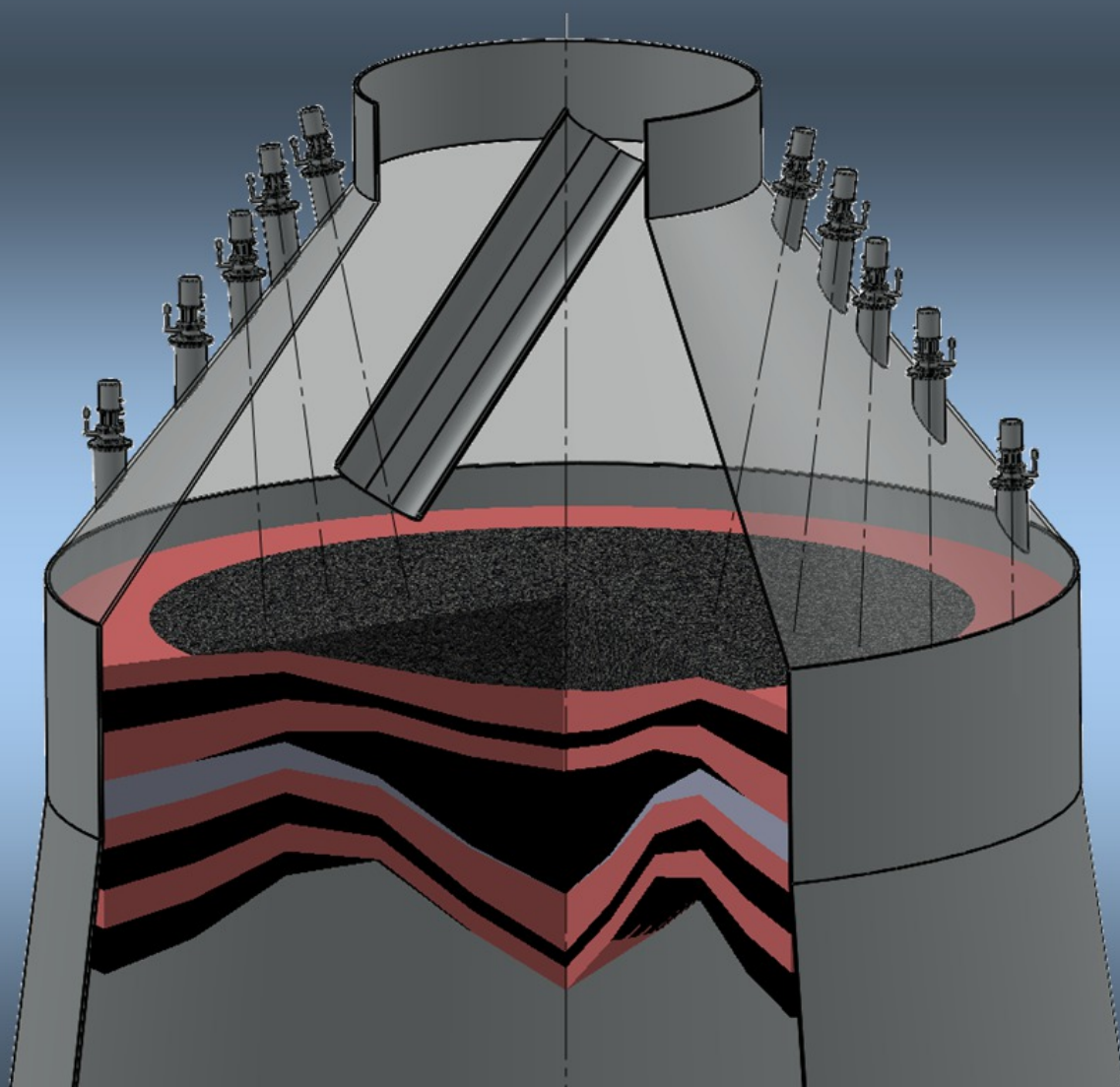


В.И. БОЛЬШАКОВ, И.Г. МУРАВЬЕВА, Ю.С. СЕМЕНОВ

# ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ



**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ им. З.И. НЕКРАСОВА**

**В.И. БОЛЬШАКОВ, И.Г. МУРАВЬЕВА, Ю.С. СЕМЕНОВ**

**ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ ДЛЯ  
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ**

**Днепропетровск  
Пороги  
2013**

УДК 621.1.016.4 (075.8)  
ББК 31.3

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор  
*Владимир Николаевич КОВШОВ,*

Национальная металлургическая академия Украины, кафедра металлургии чугуна;  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
*Николай Михайлович МОЖАРЕНКО,*

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины,  
отдел металлургии чугуна.

**Б 25 Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С.** Применение радиолокационных систем измерения поверхности засыпи шихты для контроля и управления доменной плавкой. - Днепропетровск: Пороги, 2013. – 364 с.

В книге представлены результаты впервые выполненных исследований по освоению первой отечественной радиолокационной стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике, установленной на доменной печи №9 «Криворожстали». Разработаны технологические требования к установке систем измерения профиля поверхности засыпи для доменных печей средних и больших объемов, оборудованных конусными и бесконусными загрузочными устройствами, а также методы расчета параметров поверхности засыпи шихты. Представлены разработанные в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины с использованием информации радиолокационной системы способы контроля, прогноза и управления доменной плавкой, реализованные на крупнейшей в Украине доменной печи. Результаты исследований, выполненных сотрудниками ИЧМ за последние десять лет, являются базой для дальнейшей разработки новых технологических способов управления доменной плавкой на основе информации, получаемой радиолокационной системой.

Для ученых-металлургов и широкого круга инженерно-технических работников металлургической промышленности, аспирантов, докторантов, а также преподавателей и студентов металлургических ВУЗов.

У книзі представлено результати вперше виконаних досліджень з освоєння першої вітчизняної радіолокаційної стаціонарної системи вимірювання профілю поверхні засипу шихти на колошнику, встановленої на доменній печі №9 «Криворіжстали». Розроблено технологічні вимоги до установки систем вимірювання профілю поверхні засипу для доменних печей середніх і великих об'ємів, обладнаних конусними і бесконусними завантажувальними пристроями, а також методи розрахунку параметрів поверхні засипу шихти. Представлено розроблені в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України з використанням інформації радіолокаційної системи способи контролю, прогнозу та управління доменною плавкою, реалізовані на найбільшій в Україні доменній печі. Результати досліджень, виконаних співробітниками ІЧМ за останні десять років, є базою для подальшої розробки нових технологічних способів управління доменною плавкою на основі інформації радіолокаційної системи.

Для вчених-металургів і широкого кола інженерно-технічних працівників металургійної промисловості, аспірантів, докторантів, а також викладачів і студентів металургійних ВНЗ.

Рекомендовано к печати ученым советом  
Института черной металлургии  
им. З.И. Некрасова НАН Украины

**ISBN 978-617-518-277-2**

**© Большаков В. И.,  
Муравьева И. Г.,  
Семенов Ю. С., 2013 г.**

## ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование доменной плавки в современных условиях во многом определяется объемом объективной информации о параметрах технологического процесса [1, 2, 3]. Расширить возможности контроля процесса плавки позволяет установка на доменных печах устройств измерения профиля поверхности засыпи [4].

В настоящее время функции профиломеров ограничены контролем поверхности засыпи шихты в доменной печи. Практически отсутствует использование информации профиломеров в автоматизированных системах управления доменной плавкой, что свидетельствует о недостаточном использовании получаемой с их помощью информации для совершенствования технологии доменной плавки. Получаемая ими информация, как правило, служит для адаптации математических моделей распределения шихты на колошнике, которые могут использоваться как в составе экспертных систем управления доменной плавкой, так и вне зависимости от других моделей для оценки программ загрузки.

Ввиду малодоступности для экспериментальной проверки физико-химических процессов восстановления, плавления и других преобразований железорудных материалов, флюсов и горючих углеродсодержащих материалов, протекающих в доменной печи при высоких температурах и давлении, они остаются недостаточно изученными. Управление доменной плавкой базируется на результатах экспериментальных и аналитических исследований процессов доменной плавки, в том числе, с использованием математических моделей. Большинство моделей основано на допущениях, не позволяющих учесть динамику изменения в реальных условиях процессов в доменной печи. Поэтому важное значение для совершенствования технологии доменной плавки имеет разработка способов контроля, прогноза и управления, основанных на объективной информации, в том числе, получаемой профиломерами, позволяющими максимально приблизить ее к автоматизированному управлению [1].

В последние годы реконструируемые доменные печи Украины оснащаются современными системами измерения профиля поверхности засыпи шихты, основанными на методе многоточечного измерения, и использующие радиолокационный способ контроля [5–7]. Эти системы обладают значительными преимуществами по сравнению с горизонтально перемещаемыми



зондами (наиболее распространенный до настоящего времени профилемер), т.к. позволяют получить наиболее полную информацию о состоянии поверхности засыпи шихты. Эффективное использование систем измерения профиля поверхности засыпи шихты должно основываться на научно обоснованных технологических требованиях к их установке на печах и получаемой с их помощью информации, для определения и представления которой необходима разработка специальных методов [6, 9, 10].

Как показал опыт исследований, выполненных на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», на которой установлена первая отечественная стационарная система измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике, на основе рассчитанных с помощью информации профилемера параметров состояния поверхности засыпи могут быть разработаны методы контроля не только поверхности засыпи, но и технологического процесса в целом.

Эффективность доменной плавки в значительной степени определяется распределением шихтовых материалов на колошнике доменной печи. Для реализации рационального распределения шихты необходимо знание зависимостей формирования поверхности засыпи от изменения параметров распределения материалов и хода печи, скоростей опускания шихты по сечению колошника, формы и положения в печи основных элементов структуры столба шихтовых материалов, определяющих газодинамические процессы в печи [1]. Получаемая с помощью профиломеров информация позволит обеспечить принятие обоснованных управляющих воздействий на ход доменной плавки, которые могут быть реализованы бесконусными загрузочными устройствами, имеющими широкие возможности управления распределением шихты [4, 8, 11–14].

Цель настоящей работы, выполненной сотрудниками Института черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ), заключается в представлении результатов их исследований при освоении и сопровождении работы первой отечественной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты, установленной более 10 лет назад на крупнейшей доменной печи Украины – ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Разработанные методы контроля, прогноза и управления доменной плавкой, основанные на информации стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике,

открывают новое направление использования профиломеров для совершенствования процесса доменной плавки [12, 15–18].

Значительный вклад в становление и развитие этого направления принадлежит научному сотруднику отдела технологического оборудования и систем управления ИЧМ Станиславу Трофимовичу Шулико, которому авторы глубоко благодарны.

