}} = \frac{100 \cdot 7369}{24 \cdot 1000} = 30,704 \text{ т/ч}$$

$$\begin{aligned} \text{ТТГ}_{\text{баз}} &= 49 \cdot 32 + 0,68 \cdot 1210 - 53 \cdot \left(\frac{584,98 \cdot 100}{4386} \right) - 5,1 \cdot 4,14 - 9,01 \times \\ &\times 21,975 + 524 = 1988,80 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ТТГ}_{\text{проект}} &= 49 \cdot 34 + 0,68 \cdot 1210 - 53 \cdot \left(\frac{588,50 \cdot 100}{4386} \right) - 5,1 \cdot 4,14 - 9,01 \times \\ &\times 30,704 + 524 = 2003,91 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

При выплавке ванадиевого чугуна теоретическая температура горения должна быть от 1900°C до 2100°C. Исходя из вычислений это условие выполняется.

Определение удельной производительности печи по формуле (13):

$$P_{уд} = P \cdot V_{пол}, \quad (13)$$

где $V_{пол}$ – полезный объем (для ДП №7 $V_{пол} = 2200 \text{ м}^3$)

$$P_{удбаз} = \frac{7325}{2200} = 3,330 \text{ т/м}^3 \cdot \text{сутки}$$

$$P_{удпроект} = \frac{7369}{2200} = 3,350 \text{ т/м}^3 \cdot \text{сутки}$$

В таблице 22 сведены рассчитанные технические показатели печи. Показатели практически не поменялись, не смотря на введение технологии, что говорит о том, что для работы печи не нужно разрабатывать новую эксплуатационную карту.

Таблица 22 – Сравнение основных показателей плавки

Название показателя	Базовые показатели	Проектные показатели	Разница
Удельный расход эквивалентного кокса, кг/т	480,876	477,900	-2,976
Удельный расход суммарного углерода, кг/т	401,753	399,201	-2,552
Удельный расход ПУТ, т/ч	21,975	30,704	8,729
Удельный расход природного газа, м ³ /мин	584,98	588,50	3,52
Теоретическая температура горения, °C	1988,80	2003,91	15,11
Удельная производительность печи, т/м ³ ·сутки	3,330	3,350	0,020

Технология вдувание подогретого ПУТ с железосодержащей пылью помогает оптимизировать производство, увеличивая производительность на 44 т/сут и понижая расход кокса на 27 кг/т. Однако из отрицательных качеств имеются повышение содержания серы 0,003% и уменьшение содержания ванадия на 0,016% в чугуне.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТА

Экономическая эффективность достигается при вдувании нагретого пылеугольного топлива вместе с дисперсным железосодержащим сырьем достигается благодаря повышению количества железа и уменьшению количества марганца в шихте, а расход кокса уменьшается за счет увеличения использования ПУТ, при этом предварительный нагрев материалов значительно уменьшает негативные эффекты вдувания такого топлива.

Производство чугуна в 2024 г составило 2,600 млн т при номинальном времени работы 355,0 сут/год. Повышение эффективности при использовании данной технологии:

- увеличит производительность в среднем на 0,6 %,
- снизит удельный расход топлива 27 кг/т.

Проектный годовой объем производства чугуна высчитывается по формуле (14):

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{баз}} \cdot K, \quad (14)$$

где $V_{\text{баз}}$ – годовой объем производства чугуна перед внедрением, млн т;
 K – коэффициент изменения производительности.

Тогда годовой объем производства чугуна после внедрения технологии составит:

$$V_{\text{пр}} = 2,600 \cdot 1,006 = 2,616 \text{ млн т}$$

Экономию топлива относим на снижение расхода кокса.

5.1 Расчет условно-годовой экономии

Расчет условно-годовой экономии производится по формуле (15):

$$\text{Э}_{\text{уг}} = \Delta C \cdot V, \quad (15)$$

где ΔC – изменение себестоимости чугуна после внедрения мероприятий,
 V – объем производства после внедрения технологии.

Для вычисления условно-годовой экономии требуется вычислить себестоимость чугуна базового варианта и проектного.