Авторы выражают признательность за сотрудничество при выполнении исследований, изложенных в книге, научным сотрудникам Института черной металлургии НАН Украины – д.т.н., профессору И. Г. Товаровскому, д.т.н., профессору Д. Н. Тогобицкой, к.т.н. Н. А. Гладкову, Ф. М. Шутылеву, Е. И. Шумельчику и Е. А. Белошапка.

Авторы считают своим долгом отметить вклад в освоение первой отечественной системы измерения профиля поверхности засыпи коллег Научно-исследовательского института металлургии и материаловедения – А. А. Дударенко и Д. С. Кукушкина и комбината «АрселорМиттал Кривой Рог» – В. С. Листопадова, Д. В. Пинчука, К. А. Дмитренко и К. А. Стрюкачева.

## ГЛАВА 1

### КОНСТРУКЦИИ ПРОФИЛЕМЕРОВ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

#### 1.1 Средства измерения профиля поверхности засыпи шихты в доменной печи

Как следует из анализа литературных источников, существует большое разнообразие конструкций и способов измерений профиля поверхности засыпи шихты в доменной печи [19–64]. Созданные на их основе профилемеры могут быть классифицированы следующим образом.

##### **Механические профилемеры**

Для контроля распределения шихты на колошнике доменной печи путем измерения профиля засыпи шихты и других параметров традиционно используются зонды (трубы, балки) различных конструкций, а также грузы, опускаемые на поверхность шихты. Ввод зондов в рабочее пространство печи осуществляется установками с электрическими, гидравлическими приводами, работающих в ручном и полуавтоматическом режимах, а также стационарными средствами автоматического действия. Впервые исследования профиля засыпи шихты на колошнике с использованием одного груза были проведены под руководством М. А. Павлова в 1930–1939 гг. [19]. Характерным для них являлось одновременность измерений в разных точках поверхности по радиусу колошника, что искажало картину профиля поверхности засыпи, т.к. не учитывало влияние опускания шихты за время между измерениями. Этот недостаток частично устранялся путем применения зондов с несколькими грузами, которые опускались на поверхность шихты, а через определенные промежутки времени приподнимались и опускались вновь, что позволяло оценивать изменение конфигурации профиля во времени [19]. Измерения носили исследовательский характер, кроме того, отмечалось частое скольжение грузов по откосам шихтовых материалов и малое быстрое действие измерений по одному радиусу (3–5 мин).

Последующие разработки, выполненные в Японии, Люксембурге (фирма "Paul Wurth"), во Франции (TRINDEL, IRSID), СССР (ИЧМ, Гипромез, МИСиС) и Германии направлены на совершенствование конструкций механических профилемеров с

целью повышения оперативности и надежности измерений, а также использования их в АСУ доменных печей [7, 20–23]. Основная направленность этих разработок – увеличение быстродействия приводов грузов и зондов (уменьшение времени измерения до 60 с), выбор оптимального количества грузов–датчиков (6–12), их массы (5–20 кг) и формы для надежного расположения на поверхности, совершенствование автоматизации обработки и отображения информации, повышение точности измерения (до 50 мм).

Однако, профилемеры основанные на контактном способе измерения, не нашли широкого промышленного применения из-за большой длительности цикла измерения, значительной трудоемкости обслуживания и низкой точности измерения.

### **Ультразвуковые профилемеры**

Первые опыты по ультразвуковой локации уровня и профиля поверхности шихты проводились в Англии. В опытах были получены данные о профиле поверхности засыпи шихты, однако надежного контроля осуществить не удалось в связи со значительными потерями мощности отраженного сигнала [24]. В ФРГ было разработано устройство на базе горизонтального зонда, оборудованного механической системой роликов, тросов и электромоторов, с помощью которой в заданной точке радиуса колошника опускали измерительный комплекс, включающий источник ультразвука (28кГц) и фиксатор отраженной от поверхности шихты волны, систему измерения температуры газа, подвесной грейфер для отбора проб шихты. Данное устройство позволяло при перемещении по радиусу печи горизонтального зонда получать информацию о состоянии профиля поверхности засыпи шихты [25]. В СССР работы по ультразвуковой локации поверхности засыпи шихты проводились под руководством Центральной лаборатории автоматики [24]. В 1957 г. на одной из доменных печей металлургического завода им. Дзержинского был установлен ультразвуковой прибор с магнитострикционными датчиком и приемником. Работа прибора была основана на определении расстояния до поверхности засыпи по времени между посылкой и приемом отраженного импульса. Результаты промышленного использования ультразвукового прибора показали, что особенности состояния рабочего пространства и повышенный ультразвуковой фон не позволили получить достоверную информацию об изменении уровней засыпи: при опускании уровня ниже 1,5 м отраженный сигнал пропадал. Поэтому создать профилемер на базе этого ультразвукового прибора не удалось.

Как показал анализ литературных источников, ультразвуковые профиломеры в промышленных условиях не применяются, так как на их показания влияют высокие температуры и запыленность в доменной печи [24].

### **Лазерные профиломеры**

Недостаточная эффективность ультразвуковых профиломеров вызвала необходимость создания устройств лазерного типа, получивших наибольшее развитие и применение на доменных печах Японии. Опытные образцы лазерных профиломеров с длиной волны 1,06 мкм, точностью измерения 30 мм и временем измерения 16–18 с в 200 точках по диаметру колошника, разработанные фирмами «Синниппон сэйтэцу» и «Токе Сибатура дэнки», испытаны на доменных печах комбината в г. Муроране [26]. Первый из них внедрен на доменной печи №1 полезным объемом 1245 м<sup>3</sup>, оборудованной бесконусным загрузочным устройством [27]. С помощью этих профиломеров была получена информация об углах откоса материалов, скоростях опускания, толщинах слоев, а также отношениях высот слоев рудных материалов и кокса. Результаты испытаний и эксплуатации показали, что в условиях влажной и запыленной среды необходима высокая чувствительность фотоприемников, что требует разработки дополнительных систем обработки сигналов.

Фирмами «Nippon Steel Corp.» и «Toshiba» разработан новый профиломер (точность измерения  $\pm 30$  мм, длительность измерения 20 с) на принципе оптической триангуляции с использованием импульсного лазера с кристаллом иттрий-алюминиевого граната [28]. Его параметры: число точек, измеряемых на поверхности – 200, усредненные значения профиля определяются для 32 точек по диаметру колошника; погрешность измерения при слое шихты 400–500 мм не более  $\pm 40$ –50 мм, время измерения менее 24 с; все оборудование размещено вне рабочего пространства печи; управление работой профиломера осуществляется ЭВМ; система оснащена защитными клапанами, очисткой защитных стекол азотом и водой. С помощью профиломера можно определить профиль поверхности засыпи шихты, толщину слоев загружаемых в печь материалов, их распределение, скорость опускания шихты. Профиломеры данного типа были установлены на доменных печах заводов в г. Муроране и г. Оита [29].

Опыт внедрения лазерного профиломера (аргонный лазер с видимым лучом) на доменной печи фирмы «Kawasaki Steel Corp.» показал, что значительное отличие результатов измерений,

полученных при одинаковых условиях загрузки, требуют использования математического моделирования. По эксплуатационным характеристикам лазерный профилемер оказался хуже, чем установленные на печах микроволновые устройства [30]. Сложность в эксплуатации при рассеивании отраженных лучей пылью отмечена также для профилемера, созданного на базе аргонового лазера фирмой «Кавасаки сэйтэцу» [31] (точность измерения  $\pm 50$  мм), где на основе метода "светового сечения" с помощью лазера создаются две параллельные, расположенные на заданном расстоянии, световые линии на поверхности шихты, положение которых фиксируется телекамерой, а профиль поверхности засыпи определяется путем сравнения положения двух световых линий, зафиксированных последовательно приемным устройством [32]. Использование лазерного профилемера на доменной печи №6 в г. Тиба, оборудованной бесконусным загрузочным устройством, показало, что затраты на его эксплуатацию в 2,3 раза больше, чем механического профилемера и в 1,4 раза больше, чем профилемера, основанного на базе высокочастотного излучения [33].

Недостатками лазерных профилемеров являются сложность аппаратуры и ее высокая стоимость, низкая эффективность выделения сигнала на фоне среды с переменными во времени параметрами ее состояния (влажности, давления, концентрации пыли, рассеяние лучей пылью), трудность выбора рабочего диапазона излучения, сложность очистки окон в условиях высокой запыленности газовой среды рабочего пространства доменной печи.

### **Световые, оптические профилемеры**

Фирмами «Кавасаки сэйтэцу» и IRSID разработаны профилемеры с использованием источников света, световодов, волоконной оптики, позволяющих контролировать профиль поверхности засыпи и крупность кусков шихтовых материалов [34, 35]. Конструктивно измерительная система представляет собой зонд, перемещаемый к оси печи до момента достижения им установленного положения, и далее опускаемого до достижения им поверхности шихты. С помощью волоконной оптики получают изображение, характеризующее гранулометрический состав исследуемой шихты. В случае достижения зондом поверхности засыпи шихты он может функционировать и как профилемер. В Бельгии на доменной печи металлургического завода в г. Льеж при проведении исследований использовался оптический метод [24, 36]. Внутри печи с диаметром колошника 5,7 м была помещена

мощная осветительная лампа, которая освещала всю поверхность засыпи шихты на колошнике. Наблюдение за поверхностью материалов производилось через специальное окно в верхней части печи. В результате исследований были зафиксированы некоторые перемещения отдельных частиц шихты по поверхности, а также сегрегация материалов по крупности. Однако указанные исследования не позволили произвести количественные измерения профиля поверхности засыпи, скорости опускания и других параметров поверхности засыпи шихты [24].

Оптический метод контроля профиля засыпи шихты использовался, в основном, в лабораторных условиях и применения на доменных печах не получил вследствие потерь светового излучения в запыленной атмосфере.

### **Рентгеновские профилемеры**

Рентгеновские профилемеры можно классифицировать по трем основным типам: частотные, принцип действия которых основан на использовании зависимости между числом фотонов и измеряемым профилем засыпи шихты; амплитудные, использующие зависимость между плотностью потока энергии квантов и профилем поверхности засыпи шихты и время–импульсные, использующие зависимость между временем распространения рентгеновского излучения от генератора до поверхности засыпи и обратно до приемника. По характеру излучения рентгеновские профилемеры делятся на устройства с непрерывным и импульсным излучением энергии.

В способе определения рельефа засыпи и уровня поверхности, предложенном ЦНИИчерметом, контроль поверхности засыпи шихты на колошнике доменной печи основан на использовании обратно рассеянного рентгеновского излучения на границе раздела двух сред: колошниковый газ – шихта [37]. Авторами работы [37] разработана автоматизированная система контроля профиля шихтовых материалов в доменной печи, построенная на базе стробоскопического метода измерения расстояний и импульсного рентгеновского профилемера, осуществляющего сканирование профиля по радиусу более 4,5 м. При этом, рабочий диапазон высот по вертикали от места установки сканирующего блока составляет от 2 до 6 м. Измерение одного профиля осуществляется в течение 60 с, погрешность измерения составляет не более 50 мм.

Рентгеновские импульсные профилемеры, по сравнению с лазерными и световыми, имеют на порядок меньшие массу и габариты аппаратуры, не нуждаются в оптически чистых окнах,

однако представляют радиационную опасность для обслуживающего персонала и не нашли широкого применения.

### **Радиоизотопные (гамма–локаторы)**

Методы контроля профиля засыпи шихты на колошнике доменной печи с помощью гамма–излучения можно разделить на две группы: к первой относятся методы, основанные на зависимости поглощения радиоактивного гамма–излучения от высоты слоя шихты, находящегося между источником, расположенным над уровнем материалов, и приемником, расположенным под уровнем материалов; ко второй – методы, основанные на использовании эффекта рассеяния гамма-квантов при отражении от контролируемой поверхности.

Первое сообщение об использовании метода гамма–локации для контроля рельефа поверхности было опубликовано в 1961 г. [24, 38], дальнейшие решения по реализации этого способа были разработаны в США, а применительно к доменным печам – в ЦНИИЧМ [39]. Принцип действия первого дискретного гамма-локатора, разработанного в СССР, состоял в совмещении центров облученной и приемной зон, вычисления в момент совмещения координат точки поверхности. При этом использовались, в отличие от гамма–локаторов, источники малой активности излучения. Быстродействие таких локаторов (время измерения до 1 мин) ограничено, в основном, количеством точек измерения и случайной погрешностью, вызванной характером отраженного гамма-излучения [40, 41].

Одним из первых радиоизотопных следящих гамма-локаторов являлась радиально сканирующая установка гамма-контроля ГКП–1 для автоматического бесконтактного контроля состояния профиля поверхности засыпи шихты [40], разработанная и испытанная в 1965 г. на Ново-Тульском металлургическом заводе. В этой установке применено диаметрально противоположное расположение источника и приемника, состоящего из двух детекторов излучения, обеспечивающих слежение за перемещающейся облученной зоной ограниченного размера [24].

Усовершенствованный радиоизотопный профилемер РИП-1 был разработан в базовой изотопной лаборатории г. Донецка и испытан на Краматорском метзаводе [42]. Аналогичный профилемер, разработанный в базовой опытно–конструкторской изотопной лаборатории Днепродзержинского Индустриального института, был испытан на доменной печи объемом 1719 м<sup>3</sup> завода им. Дзержинского в 1972 году [43]. Установка радиоизотопного



измерителя профиля (гамма–локатора), наряду с радиометрическим следящим уровнемером и двумя электромеханическими уровнемерами, позволила измерять профиль поверхности засыпи с погрешностью  $\pm 50\text{--}100$  мм для всех компонентов шихты при уровне засыпи, достигавшем 5 м. Достоинствами профилемеров, испытанных на Краматорском металлургическом заводе и заводе им. Дзержинского, являлись простота и надежность в эксплуатации. К недостаткам следует отнести большие габариты приемника, нестабильность его характеристик, высокую активность излучения и длительность измерения.

Радиоизотопный следящий профилемер ГЛП со значительно меньшей активностью источника был разработан в ЦНИИЧМ им. Бардина и испытан на Мариупольском метзаводе [39]. В этом профилемере была предусмотрена повышенная помехоустойчивость и уменьшены габариты приемника. К недостаткам следует отнести низкую точность регистрации отдельных участков профиля, где облученная зона перемещалась с повышенной скоростью, и значительную длительность измерения, которая составляла более 1 мин. Этим же институтом был разработан более совершенный радиоизотопный профилемер ЛАРС, установленный на доменной печи №1 НПО «Тулачермет» [44]. Его основные отличия от профилемера ГЛП состояли в том, что по сигналу разбаланса осуществлялось совместное управление движением источника и приемника и вместо двух источников использовался один. В результате была повышена точность измерения и снижена активность источника. Время измерения профиля шихты, при диаметре колошника 7,5 м, составляло около 1 мин.

На основе результатов исследований [43–48], направленных на совершенствование радиоизотопных профилемеров, была разработана конструкция четырехканального радиоизотопного следящего профилемера РИАП [43], имеющего следующие технические характеристики: диапазон сканирования по диаметру колошника – 10 м; по высоте – 1,5–5,0 м; время измерения по радиусу (диаметру) – 20 с; максимальная погрешность – 100 мм.

На базе профилемеров РИАП и ЛАРС НПО «Тулачермет» и НПО «Черметавтоматика» разработан экспериментальный образец системы контроля загрузки доменной печи, прошедший испытание на доменных печах №1 и №3 полезным объемом 1386 и 2002 м<sup>3</sup> [46], а также более совершенный образец профилемера РИАП-2М [47]. В этом профилемере использован метод обратного рассеянного по поверхностью шихты гамма–излучения от одного или

двух источников ионизирующих излучений, облучающих поверхность шихты через узкие щелевые коллиматоры вдоль одного или двух взаимоперпендикулярных радиусов колошника.

Опыт эксплуатации профилемера РИАП-2М на доменной печи №3 НПО «Тулачермет» показал, что профилемеры, основанные на радиоизотопном способе измерения, имеют ряд существенных недостатков, заключающихся в наличии повышенной радиации в зоне их установки, сложности обеспечения защиты излучателя от воздействия пылегазовых потоков в условиях их нахождения в печи, а также в погрешности измерения, которая увеличивается из-за неточности определения положения приемника излучения в шахте печи в связи с изменяющимся в ходе сканирования положением электромеханической системы [49, 50].

### **Радарные (микроволновые) профилемеры**

В последние годы все большее распространение получают измерители, основанные на принципе радиолокации. Перспективность широкого использования микроволновой техники на доменных печах определяется ее бесконтактностью, быстродействием, высокой чувствительностью при зондировании различных материалов в широком диапазоне их фракционного состава, влажности, температуры, запыленности и дальности (до 50 м). Точность измерения при этом определяется, практически, только состоянием и формой зондируемого материала. Для ровных поверхностей погрешность определения расстояния до цели не превышает  $\pm 0,004$  м. Существенным фактором является безопасность радарных средств для обслуживающего персонала, отсутствие подвижных узлов, относительная простота конструкции в сочетании с возможностью трансляции излучаемых радиосигналов в труднодоступные зоны с критическими параметрами контролируемой среды за счет изменения направления и фокусировки электромагнитной волны.

В 1976 г. на металлургическом заводе в г. Тиба фирмы «Кавасаки сэйтэцу» впервые были установлены стационарные микроволновые датчики на куполе доменной печи, оборудованной конусным загрузочным устройством [51]. Антенны датчиков, продуваемые азотом, были установлены вне печей, что повысило их надежность. Датчики измеряли расстояние до поверхности засыпи в осевой зоне сечения колошника. Особенности используемых микроволновых датчиков было уменьшение отрицательного воздействия интерференции микроволн и влияния разницы углов откоса шихтовых материалов на точность

измерений [51]. Также на этом заводе был разработан микроволновый профилемер сканирующего типа [52]. В нижней части зонда установлены антенна рефлекторного типа и микроволновая схема. С помощью гидравлики зондом периодически осуществляли замеры уровня засыпи в нескольких точках в радиальном направлении печи. Зонд охлаждался водой, а антенна и микроволновая схема – азотом. Погрешность измерений данного профилемера составляла  $\pm 100$  мм [52].

На оснащенных БЗУ доменных печах №1 и №3 завода фирмы “Nippon Steel Corporation” в г. Нагоя с 1984 г., применяются микроволновые радарные измерители. Замеры зондом осуществляются по трем радиусам с интервалом 200 мм 6–7 раз в смену [53]. Радар (антенна продувается инертным газом) с блоком преобразователя сигнала, установленном в воздухоохлаждаемом зонде, вводимом в печь под углом  $5^\circ$ , к горизонту со скоростью 0,16 м/с, разработан фирмой “Kobe Steel” и используется на доменных печах завода в г. Какогава. Точность измерения – 50 мм, частота излучаемых волн – 50–100 МГц. Сравнение данных микроволнового и механического профилемеров дали хорошую сходимость результатов [54].

В 1987 г. после проведения капитального ремонта 1-го разряда доменная печь №1 завода Рейнхаузен фирмы “Крупн шталь” объемом  $2251 \text{ м}^3$  с конвейерной шихтоподачей и двухконусным загрузочным устройством первой в Европе была оборудована радарным зондом для определения профиля засыпи [55].

Промышленное использование получили радиолокационные профилемеры, выполненные в виде горизонтального зонда. Наиболее известный из них микроволновой профилемер, выполненный в виде горизонтального зонда, разработан фирмой “DANGO & DIENENTHAL (DDS)” (Германия) [56]. Аналогичное устройство создано фирмой “Paul Wurth” [53]. Однако, по сравнению с профилемерами фирмы DDS, которая подтвердила высокую надежность своих изделий и качество их изготовления, эти устройства пока не нашли широкого применения. Измерительный микроволновый датчик, используемый в профилемере фирмы DDS, поставлен шведской фирмой “Saab Marine Electronics” и имеет следующие технические характеристики: скорость перемещения – 13 м/мин; возможность осуществления замеров 6 точек за секунду. Как правило – это составляет 111 точек для одного профиля, то есть измерения осуществляются через каждые 36 мм; дальность измерения – от

500 мм до 6000 мм; погрешность измерений –  $\pm 50$  мм; частота излучений электромагнитных волн – 9,5–10,5 ГГц; продолжительность цикла измерений – 50 с. Перемещение профилемера осуществляется гидравлическим приводом. Благодаря отсутствию влияния пыли и температурных колебаний на результаты измерений, а также высокой точности результатов и отличному качеству исполнения, радарные измерители профиля фирмы DDS получили наибольшее промышленное применение в мире. Согласно имеющейся информации, микроволновые профилемеры фирмы DDS установлены на печах Krupp Stahl AG и Huttenwerke Krupp Mannesmann GmbH (Германия), Cockerill-Sambre (Бельгия), Sollag Fos (Франция), Aco Minas Gerais S/A (Бразилия), USS Kobe Steel Company (США), Kawasaki Steel (Япония), BHP Steel (Австралия). Микроволновой профилемер (частота волн 8,8–10,8 ГГц, точность 130 мм), с микропроцессором и вводом датчика зондом, используемый на доменной печи в г. Тиба фирмы “Kawasaki Steel Corporation”, показал достаточную технологичность [57].