5.1.1 Расчет изменения себестоимости

Существующая себестоимость чугуна представлена в таблице 23.

Таблица 23 – Калькуляция себестоимости 1 т ванадиевого чугуна.

Наименование статей и затрат	Цена, руб.	Кол-во, т/т	Сумма, руб
Сырье (ЖРС)			
Агломерат КГОК	7300	0,593	4329
Окатыши КГОК	8100	0,849	6877
Железофлюс	6350	0,206	1308
Доменный присад	2570	0,03	77
Энергозатраты:			
Кокс скиповый	23500	0,334	7849
Природный газ	5000	0,115	575
ПУТ	9800	0,072	706
Итого	-	-	21721

В расчете проектной себестоимости учтено снижение удельного расхода кокса и железоблуса и увеличение удельного расхода ПУТ и аспирационной пыли, а также повышение производительности. Остальные статьи затрат не изменяются. Расчет ожидаемой проектной себестоимости приведен в таблице 24.

Таблица 24 – Проектная калькуляция себестоимости 1 т ванадиевого чугуна

Наименование статей и затрат	Цена, руб.	Кол-во, т/т	Сумма, руб
Сырье (ЖРС)			
Агломерат КГОК	7300	0,593	4329
Окатыши КГОК	8100	0,849	6877
Железофлюс	6350	0,106	673
Доменный присад	2570	0,03	77
Аспирационная пыль	3175	0,1	318
Энергозатраты:			
Кокс скиповый	23500	0,307	7215
Природный газ	5000	0,115	575
ПУТ	9800	0,100	980
Итого	-	-	21043

В таблице 25 представлена калькуляция себестоимости чугуна базового и проектного варианта с учетом дополнительных расходов.

Таблица 25 – Полная стоимость чугуна с учетом дополнительных расходов

Итого	Базовый	Проектный
Основная з/п производственных рабочих	17,85	17,30
Социальные взносы	6,08	5,89
Общепроизводственные расходы	44,62	43,22
Общехозяйственные расходы	56,91	55,14
Итого производственная с/с	21846	21165
Коммерческие расходы	74,95	72,62
Итого полная с/с	21921	21237

Изменение себестоимости составит:

$$\Delta C = C_{\text{баз}} - C_{\text{пр}} = 21921 - 21237 = 684 \text{ руб}$$

Условно-годовая экономия составит:

$$\text{Э}_{\text{уг}} = 684 \cdot 2,616 = 1789,3 \text{ млн. руб}$$

5.2 Расчет прибыли

Расчет прибыли (П) осуществляется по формуле (16):

$$П = (Ц - C) \cdot V, \quad (16)$$

где Ц – оптовая цена 1 т чугуна, тыс. руб./т (Ц = 26350 руб);

C – себестоимость чугуна, тыс. руб./т.

Прибыль до внедрения технологии составляла:

$$П_{\text{БАЗ}} = (26350 - 21921) \cdot 2,600 = 11515,4 \text{ млн руб/год},$$

Прибыль после внедрения проекта составит:

$$П_{\text{ПР}} = (26350 - 21237) \cdot 2,616 = 13375,6 \text{ млн руб/год}.$$

Прирост прибыли $\Delta П$ составит:

$$\Delta П = П_{\text{ПР}} - П_{\text{БАЗ}} = 13375,6 - 11515,4 = 1860,2 \text{ млн руб/год}.$$

5.3 Расчет показателей фондоотдачи и фондоемкости

Расчет показателя фондоотдачи осуществляется по формуле (17):

$$\Phi_0 = \frac{Ц \cdot М}{O_{\Phi}}, \quad (17)$$

где O_{Φ} – стоимость основных фондов.