Профилемеры, выполненные в виде горизонтально перемещающихся зондов, не позволяют достоверно оценить форму профиля поверхности засыпи шихты по измеряемым радиусам колошника, так как полученные с их помощью уровни точек поверхности засыпи измерены в различные временные интервалы, и на основании информации, полученной с помощью этих профилемеров, не может быть определена полная картина распределения шихты по сечению печи [50, 53].

В 1999 г. доменная печь №5 фирмы Eco Stahl GmbH была оснащена новой автоматической системой контроля распределения шихты, измерительное устройство которой разработано в Московском институте стали и сплавов и производится фирмой DDS. Измерительное устройство прошло успешную апробацию на Новолипецком металлургическом комбинате и ОАО “Северсталь” (Россия). Система представляет собой горизонтальный зонд, на конце которого установлена измерительная головка, выполненная из высокопрочного и теплостойкого контактного элемента и позволяющая определять электрическое сопротивление шихтовых материалов с целью получения информации об их распределении [58].

В последние годы на доменных печах мира начал использоваться принцип многоточечного измерения поверхности засыпи шихты на колошнике, основанный на использовании для контроля поверхности шихты одновременно нескольких

радиолокационных измерителей, установленных на куполе печи стационарно под определенными друг относительно друга углами, что позволяет осуществлять замеры вдоль всего радиуса (диаметра) колошника. Количество измеряемых точек на поверхности шихты определяется числом установленных измерителей. Первой системой измерения профиля поверхности засыпи, основанной на принципе многоточечного измерения, была система Redscan, установленная на колошнике доменной печи Redcor (Великобритания) [50, 53, 59]. Эта система состоит из стационарно установленных вдоль одного диаметра девяти микроволновых измерителей, из которых четыре установлены вертикально с шагом 750 мм, а два – наклонно для измерения профиля в осевой зоне печи. Один из этих датчиков расположен вблизи одного из трех электромеханических зондов. Для подтверждения достоверности сигналов, полученных от микроволновых датчиков, данные, полученные с помощью электромеханических зондов, сравнивались с результатами измерений одного микроволнового и группы датчиков. Из результатов, приведенных в работе [59] следует, что показания, полученные с помощью механических и микроволновых зондов, подобны. Еще два датчика были установлены на куполе печи перпендикулярно основному диаметру и направлены в середину соответствующих радиусов. В работе отсутствуют сведения об использовании получаемой с помощью профилемера информации для контроля и управления ходом доменной плавки.

Национальной Металлургической Академией Украины (НМетАУ) и Научно-исследовательским институтом металлургии и материаловедения (НИИММ) (г. Днепропетровск) была разработана отечественная стационарная радиолокационная система измерения профиля поверхности засыпи шихты и выполнен рабочий проект ее установки на доменных печах ОАО «Запорожсталь» [60–62].

В 2003 г. во время проведения капитального ремонта 1-го разряда на ДП №9 «Криворожстали», оборудованной БЗУ фирмы “Paul Wurth”, в соответствии с разработанным Институтом черной металлургии (ИЧМ) технологическим заданием, НМетАУ и НИИММ была установлена стационарная система измерения профиля поверхности засыпи шихты [63, 64]. Эта система состоит из стационарно установленных пяти измерителей на куполе и пятнадцати на переходном конусе печи, расположенных под разными углами наклона к поверхности засыпи шихты.

Как показал анализ литературных источников, используемые на доменных печах профилемеры отличаются не только положенными в основу их функционирования способами измерения, но и конструктивным исполнением. Установленные на доменных печах профилемеры по конструктивным особенностям можно классифицировать следующим образом:

1. Сканирующие профилемеры двух типов:

- сканирующие неподвижные – измерительная головка устанавливается на куполе печи с возможностью поворота в одной плоскости (радиального сканирования) или движения по спирали с целью обзора всей поверхности засыпи;
- сканирующие подвижные – с возможностью горизонтального перемещения вдоль радиуса печи.

2. Профилемеры со стационарно установленными на куполе печи измерителями, расположенными под разными углами наклона в определенном количестве и порядке.

Анализ результатов промышленного и опытно-промышленного использования профилемеров различных конструкций и принципов действия показал, что наибольшее распространение получили устройства, основанные на радиолокационном способе измерения и выполненные в виде горизонтально перемещаемых зондов или систем со стационарно установленными измерителями.

## **1.2 Использование профилемеров для совершенствования контроля параметров доменной плавки**

Несмотря на большой объем исследований, выполненных при установке на доменных печах профилемеров, основанных на различных методах измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике, в литературных источниках практически отсутствуют сведения об использовании получаемой с их помощью информации для совершенствования технологии доменной плавки, в том числе в автоматизированных системах управления доменной плавкой.

На доменных печах СССР проводились исследования различных конструкций и способов измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике, которые не получили дальнейшего промышленного применения. Попытки использования полученной от профилемера информации для управления «сверху» доменной печью, были предприняты на НПО

«Тулачермет» при использовании на ней гамма-локатора [24, 65], а позднее – радиоизотопного профиломера [66]. Методика использования информации профиломера включала рекомендации по определению зависимости показателей состояния поверхности шихты от радиального газораспределения в верхней части печи методом пассивного эксперимента путем сопоставления этих показателей с имеющимися данными о радиальном газораспределении с учетом периодически действующих факторов (выпусков продуктов плавки или степени наполнения ими горна печи). Экспериментально оценивалось также влияние режима загрузки печи на изменение рельефа поверхности, определяемого профиломером. На основании информации о состоянии поверхности засыпи шихты, полученной с помощью радиоизотопного профиломера, разработаны методика и показатель оценки ровности опускания шихты [67], который может быть использован в качестве дополнения к имеющимся критериям, позволяющим оценивать отклонения хода печи от нормального.

До недавнего времени предпринимали попытки использовать профиломеры в промышленных условиях зарубежные фирмы, накопившие определенный опыт корректировки режимов загрузки доменной печи с использованием профиломеров. Использование ими профиломеров осуществлялось для настройки математических моделей распределения шихты на колошнике, которые могут использоваться как в составе экспертных систем управления доменной плавкой, так и вне зависимости от других моделей для оценки программ загрузки [68–73]. Например, на доменной печи №4 фирмы «Rogesa» (Германия), оснащенной профиломером фирмы «Dango & Dienenthal», установлен программный комплекс для анализа результатов измерений. Программа загрузки выбирается с помощью математической модели, а затем её проверяют и оптимизируют путем анализа загрузки, выполняемого на основе измерения профиля поверхности засыпи и результатов измерения с помощью вводимого в столб шихты зонда [68]. Для оценки состояния поверхности засыпи и корректировки прогнозов программ загрузки, рассчитанных с помощью математической модели, фирмой «Paul Wurth» используется профиломер [69]. Для корректировки программ загрузки, выбираемых с помощью математической модели, разработанной МИСиС совместно с компанией «Paul Wurth», также используется информация профиломера [74]. Для оценки распределения шихты японская фирма «Nippon Steel Corporation» использует модель распределения

шихтовых материалов на колошнике «Rabit», а также информацию, получаемую с помощью микроволнового профилемера [70].

Наиболее известные экспертные системы, разработанные фирмами «Voest-Alpine Industrieanlagenbau (VAI)» и производителем стали «Voest-Alpine Stahl Linz (VASL) (Австрия) [71, 72], «Rautaruukki» (Финляндия) [73, 75] и «Sollac» (Франция) [69], используют информацию о профиле поверхности засыпи шихты, получаемую с помощью профилемера, для адаптации математических моделей распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи.

Первое сообщение об использовании профилемера для оценки хода печи приведено в работе [55]. В дополнение к контролю поверхности засыпи шихты на доменной печи №1 завода Рейнхаузен выполнены исследования по установлению взаимосвязи формы профиля поверхности засыпи с термической нагрузкой на стенки доменной печи, что, по мнению исследователей, может служить важной информацией при принятии управляющих воздействий на ход плавки.

Как следует из анализа литературных источников, получаемая с помощью профилемеров информация служит для адаптации математических моделей распределения шихты на колошнике, которые используются как в составе экспертных систем управления доменной плавкой, так и вне зависимости от других моделей для оценки программ загрузки. Сведения об использовании информации профилемеров для оперативного или автоматизированного управления доменной плавкой отсутствуют.

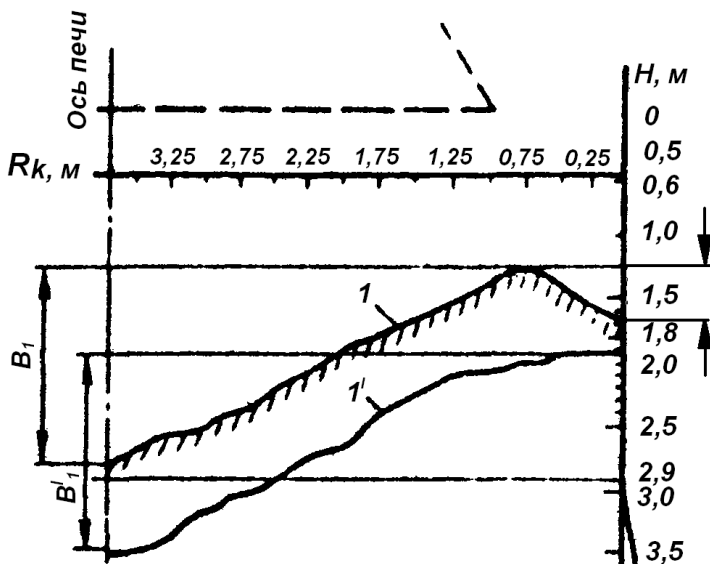
### **1.3 Результаты исследований параметров поверхности засыпи шихты в доменной печи**

Анализ информации, получаемой с помощью профилемеров различных конструкций, показал следующее. Использование радиоизотопного измерителя профиля (гамма-локатора) на доменной печи объемом 1719 м<sup>3</sup> завода им. Дзержинского [76] в 1972 году, наряду с теоретическими расчетами, подтвердило присутствие в центральной части колошника взвешенного слоя кокса, влияющего на конфигурацию поверхности засыпи. Использование этого профилемера позволило обнаружить перекося поверхности шихтовых материалов на колошнике печи, определить влияние на профиль поверхности материалов изменения количества дутья и влияние программ загрузки на глубину осевой воронки.



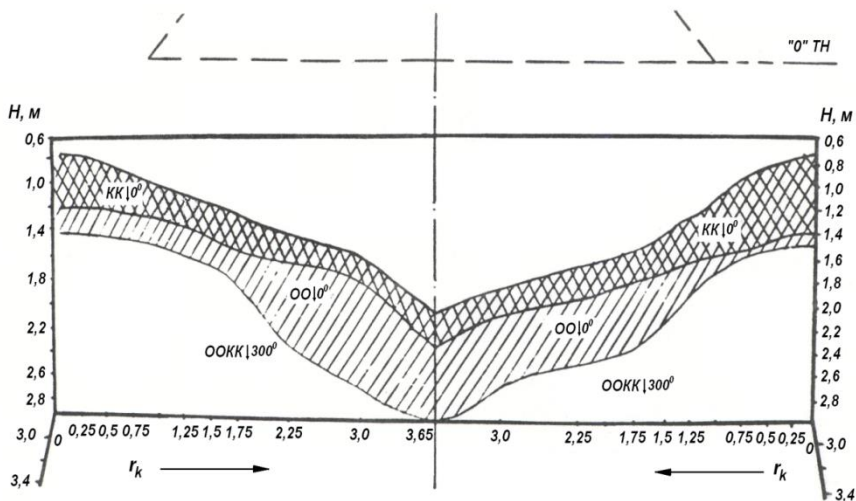
С помощью радиоизотопного профилемера РИАП-2М, установленного на ДП №3 АК «Тулачермет», определялись профили засыпи шихты до и после выгрузки подач основной программы загрузки – КРРК↓ (рис. 1.1), а также радиальное распределение слоев раздельно выгруженных рудной и коксовой частей подачи, без учета деформации исходного профиля засыпи шихты от воздействия выгружаемых шихтовых материалов (рис. 1.2). В ходе исследований была проведена серия одновременных измерений уровня засыпи в периферийной зоне печи на участке радиуса 0–0,5 м от стенки печи профилемером и электромеханическими зондами. Оценка результатов замеров показала достаточную их сходимость.

Промышленное использование радиоизотопного профилемера позволило получить информацию о реальных профилях поверхности засыпи шихты в печи и оценить их изменение при различных технологических воздействиях, а также определить значения углов откоса шихтовых материалов на работающей печи.



*1' и 1- профили засыпи шихты до и после выгрузки подачи*

**Рис. 1.1** – Профили поверхности засыпи шихты на колошнике доменной печи



$r_k$ ,  $H$  – радиус колошника и уровень засыпи

**Рис. 1.2** – Радиальное распределение слоев рудной и коксовой частей раздельной подачи  $OO\downarrow$ ,  $KK\downarrow$

При помощи радиоизотопного измерителя РИП-1, установленного на доменной печи Краматорского металлургического завода, производились измерения углов откоса поверхности, глубины воронки и скоростей опускания шихты по одному диаметру колошника. По ускоренному сходу поверхности шихты в соответствующей зоне контролируемого диаметра была произведена попытка определения степени уплотнения слоя материалов одной подачи после ее опускания в печь [42].

Радиолокационные профилемеры горизонтального исполнения, разработанные фирмами DDS, Matsushima, Paul Wurth, позволяют бесконтактно контролировать поверхность шихты в доменной печи по одному из радиусов, определять профиль поверхности и скорость опускания шихты между загрузками подач [50]. С помощью входящих в комплект устройств, параметры рельефа поверхности засыпи математически обрабатываются и иллюстрируются в форме графиков. Обработанные данные ряда последовательных замеров профиля засыпи шихты профилемерами фирмы DDS позволяют построить конфигурации слоев, соотношение высот слоев железорудной части шихты и кокса.

Результаты измерений используются для адаптации математических моделей радиального распределения шихты на колошнике доменной печи, что дает возможность корректировать программы загрузки.

Однако, достоверность оценки профиля поверхности засыпи шихты по одному из радиусов колошника с помощью горизонтально перемещающегося зонда довольно мала, кроме того, это не обеспечивает возможности расчета скоростей опускания шихтовых материалов в различных сечениях печи, т.к. полученные значения уровней засыпи не принадлежат одному профилю. Следует также отметить, что на основании информации, полученной с помощью такого профилемера, не может быть определена полная картина распределения шихты по сечению печи.

Результаты эксплуатации стационарно установленных микроволновых измерителей для замера уровня и профиля шихты на колошнике доменной печи (система Redscan) позволили получить информацию, которая содержит сведения о следующих параметрах: уровне засыпи шихты, определяемом как средняя величина уровней, измеряемых по четырем радиусам; толщине слоя шихтовых материалов, определяемой с учетом скорости их опускания; распределении по радиусу рудных нагрузок в последней подаче; профиле шихты, который представляется в виде графика уровней точек поверхности засыпи; отображение поверхности шихты в трехмерном пространстве, для чего используются данные одиннадцати микроволновых устройств [59]. Таким образом, в сравнении с другими профилемерами, с помощью системы Radscan может быть получена более полная информация о параметрах поверхности засыпи шихты.

Получение полного объема информации о параметрах поверхности засыпи должна была обеспечить установленная на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» стационарная система измерения профиля поверхности засыпи. Это вызвало необходимость разработки методов определения параметров поверхности засыпи и на их основе – информационной системы, которая позволит определить и представить на видеокдрах профили поверхности засыпи шихты по измеряемым диаметрам колошника между выгрузками порций, конфигурацию слоев шихтовых материалов, образованных за цикл загрузки, изменение скоростей опускания по измеряемым сечениям колошника, высоты слоев рудных материалов и кокса, отношение этих высот, а также параметры поверхности засыпи шихты по окружности печи [4].

Значительный объем исследований с использованием профилемеров направлен на определение углов наклона поверхности шихтовых материалов в доменных печах [77–80]. Выполненные в 30–50-е годы прошлого столетия на различных заводах замеры профиля поверхности засыпи материалов на колошнике перед их задувками показали, что угол воронкообразного откоса поверхности кокса к оси печи уменьшается от  $43^\circ$  (естественный угол откоса) до  $26^\circ$ , а железорудных материалов близок к естественному и равен  $34^\circ$  [78]. На доменной печи №5 завода Fukuyama (Япония) на основе измерений профиля засыпи шихты на колошнике определялись углы откоса поверхности шихтовых материалов на различных горизонтах шахты [79]. В работе [80] на основе экспериментальных исследований показано, что на действующей доменной печи, оснащенной КЗУ, поверхность засыпи может иметь три качественно отличающиеся разновидности, характеризующиеся углом откоса поверхности засыпи к оси печи: пологий угол откоса (не более  $12\text{--}14^\circ$ ) соответствует ровному сходу шихты и равномерному темпу загрузки; крутой угол откоса ( $30^\circ$  и более) соответствует ускоренному сходу шихты и высокому темпу загрузки; нулевой угол откоса или с наклоном к стенке колошника соответствует тугому ходу печи и замедленному темпу загрузки.

В 1988 г. на ДП №5 ОАО «Северсталь» ( $V_n=5500 \text{ м}^3$ ), оборудованной БЗУ фирмы “Paul Wurth”, ИЧМ были проведены исследования по определению углов наклона поверхности засыпи к оси печи с помощью установленного на печи вертикального электромеханического центрального зонда. Определенные углы откоса использовались в качестве входных параметров для математической модели радиального распределения шихтовых материалов на колошнике, разработанной фирмой DDS и использовавшейся на ДП №5 ОАО «Северсталь». В модель задавались следующие углы откоса шихтовых материалов: для всех порций кокса, кроме выгружаемых в центр печи:  $25^\circ$  – в сторону оси печи и  $15^\circ$  – в сторону стенки печи; для порций кокса, загружаемого в центр печи:  $27^\circ$  – в сторону стенки и  $0^\circ$  в сторону оси печи; для всех железосодержащих компонентов шихты:  $23^\circ$  – в сторону оси и  $13^\circ$  – в сторону стенки печи.

Анализируя результаты исследований поверхности засыпи шихты на колошнике доменной печи, выполненных с помощью профилемеров, следует отметить, что наиболее полная информация о состоянии поверхности засыпи шихты по всему сечению колошника и расчет основных параметров, отражающих динамику

ее изменения, могут быть получены с помощью стационарных (многоточечных) радиолокационных систем измерения профиля поверхности засыпи шихты. Получаемая с помощью профилемеров других конструкций информация не позволяет в полной мере отобразить состояние поверхности по всему сечению колошника.

#### **1.4 Результаты измерения скоростей опускания шихты на колошнике доменных печей**

Показатели доменной плавки в значительной степени зависят от организации условий движения, распределения и взаимодействия встречных потоков шихты и газа [83]. Изменение скоростей опускания шихтовых материалов по сечению печи на уровне колошника связано с закономерностями движения сыпучих тел. При этом, на величину скорости и направление траекторий движения оказывают влияние противодействие газового потока, сформированного и зависящего от параметров дутьевого режима и программы загрузки печи, теплофизические и восстановительные процессы плавки, а также периодичность накопления и отработки продуктов плавки. В то же время, под воздействием скоростей опускания шихты формируется профиль (рельеф) поверхности засыпи на колошнике печи, который, в свою очередь, существенно влияет на распределение шихтовых материалов и газового потока в печи, а в конечном итоге, на показатели плавки.

Большинство исследований по изучению движения шихты на колошнике доменной печи имеет чисто экспериментальный характер. Первое инструментальное исследование движения шихты в процессе плавки, проведенное С. П. Кинни в 1923 – 1929 г.г. на печи объемом  $700 \text{ м}^3$ , показало, что скорость опускания материалов в различных сечениях доменной печи не является постоянной и максимально увеличивается вблизи стен печи. Выполненные в дальнейшем исследования особенностей движения шихтовых материалов явились подтверждением того, что на доменных печах с конусными загрузочными устройствами при нормальном ходе печей наибольшая скорость схода шихты наблюдается в периферийной зоне или вблизи нее. При увеличении интенсивности плавки максимум скорости опускания шихты смещается в сторону оси печи [84]. Выполненные Д. В. Ефремовым, Н. И. Красавцевым, А. Н. Любаном и А. Н. Редько исследования на печах объема от  $1000$  до  $1300 \text{ м}^3$  показали, что распределение скоростей опускания шихты изменяется в достаточно широком диапазоне, иногда шихта по оси

печи опускалась с большей скоростью, чем у стенки печи [85]. При исследовании работы доменных печей, Д. В. Ефремовым и Н. И. Красавцевым был установлен различный характер распределения скоростей схода шихты, зависящий от их хода [86]. В 1935 г. Д. В. Ефремов, измерявший скорость движения материалов посредством грузиков, опущенных в печь, установил, что при ровном ходе печи средняя скорость опускания шихты составляет на периферии 3,9 м/ч, а по оси – не более 3,3 м/ч. По данным Н. И. Красавцева при ровном ходе печи скорости опускания материалов составляют 3,78 м/ч у стенки колошника, 5,04 м/ч над фурмами и 2,46 м/ч по оси печи, а при тугом ходе печи максимальная скорость наблюдается у оси печи – 3 м/ч, минимальная у стенки – 1,2 м/ч. Из данных А. Н. Редько следует, что опускание шихтовых материалов в периферийной части колошника происходит с большей скоростью, тогда как в центральной – с меньшей.