Принимаем $O_{\Phi} = 37544$ млн руб. До внедрения технологии фондоотдача составляла:

$$\Phi_0 = \frac{2,600 \cdot 21921}{37544} = 1,518 \text{ руб/руб}$$

После внедрения технологии фондоотдача составляет:

$$\Phi_0 = \frac{2,616 \cdot 21237}{37544} = 1,480 \text{ руб/руб}$$

Расчет показателя фондоемкости осуществляется по формуле (18):

$$\Phi_{\text{ЕМК}} = \frac{1}{\Phi_0} \quad (18)$$

По базовому варианту фондоемкость составляла:

$$\Phi_{\text{ЕМКБАЗ}} = \frac{1}{1,518} = 0,659 \text{ руб/руб}$$

По проектному варианту фондоемкость составит:

$$\Phi_{\text{ЕМКПР}} = \frac{1}{1,480} = 0,676 \text{ руб/руб}$$

5.4 Расчет срока окупаемости проекта

В таблице 26 приведен примерный состав капитальных вложений проекта.

Таблица 26 – Смета капитальных вложений

Наименование	Стоимость, руб
Технологическое оборудование	
Воздухонагреватель для нагрева смеси	414 604 000
Фурменные приборы с повышенной абразивной стойкостью	435 866 000
Воздухопроводы для смеси	212 262 000
Монтажные работы	
Монтаж оборудования	220 134 000
Строительные работы	316 779 000
ИТОГО	1 600 000 000

Расчет срока окупаемости капитальных затрат производится по формуле (19):

$$T = \frac{K}{\Delta\P}, \quad (19)$$

где T – срок окупаемости, лет;

K – объем капиталовложений, млн руб;

$\Delta\P$ – прирост прибыли, млн руб.

Срок окупаемости составит:

$$T = \frac{1600}{1860,2} = 0,86 = 314 \text{ дней}$$

5.5 Расчет рентабельности продукции

Расчет рентабельности продукции определяется формулой (20):

$$R = \frac{\Pi}{C_c \cdot V} \cdot 100, \quad (20)$$

Рентабельность продукции до и после внедрения составляли:

$$R_{\text{баз}} = \frac{11515,4}{21921 \cdot 2,600} \cdot 100 = 20,20 \%$$

$$R_{\text{пр}} = \frac{13375,6}{21237 \cdot 2,616} \cdot 100 = 24,08 \%$$

Технико-экономические показатели проекта сведены в таблицу 27.

Таблица 27 – Технико-экономические показатели внедрения проекта

Показатели	Единица измерения	Базовый вариант	Проектный вариант
Производство чугуна	млн т/год	2,600	2,616
Себестоимость 1 т чугуна	руб	21921	21237
Рентабельность продукции	%	20,20	24,08
Фондоотдача	руб/руб	1,518	1,480
Фондоемкость	руб/руб	0,659	0,676
Прибыль от реализации	млн руб/год	11515,4	13375,6
Условно-годовая экономия	млн руб	-	1789,3
Срок окупаемости	сутки	-	314

Выполненные расчеты наглядно доказывают экономическую целесообразность проекта:

- производительность увеличится на 27 т/сутки,
- прибыль увеличится на 1860,2 млн. руб/год,
- рентабельность повысится на 3,88 %,
- себестоимость 1 т чугуна снизится на 684 руб,
- условно-годовая экономия составит 1789,3 млн. руб/год,
- срок окупаемости составит 314 дней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании новых доменных печей и реконструкции существующих необходимо уделять внимание усовершенствованию и оптимизации используемых технологий, как вдувание ПУТ в комбинированном дутье для повышения потенциала производительности экономичности работы печи.

Была рассмотрена технология вдувания подогретого ПУТ с оксидами железа преимущественно полученных с отходов и изучено влияние этого способа на технико-экономические показатели доменной печи. Была доказана экономическая эффективность внедрения технологии вдувания подогретых ПУТ и аспирационной пыли, а также экологическая составляющая данной тематики. Срок окупаемости составит 314 дней. Реализация технологии поможет:

- увеличить производительность на 27 т/сутки,
- увеличить прибыль на 1860,2 млн. руб/год,
- повысить рентабельность на 3,88 %,
- снизить себестоимость 1 т чугуна на 684 руб,
- достигнуть условно-годовой экономии в 1789,3 млн. руб/год.

Так как большинство технических параметров печи изменилось незначительно, то можно утверждать, что эксплуатационные свойства печи не изменятся. Учитывая этот фактор, можно сделать вывод об стабильной работе печи при внедрении данной технологии.

На основе доступных данных о сырье было просчитано в таблицах 11-20 изменение химического состава чугуна и шлака. Также помимо прямого экономического эффекта проект может привести к изменению химического состава чугуна и шлака:

- понизится содержание ванадия в чугуне на 0,016,
- понизится содержание марганца в чугуне на 0,015,
- увеличится содержание серы в чугуне на 0,003.

При этом химический состав и основность (основность и полная основность составляют 1,216 и 1,725 соответственно) шлака практически не изменятся, удовлетворяя условиям плавки на титано-магнетитовом сырье для предотвращения образования тугоплавких соединений на основе титана.

Потенциальным продолжением исследования технологии является поиск и изучение других материалов для вдувания через фурменные приборы, а также предвосстановление дисперсного сырья вне доменной печи. Не мало важным является то, что при вдувании ПУТ с железосодержащей пылью уменьшается количество шихты подаваемое через БЗУ, что может привести к пересмотру габаритных размеров доменной печи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / Под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ— УПИ, 2005. 301 с. ISBN 5–321–00557–5.
2. Нижнетагильский металлургический комбинат 1940-2000. На пути в XXI век [Текст]/ Н. А. Беркутова, В. А. Кузнецова, Ю. А. Данилина [и др.]; под ред. М. А. Третьяковой. – Нижний Тагил: АО «НТМК», 2000. – 110 с.
3. Козлов А. ЕВРАЗ НТМК: достижения и перспективы [Текст]/ А. Козлов, Д. Чистопрудов, Н. Рыков, А. Бинас. – Нижний Тагил: НЧОУ «ЦПП Евраз-Урал», 2014. – 34 с.
4. Жеребин Б.Н. Практика ведения доменной печи: Учебное пособие / Б.Н. Жеребин. – М.: Металлургия, 1980. – 248 с.
5. Ефименко Г. Г. Металлургия чугуна. Учебник для вузов. / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. – К.: Выщашк. Головное изд-во, 1988. – 351 с.
6. Плискановский, С.Т. Оборудование и эксплуатация доменных печей / С.Т. Плискановский, В.В. Полтавец. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 495 с.
7. Гаврилюк, Г. Г. Доменная плавка титаномагнетитов / Г. Г. Гаврилюк, Ю. А. Леконцев, С. Д. Абрамов. – Тула : АССОД, 1997. – 212 с.
8. Техотчеты технического управления АО «ЕВРАЗ НТМК» за 2018-2022 гг.
9. СТП 102-21-2009. Требования к качеству кокса.
10. Анализ тепловой работы воздушных фурм доменной печи / В. И. Жук // — Мариуполь: Украина, 2001. - Вісник Приазовського державного технічного університету 2001. № 12. С. 12–17.
11. Бехман Г., Бернер К., Эсфельд Г. Причины повреждений фурм доменной печи. // Черные металлы (StahlUndEisen). – 1970 №10. – С.81-56.

12. Мешков, К. В. Анализ повреждения воздушных фурм доменных печей / К. В. Мешков, Р. Н. Белокопытов // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей IX международной научной конференции, Казань, 29–30 сентября 2021 года. – Казань: ООО «Конверт», 2021. – С. 36-38. – EDN MLPPRC.

13. Investigations of measures for extension of BF tuyere life time (EXTUL) ISSN 1831-9424. European Commission, B-1049 Brussels.

14. Вегман Е. Ф., Жеребин Б. Н., Похвиснев А. Н. и др. Металлургия чугуна: Учебник для вузов / под ред. Ю. С. Юсфина. — 3-е издание, переработанное и дополненное. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2004 — 774 с. — 2000 экз. — ISBN 5-94628-120-8.

15. Fine Ore Injection into Blast Furnace through Tuyeres / Masaaki Naito, Kazuyoshi Yamaguchi, Hiromitsu Ueno, Kenji Tamura // NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 94 July 2006 – 139-UDC 669.162.263:669.162.221

16. Волынкина, Е. П. Развитие концепции управления отходами и разработка методологии ее реализации на металлургическом предприятии: специальность 05.16.07 «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Волынкина Екатерина Петровна. – Новокузнецк, 2007. – 44 с. – EDN NJAPYD.