Аналогичные выводы о влиянии хода печи на распределение скоростей опускания шихтовых материалов по сечению колошника были получены в 1935–1939 г.г. лабораторией металлургии чугуна ЛПИ на доменных печах Магнитогорского завода, «Запорожстали» и «Азовстали» [87]. Изучение движения материалов осуществлялось двумя способами: непрерывным наблюдением за опусканием грузика, который вводился в печь через боковые отверстия, расположенные над уровнем засыпи шихты, а также последовательным определением во времени изменений поверхности засыпи материалов в периоды между загрузками подач в печь. Установлено, что под влиянием подвисаний, осадок и состояния рабочего профиля печи, скорость опускания шихты в различных точках сечения печи меняется. Во время ровного хода печи имеет место ярко выраженный периферийный сход материалов, а в условиях “тугого” хода ускоряется сход материалов в промежуточной зоне печи. При сильном развитии подвисаний шихты с последующими обрывами, которые могут происходить в периферийной, центральной или промежуточной зонах сечения печи, скорость опускания материалов зависит от их характера. Так, на доменной печи №1 Магнитогорского завода при ее работе с подвисаниями и обрушениями шихты, скорость опускания изменялась, в среднем, от 2,4 до 12 м/ч.

В учебном пособии А. Д. Готлиба [81] показано, что для ровно работающей печи большого объема скорость опускания шихты у стен колошника составляла 4,08 м/ч, а у оси – 2,46 м/ч.

Авторами работ [77, 78] сделан обобщающий вывод о том, что оптимальному распределению скорости по диаметру колошника соответствует максимальная ее величина в промежуточной зоне, т.е. в вертикальном кольце столба шихты с наибольшей рудной нагрузкой, а на периферии и в центре печи скорость схода должна быть меньше [78]. При излишне развитом периферийном потоке газов и слабом разрыхлении осевой зоны скорость опускания материалов у стенки печи увеличивается, а в центре уменьшается. При подгруженной периферийной и относительно свободной от рудных материалов осевой зоне печи скорости опускания в этих зонах уменьшаются, а в некоторых случаях максимальная скорость наблюдается в промежуточной или осевой зонах печи. В осевой зоне максимальные скорости опускания наблюдались при “тугом” ходе печи [77].

На печи объемом 1719 м<sup>3</sup> завода им. Дзержинского при измерениях скорости схода шихты, осуществляемых с помощью гамма-профилемера, установлено, что скорость опускания шихты в периферийной зоне в 1,5–2,0 раза больше, чем в осевой. При этом, скорости в различных сечениях колошника изменялись от 3 до 9 м/ч. В результате, к началу выгрузки очередной подачи, профиль поверхности засыпи по диаметру колошника приобретал почти горизонтальную форму [88]. Исследования, проведенные на доменных печах Днепродзержинского металлургического комбината [89], позволили установить, что скорость опускания шихты на периферии больше, чем у оси: на периферии в рудном “гребне” ее величина составляла около 5 м/ч, в центре печи – 3,8 м/ч. При этом разница скоростей опускания шихты по радиусу колошника увеличивалась с увеличением расхода дутья.

При проведении исследований на доменной печи завода в Швельгерне (Германия) определялись скорости опускания поверхности засыпи на периферии и по оси печи в зависимости от величины рудной нагрузки [90]. Установлено, что при уменьшении рудной нагрузки за счет увеличения доли кокса в периферийной зоне от 12 до 24% скорость схода шихты в этой зоне изменялась от 8,6 до 8,7 м/ч. При тех же условиях скорость схода шихты по оси печи увеличивалась от 5,76 до 7,2 м/ч, хотя доля кокса в осевой зоне сохранялась практически постоянной – 38–40%.

На доменной печи объемом 2014 м<sup>3</sup>, оборудованной КЗУ, измеренная с помощью сканирующего рентгеновского профилемера скорость опускания шихты составила: на периферии – 6,06–6,24 м/ч, в рудном гребне – 5,22–5,4 м/ч, по оси печи – 5,94–6,0 м/ч [78]. Установлено, что наиболее медленное опускание

шихты в рудном “гребне” (промежуточной зоне), несущем максимальную рудную нагрузку, предопределяет завершенность теплофизических и восстановительных процессов в сухой зоне шахты при наименьших материально-технических затратах. Согласно экспериментальным данным, полученным на доменной печи завода в г. Оита (Япония), наименьший расход топлива на выплавку чугуна был получен при опускании столба шихты с уменьшением скорости от оси к периферии [91].

Авторами работы [86] установлено, что при низкой интенсивности плавки наибольшие скорости опускания шихтовых материалов на колошнике доменной печи наблюдаются в периферийной зоне. С увеличением расхода дутья максимум величины скорости опускания шихты отдалается от стен колошника на 600–1000 мм, а при форсировании плавки перемещается к осевой зоне печи.

Изучение распределения скоростей движения материалов в столбе шихты, выполненное Л. З. Ходаком и Ю. И. Борисовым [92] на модели доменной печи объемом 1386 м<sup>3</sup> (масштаб 1:20) показало, что в осевой части колошника материал движется быстрее, а ближе к стенам его движение замедляется. Опускание материала в верхней части шахты ускоряется у стен, при этом скорости опускания на периферии начинают превышать скорости в центре с максимальными их значениями над фурменными очагами. Различие в радиальном распределении скоростей по высоте печи вызвано различной порозностью материалов в объеме столба шихты, которая обуславливает особенности распределения шихты и движения восходящего газового потока.

Наибольшая скорость опускания шихтовых материалов в центральной зоне сечения колошника подтверждена и в исследованиях [49]. На доменной печи №3 АК «Тулачермет» объемом 2002 м<sup>3</sup>, оборудованной двухконусным загрузочным устройством, с помощью радиоизотопного профилемера (РИАП-2М) установлен характер изменения скоростей опускания шихты по радиусу печи. Скорость опускания шихты в исследуемом периоде работы печи возрастала от 5,94 м/ч на периферии до 6,90 и 7,50 м/ч в промежуточной и осевой зонах. Это являлось следствием уменьшения протяженности фурменных очагов и приближения фокуса горения к стенке печи из-за пониженного расхода дутья и скорости его истечения из фурм. При этом количество горновых газов в периферийной зоне увеличивается, что приводит к уменьшению скорости опускания шихты в этой зоне [49].



В ходе исследований на одной из Магнитогорских доменных печей, работающей в форсированном режиме, с помощью рентгеновского импульсного профилемера, также было установлено, что скорость опускания шихты в кольцевых зонах сечения колошника изменяется с постепенным возрастанием от оси печи к периферии (от 2,64 до 8,64 м/ч), с максимальными значениями ее в промежуточной зоне (10,32 м/ч) [93].

Анализ приведенных результатов экспериментальных исследований показывает существенную зависимость распределения скоростей опускания шихты по сечению доменной печи от хода доменной печи. Выполненные на доменных печах исследования опускания шихтовых материалов в ходе плавки позволили установить наличие взвешенного слоя над поверхностью засыпи шихты, возникающего при определенных режимах работы печи. В тех местах верхней части шахты, где газы идут с наибольшей скоростью, шихтовые материалы могут подхватываться силой восходящей струи газов и удерживаться во взвешенном состоянии [94]. Как отмечено в работе японских исследователей [94], последствиями влияния газового потока на состояние поверхности засыпи шихты являются сдвиг кокса к оси печи, а также кратковременный переход его во взвешенное состояние. Возможность перехода материалов в псевдооживленное состояние в верхней части печи отмечена также в работе [92].

Из исследований, проведенных на доменной печи с использованием гамма-профилемера [88] следует, что характер диаграмм профилемера в осевой зоне подтверждает скопление в ней шихтовых материалов преимущественно крупных фракций, обуславливающих развитие центрального газового потока в печи и соответствующую крупнокусковую структуру столба шихты с вспучиванием ее поверхности и переводом материалов во взвешенное состояние при чрезмерной форсировке хода печи. Возможность возникновения «кипящего слоя» отмечена в работе В. М. Клемперта [95]. В работах ряда исследователей [96] и [78] показано, что уплотнение периферийного кольца после выгрузки материалов с конуса приводит к смещению газового потока к оси печи. В результате чего скорость газа в центральной верхней части шахты кратковременно возрастает в 1,35–1,45 раза. Описанный характер уплотнения периферийного кольца материалов, перераспределение газа по сечению в верхней части шахты, растекание трапецевидных торов подтверждается показаниями профилемера, фиксирующего частые «кипения» слоя шихты в центре печи.

При исследованиях опускания шихтовых материалов в процессе доменной плавки особое внимание уделялось влиянию выпусков продуктов плавки на распределение скоростей опускания шихты по сечению печи. Так, в результате исследований, выполненных на доменной печи объемом  $3000 \text{ м}^3$  [97] установлено, что средняя скорость опускания шихты в периферийной зоне возрастала только в начале выпуска. Во второй половине выпуска и в интервале накопления продуктов плавки средняя скорость на периферии практически постоянна. В осевой зоне в интервале выпуска происходит увеличение средней скорости опускания шихты, но ее максимум наблюдается во второй его половине, во время снижения уровня шлака. В работе [84] показано, что условия движения шихты на печах с КЗУ и БЗУ существенно различаются. В ходе исследований, проведенных на ДП №6 ( $V_{\text{П}}=3200 \text{ м}^3$ ) Новолипецкого металлургического комбината, оборудованной БЗУ с использованием системы слежения за распределением скоростей опускания шихты по радиусу колошника в течение 70 циклов непрерывной ее загрузки установлено, что средняя величина скорости опускания изменяется от 7,2 до 11,7 м/ч. По мнению авторов, значительные колебания средней скорости схода шихты зависят от условий выпуска продуктов плавки [98].

Таким образом, анализ результатов исследований [49, 77, 78, 82–99], проведенных в 1923–1995 гг. на действующих доменных печах объемом  $700\text{--}3200 \text{ м}^3$ , оборудованных, в основном, конусными загрузочными устройствами, при различных параметрах режима плавки и их ходе, полученных с помощью уровнемеров и профилемеров различных конструкций, а также физических моделей, позволил установить фактические средние величины скоростей опускания шихты по сечению колошника. Установлено, что при ровном ходе печи с конусным загрузочным устройством скорость опускания шихты линейно увеличивается по радиусу колошника от центра к периферии. Значения скоростей опускания шихты изменяются в широких пределах: в периферийной (пристеночной) зоне печи от 3,4 м/ч до 15,0 м/ч и в осевой (центральной) – от 2,5 м/ч до 13,8 м/ч, при этом средняя величина скорости опускания шихты изменяется от 1,2 м/ч до 12,0 м/ч.

В литературных источниках практически отсутствуют сведения о результатах экспериментального определения скоростей опускания шихтовых материалов на колошнике доменных печей, оснащенных БЗУ. Как правило, скорости опускания шихтовых материалов определяются расчетным путем с

принятием при этом различных допущений о характере опускания шихты.

## **1.5 Исследования движения шихтовых материалов в шахте доменной печи**

Существенное влияние на формирование структуры столба шихтовых материалов, а, следовательно, на прохождение процессов восстановления и теплообмена в доменной печи, оказывает движение шихты и распределение скоростей ее опускания по сечению столба материалов на различных горизонтах [100].

Изучение вопросов формирования структуры столба шихтовых материалов в доменной печи началось с попыток выяснить движущую силу, вызывающую перемещение материалов [101, 102].

По мнению С. П. Кинни, причиной движения шихты в доменной печи является горение кокса у фурм, приводящее к наибольшей скорости движения шихты над зонами горения [85]. В те годы печи работали на плотной сырой руде и при высоком удельном расходе кокса, поэтому сокращение объема за счет горения кокса значительно превышало таковое за счет плавления руды.

Возможности исследований расширились с началом применения радиоактивных изотопов, позволивших следить за движением куска на протяжении всего пути от уровня засыпи до места его расплавления или сгорания. Первая попытка применения радиоактивных изотопов для исследования движения материалов в доменной печи принадлежит С. К. Трекало [103]. В ходе проведенных им исследований максимальные скорости наблюдались в осевой зоне печи. Однако причины ускоренного центрального движения шихты остались невыяснены, хотя отмечалось, что максимальные скорости в центре наблюдались на печах, работавших с пониженной интенсивностью при перегрузке периферийных зон мелкими шихтовыми материалами.

И. Г. Половченко усовершенствовал методику применения радиоактивных изотопов и на основе полученных данных установил, что на участке от колошника до горизонта, соответствующего середине распара, скорость опускания шихты вначале мало изменяется, затем заметно снижается и вновь возрастает в заплечиках [104]. Автор это объясняет тем, что в верхней части печи материалы опускаются в результате горения

кокса у фурм и оплавления руды, а также изменением конфигурации рабочего пространства. Более поздние исследования И. Г. Половченко и В. И. Узлюка показали, что на распределение скоростей опускания материалов существенное влияние оказывает интенсивность плавки. Ими установлено, что, если при низкой интенсивности наблюдается практически равномерное движение шихты по всему сечению, то по мере повышения интенсивности плавки периферийные участки начинают опускаться быстрее [105].

Близкие результаты были получены при исследовании работы доменных печей «Азовстали» с помощью радиоактивных изотопов [106]. В отличие от И. Г. Половченко, Г. Г. Лукашев и другие считают возможным значительное опережение одних материалов другими. Аналогичные выводы делал М. А. Павлов [107], объясняя существование этого явления различием удельных весов составляющих шихты. Однако, исследования, проведенные Г. М. Малаховым [108], Н. Г. Дубыниным [109] показали, что движение кусков с разными удельными весами происходит синхронно.

Результаты исследований движения шихты на моделях доменных печей во многом противоречивы. Если по В. А. Сорокину и Н. Н. Попову [110] слоистое расположение материалов сохраняется лишь в верхней части шахты, то М. А. Стефанович и П. П. Бобков наблюдали его вплоть до распара [96].

Из анализа литературных источников следует, что «бункерный подход», т.е. признание аналогии движения кокса к фурменным очагам и истечения сыпучих материалов через отверстия бункеров, распространен среди исследователей [101]. Установленная Г. М. Малаховым особенность движения и истечения сыпучих сред из различного вида бункеров с образованием эллипсоидов разрыхления вблизи выпускных отверстий была применена для условий движения шихтовых материалов в рабочем пространстве доменной печи [108]. Б. С. Фиалковым [85] и Е. Б. Максимовым [111] разработаны основные положения механизма истечения шихтовых материалов через отверстия. Однако, в разработанной авторами [85, 111] математической модели не учитывается воздействие на движение материалов стенок печи и потока газа, плавления материала и расхода углерода на науглероживание расплавленного металла. Данные явления, наряду с горением и газификацией углерода в фурменных очагах, являются определяющими причинами движения материалов в доменной печи, формируя свободный

объем, в который опускается материал. Согласно работе [100], значительная доля пустот, вызывающих опускание шихты, формируется в зоне плавления материала.

В соответствии с современными представлениями [100], движение материала определяется системой вертикальных сил, основными из которых являются вес материала над пластичной зоной, трение материала о стенки печи, верхний перепад давления между колошником и пластичной зоной и выталкивающие силы, действующая на малоактивный коксовый конус, погруженного в чугун. Именно соотношение этих сил и наличие пустот в слое материала определяют стабильность опускания шихты в доменной печи.

В процессе проведения исследований на модели доменной печи, выполненной в масштабе 1:25, было установлено, что при условиях, имеющихся в доменной печи, наблюдается пересечение эллипсоидов разрыхления, начинающееся с горизонта, соответствующего распару или верху заплечиков [112]. При увеличении размеров выпускных отверстий высота эллипсоидов уменьшается, к этому же ведет и увеличение числа отверстий. Кроме того, в ходе исследований было установлено, что опережения одних кусков другими, вызванного различием их удельных весов, в доменной печи не наблюдается.

Теоретических работ, посвященных математическому описанию движения материалов в слое, относительно мало и первоначально они базировались на использовании модели сплошной среды для анализа равновесного состояния слоя [113, 114]. Поскольку число неизвестных в этих моделях превышало число уравнений, для их решения привлекались дополнительные эмпирические соотношения, допущения о достижении в слое предельного равновесия и т.д. Экспериментальная проверка не подтвердила результатов решения уравнений сплошной среды, в связи с чем, интерес к их использованию уменьшился.

Идея использования моделей сплошной среды к описанию движения материала в доменной печи в последнее время снова стала привлекать внимание исследователей. Наиболее подробное описание механики движения материалов в доменных печах на основании модели сплошной среды приведено в работе [115]. Модель включает уравнения баланса массы и баланса импульсов материала (уравнение движения слоя). Для описания реологических свойств движущегося слоя используется упруго-вязкопластическая модель Шведова. Сравнение результатов теоретических исследований с результатами изотопных

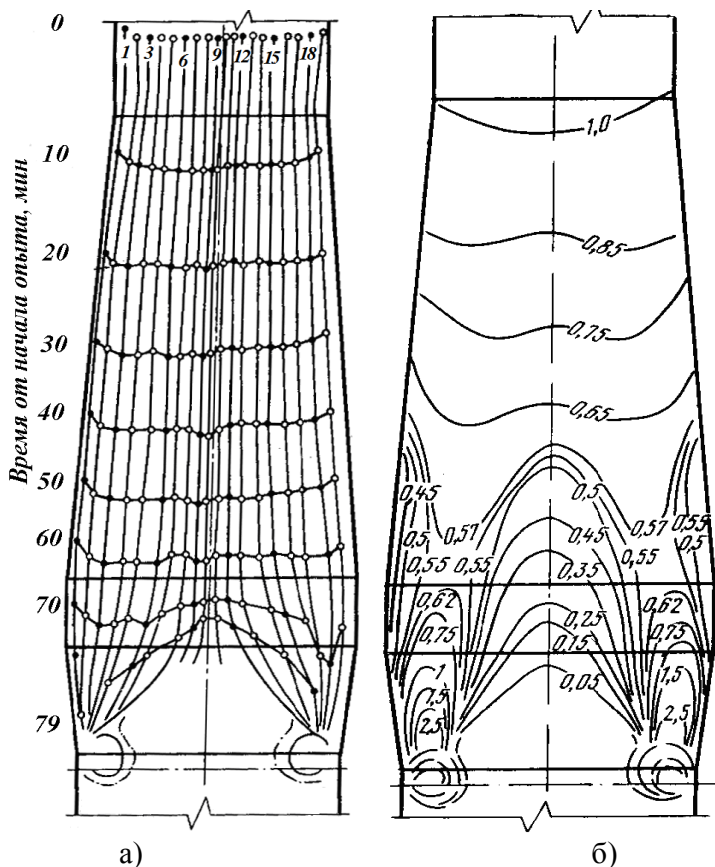
экспериментов, позволяют отметить только качественное их совпадение.

Исследования, выполненные на моделях [116], свидетельствуют о возможности равномерного опускания шихты по сечению в объеме «сухой» зоны шахты. По мнению авторов, заполнение образующегося от расширения шахты дополнительного объема происходит в результате радиального растекания слоев шихты, сформированных на колошнике. Это происходит под действием давления вышележащих материалов и обусловлено относительно высоким коэффициентом внутреннего трения шихты.

Наибольшее внимания заслуживает приведенный в статье Л. З. Ходака и Ю. И. Борисова [92] анализ характера перемещения шихтовых материалов в доменной печи. Анализируя результаты выполненных с помощью радиоактивных изотопов исследований, они отмечают, что в одних случаях максимальные средние скорости опускания шихты наблюдались в центральных зонах печи [103, 117], в других – на середине радиуса [104, 118]. Причем, в последних случаях область максимальных скоростей увязывалась с месторасположением фокуса зон горения. Однако причины ускоренного центрального движения шихтовых материалов остались невыясненными. В работе [92] приведены результаты анализа, выполненного в Институте металлургии им. А. А. Байкова с привлечением методов моделирования, различных экспериментальных данных об исследовании движения шихты в доменных печах объемом до 1386 м<sup>3</sup>.

Как следует из результатов этого анализа, в центре верхней части шахты (рис. 1.3, а) материал перемещается равномерно и только вертикально и уплотняется, а ближе к стенкам он подвергается одновременно также и горизонтальным сдвигам, в результате которых траектории частиц следуют очертаниям профиля. На уровне низа шахты и в распаре на движении частиц уже сказывается влияние зон циркуляции, вследствие чего в центральной зоне, выше и вокруг неактивного конуса материалов в горне, траектории опускания интенсивно искривляются.