17. Инновационное решение проблем утилизации железосодержащих отходов металлургического производства / В. А. Роменец, С. А. Макеев, Ю. В. Похвиснев [и др.] // Экономика промышленности. – 2011. – № 3. – С. 32-38. – EDN OJENXB.

18. Проблемы экологии и утилизации техногенного сырья в металлургическом производстве / Ю. С. Карабасов, Ю. С. Юсфин, И. Ф. Курунов, В. М. Чижикова // Металлург. – 2004. – № 8. – С. 27-33. – EDN HYSHET.

19. Дуйсекенов, Р. К. Пыль и шлам газоочисток металлургических заводов, и анализ путей их утилизации / Р. К. Дуйсекенов, А. В. Маздубай // Наука и техника Казахстана. – 2020. – № 3. – С. 29-37. – EDN RLQYZV.

20. Утилизация пыли и шлама газоочисток металлургических предприятий / В. Н. Летимин, И. В. Макарова, М. С. Васильева, Т. М. Насыров // Наука и производство Урала. – 2015. – № 11. – С. 11-15. – EDN UCPBLZ.

21. Патент № 2403302 С1 Российская Федерация, МПК С22В 19/30, С22В 7/02, С22В 19/38. способ непрерывной переработки железоцинкосодержащих пылей и шламов: № 2010105386/02: заявл. 15.02.2010 :опубл. 10.11.2010 / В. М. Колокольцев, В. А. Бигеев, С. К. Сибегатуллин, А. В. Пантелеев ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – EDN TLRJDM.

22. Исследование превращения вдуваемых углей и других порошков в шахтных печах / А. И. Бабич, Д. Г. Зенк, Г. В. Гуденау [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2008. – № 1(11). – С. 45-51. – EDN NVWCXD.

23. Сафронов, Н. Н. Разработка теоретического обоснования технологических решений по утилизации дисперсных отходов производства в литейных процессах: специальность 05.16.04 «Литейное производство»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Сафронов Николай Николаевич. – Липецк, 1996. – 47 с. – EDN ZLLAVB.

24. Сафронов, Н. Н. Оценка эффективности вдувания в горн вагранки дисперсных высокоосновных и железосодержащих отходов производства. Часть 1(2) / Н. Н. Сафронов, Л. Р. Харисов // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2006. – № 1. – С. 6. – EDN HVGTWJ.

25. Патент № 2797794 С1 Российская Федерация, МПК С21В 13/00. Способ производства чугуна методом непрерывного жидкофазного восстановления : № 2022123713 : заявл. 02.02.2021 :опубл. 08.06.2023 / Т. Чжан, Ч. Доу, Я. Лю [и др.] ; заявитель НОРТИСТЕРН ЮНИВЕРСИТИ, ДУНДА НОНФЭРРОУС СОЛИД ВЭЙСТ ТЭХНОЛОДЖИ РЕСЕРЧ ИНСТИТУТЭ. – EDN VNQAAB.

26. Фридрен, Р. И. Новый процесс металлизации железных руд и переработки отходов // Сталь. – 2001. – № 4. – С. 67–72. 8 Нурман, Е. А., Альжанов, М. К.

27. Исследование возможности получения формовочных изделий на основе шламов обогащения железорудного сырья // Наука и техника Казахстана. – 2020. – № 1. – С. 65–72.

28. Освоение работы доменной печи, полезным объемом 3000 м³, с применением пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 36–40.

29. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий // Металл и литье Украины. – 2013. – № 10. – С. 5–10.

30. Тепловая работа и перспективные конструкции шахты и металлоприемника доменной печи при применении пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. В. Бородулин, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий, Г. В. Панчоха // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 3. – С. 106–110.

31. Патент № 2057187 С1 Российская Федерация, МПК С21В 5/00, С21В 5/02. способ выплавки чугуна с пониженным содержанием кремния : № 5062542/02 : заявл. 21.09.1992 :опубл. 27.03.1996 / Н. М. Можаренко, М. Т. Бузовера, Э. С. Хомяков [и др.]; заявитель Череповецкий металлургический комбинат им. 50-летия СССР. – EDN ZQQIMV.

32. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко С. П. Сущев. – Днепродзержинск : ДГДУ, 2006. – 542 с.

33. Семикин И. Д. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов / И. Д. Семикин, С. И. Аверин, И. И. Радченко. – М. : Металлургия, 1965. – 391 с.

34. К вопросу повышения эффективности использования топливных добавок в доменном производстве / А. В. Бородулин, А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2010. – Вып. 21. – С. 67–74.

35. Повышение энергоэффективности доменной печи путем вдувания предварительно нагретого ПУТ с оксидами железа / А. А. Москалина, А. Л. Чайка, Б. В. Корнилов [и др.] // Сталь. – 2021. – № 7. – С. 8-13. – EDN TGGGEL.

36. Ижевский В. П. Система учета доменного баланса / В. П. Ижевский // ЖРМО. – 1912. Ч. 1-я. – № 2. – С. 180–214.

37. Исследования по вдуванию железорудной мелочи в доменную печь / Г. В. Гуденау, Ш. Випперманн, В. П. Московчук // Сталь. – 1996. – № 2. – С. 9–11.

38. Вдувание железосодержащего рудного сырья в фурмы доменных печей расширяет возможности доменного процесса / И. Ф. Курунов, Д. Н. Тихонов, А. Н. Савчук // ОАО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2003. – № 3. – С. 23–35.

39. Kushima, K. et al.: 47th Ironmaking Conference of the Iron & Steel Society (ISS) of AIME, 1988

40. Исследования влияния вдувания в горн пылевидных оксидов железа и предварительно нагретого пылеугольного топлива на показатели тепловой работы доменной печи / А.В. Бородулин, А.А. Сохацкий, Б.В. Корнилов // Институт черной металлургии имени З.И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ им. З.И. Некрасова НАНУ). 2016 – № 2. – С. 48–53. УДК 669.162.21

41. Под ред. Л. И. Леонтьева и др. Доменное производство — XXI век. Труды международного конгресса доменщиков. — Москва: Издательский дом «Кодекс», 2010. — 560 с. — ISBN 978-5-904280-18-5.

42. Дунаев Н.Е., Кудрявцева З.М., Кузнецов Ю.М. Вдувание пылевидных материалов в доменные печи. - М: Металлургия. 2009. - 207 с.

43. Авторское свидетельство № 74613 А1 СССР, МПК C21B 3/00. Способ вдувания колошниковой пыли в доменную печь: № 42502: заявл. 10.04.1941 :опубл. 01.01.1949 / Н. С. Гирло, И. И. Коробов. – EDN AVDFWS.

44. Авторское свидетельство № 74209 А1 СССР, МПК C21B 3/00. Способ вдувания в шахту доменной печи колошниковой пыли доменным газом: № 34505: заявл. 23.07.1940: опубл. 01.01.1949 / В. П. Оноприенко, Н. В. Плоткин. – EDN CVKUFG.

45. Технологическая инструкция ТИ 102-Д-132-2021 «Производство чугуна».

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Таблица А.1 – Параметры технологического режима плавки
АО «ЕВРАЗ НТМК» [8]

Наименование параметра	Значение параметра
Масса рудной подачи, т	54-60
Уровень засыпи, м	0,7-1,2
Основность шлака (CaO/SiO_2)	1,15-1,25
Рудная нагрузка, т руды/т кокса	5,2-5,6
Дутье:	
Расход дутья, $\text{м}^3/\text{мин}$	4200-4700
Давление горячего дутья, ати	3,6-3,8
Температура горячего дутья, $^{\circ}\text{C}$	1200-1250
Влажность дутья, $\text{г}/\text{м}^3$	естеств. + (10-15)
Кинетическая энергия струи дутья, $\text{кгс-м}/\text{с}$, не менее	8150-8200
Содержание кислорода в дутье, %	29-32
Теоретическая температура горения, $^{\circ}\text{C}$	1950-2100
Содержание в чугуне, %:	
Si	0,05-0,10
Mn, не более	0,40
S, не более	0,030