Вертикальный разрез поля скоростей движения материалов по данным моделирования представлен на рис. 1.3, б. В цилиндрической части колошника сыпучее тело при наличии откосов на периферии и в центре опускается неравномерно: в центре материал движется быстрее, ближе к стенам его движение плавно замедляется. Перемещение частиц в верхнюю часть шахты сопровождается ускорением опускания у стен, при этом скорости у периферии начинают превышать скорости в центре.



**Рис. 1.3.** Траектории и продолжительность опускания частиц (а) и расположение линий равных скоростей  $\omega/\omega_0$  (б) по данным моделирования

В целом, до середины шахты наблюдается равномерное замедление движения по всему сечению столба, а ближе к уровню распара движение в центральных и самых периферийных зонах начинает интенсивно тормозиться; при этом изотакхи приобретают сложную кривизну и симметрию относительно вертикальной оси. Начиная с горизонта распара и ниже, движение частиц над зонами циркуляции прогрессивно ускоряется и происходит резкий прогиб слоев, а опускание над центральной зоной горна соответственно замедляется. Над уровнем фурм по периферии образуются эллипсоиды равных скоростей, вершины которых несколько

отклоняются к центру.

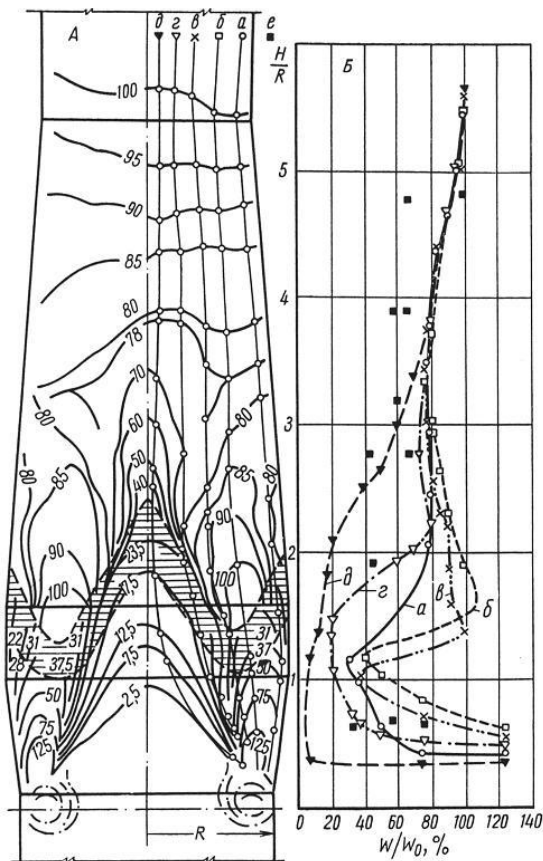
Как показано в [92], приведенные выше результаты моделирования получены в предположении, что источником движения столба шихты является газификация кокса в зонах горения. Для условий, учитывающих совместное влияние на опускание шихты процессов горения кокса и плавления руды, итоговая схема расположения линий равных скоростей (скорость опускания уровня засыпи на колошнике принята за 100) представлена на рис. 1.4,А. Установлено, что шихта в печи опускается неравномерно со знакопеременными ускорениями, в особенности в периферийных областях, где зоны разрыхления располагаются в два яруса. Уровень расположения и форма пояса плавления определяются совместным влиянием процесса горения кокса у фурм и программой загрузки материалов в печь. Поэтому место расположения зон разрыхления, в которых интенсивно искривляются слои и ускоряется опускание рудных кусков, по мнению исследователей, можно достаточно эффективно регулировать «сверху». Иными словами, изменением программы загрузки можно регулировать «сверху» время пребывания рудных материалов в шахте печи, не меняя интенсивности горения кокса.

Изменение скоростей опускания для различных траекторий движения, полученное по данным моделирования, показано на рис. 1.4,Б. Кокс и рудные материалы выше зоны плавления движутся вначале замедленно, а затем с ускорением, в особенности на расстоянии 0,5–0,7 R от центра. Лишь в самом центре столба материалы опускаются с постепенно уменьшающейся скоростью. Ниже пластичной зоны расплавленные рудные материалы стекают в горн с высокими скоростями (на рис. 1.4, Б это не показано), а движение твердых кусков кокса в начале резко тормозится, но затем ускоряется, так что в зоны циркуляции кокс поступает со скоростью, превышающей начальную на колошнике.

Для сопоставления с результатами моделирования на рис. 1.4, Б нанесены данные из работ [104, 106, 117] о скоростях опускания материалов по периферии доменных печей (их значения на рисунке обозначены «■»). Экспериментально установлено [106], что при среднем времени пребывания шихты в печи 4,5–6,7 ч (по данным [104], это время составляет 6,8–7,5 ч) материал проходит область умеренных температур (условно 0,75 объема шахты) примерно за 2,5–3,0 ч. Наибольшее различие в продолжительности опускания наблюдается на участке от распара до фурм (от 0,7 до 3,0 ч), где движение может быть ускорено в результате перехода в жидкую фазу, либо замедлено при опускании кусков между



фурмами или в центральных зонах.



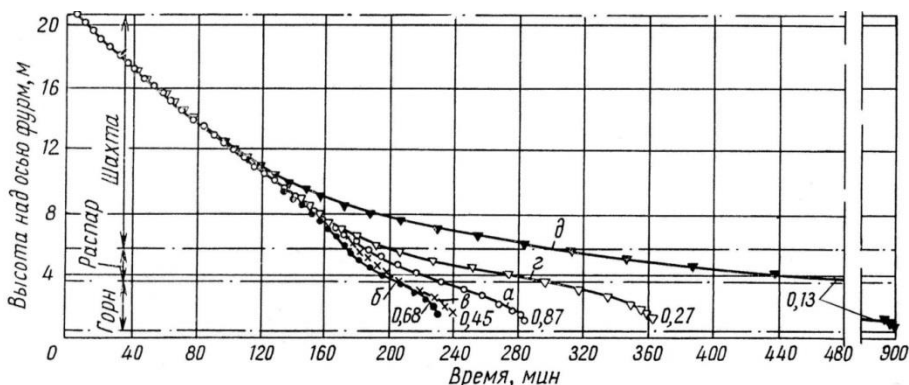
**Рис. 1.4.** Схема поля скоростей (А) и изменение скоростей опускания по различным траекториям а – д (Б) при моделировании движения столба материалов доменной печи под комплексным воздействием процессов плавления и горения:  $\omega_0$  – средняя скорость опускания уровня засыпи;  $\omega$  – мгновенная скорость опускания отдельной частицы;  $R$  – радиус горна;  $H$  – высота над осью фурм

На рис. 1.5 приведено расчетное время пребывания материалов, движущихся в таких же условиях и по тем же траекториям (а-д), которые показаны на рис. 1.4.Б. Как следует из рис. 1.5, различие между продолжительностью опускания в середине радиуса (в), при движении по периферии (а) и вдоль оси

столба шихты (д), которое начинается с нижней половины шахты, возрастает ниже уровня распара.

Основываясь на выполненном анализе, авторами работы [92] сделано заключение о том, что средние величины скоростей опускания столба шихты (по измерениям на поверхности засыпи) и общее время пребывания материалов в объеме печи (найденное, например, с помощью радиоактивных изотопов) не отражают характерных особенностей перемещения столба сыпучих материалов в доменном процессе, которые обуславливаются комплексом одновременно протекающих физико-химических явлений. Значительное влияние на характере траекторий движения и вертикального поля скоростей оказывает изменение рабочего профиля печи, а также распределение материалов на колошнике.

Анализ литературных источников позволяет заключить, что, несмотря на значительный прогресс в области исследования механики движения столба шихтовых материалов в доменной печи, до сих пор отсутствуют надежные экспериментальные данные и математические модели для определения основных закономерностей движения шихты. Оснащение доменных печей промышленными средствами измерения профиля поверхности засыпи (профилемерами) открывает широкие возможности исследования фактических величин и соотношений скоростей опускания шихты по сечению колошника в доменных печах разного объема при различных режимах плавки для определения возможного диапазона их изменения и характера распределения.



**Рис. 1.5.** Время пребывания в печи шихтовых материалов, движущихся по различным траекториям (а – д – как на рис. 1.6; цифры у кривых – расстояние от оси в долях радиуса колошника; расчет по результатам моделирования)

## ГЛАВА 2

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ И ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВКИ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЗАСЫПИ НА КОЛОШНИКЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

#### 2.1 Представление информации о параметрах профиля поверхности засыпи шихты на колошнике доменной печи

Эффективность использования получаемой от профилемера информации технологическим персоналом для принятия решений по управлению ходом доменной плавки и осуществления корректировки программ загрузки печи, а также исследователями при изучении особенностей процессов загрузки и распределения материалов на поверхности засыпи определяется совершенством системы расчета и представления этой информации. Основываясь на опыте использования стационарной системы на ДП №9 «Криворожстали», сформулированы требования к получаемым с помощью профилемеров данным и рассчитанным на их основе параметрам поверхности засыпи, которые должны содержать информацию, достаточную для ее применения при разработке способов контроля, прогноза и управления ходом доменной плавки. Требования к представлению информации профилемера положены в основу информационной системы, реализованной в составе АСУ ДП №9, видеокадры которой приведены на рис. 2.1–2.6.

Согласно требованиям, получаемая профилемером информация, должна содержать:

1. Фактическое распределение шихтовых материалов на колошнике доменной печи характеризует профиль поверхности засыпи, определяемый в результате непосредственного измерения профилемером расстояния до поверхности засыпи шихты (рис. 2.1) [7]. При использовании различных программ загрузки шихтовых материалов изменение результирующего за цикл загрузки профиля поверхности засыпи является важной информацией о распределении газового потока и об изменениях хода доменной печи. Форма профиля засыпи шихты существенно влияет на тепловую нагрузку на стенки печи, стойкость футеровки, расход топлива [55]. По показаниям измерителей, входящих в систему, технолог может наблюдать обрывы шихты в различных сечениях печи. Важными параметрами профиля поверхности засыпи

являются: углы наклона поверхности [119], а также глубина и смещение осевой воронки относительно оси печи, характеризующее особенности ее хода. Например, при развитом осевом газовом потоке печи, осевая воронка характеризуется большими, чем на остальной части радиусов, значениями углов откоса материала. Смещение воронки относительно оси печи свидетельствует о нарушении хода печи, и как следствие, уменьшении ее производительности (рис. 2.2) [4, 120, 121].

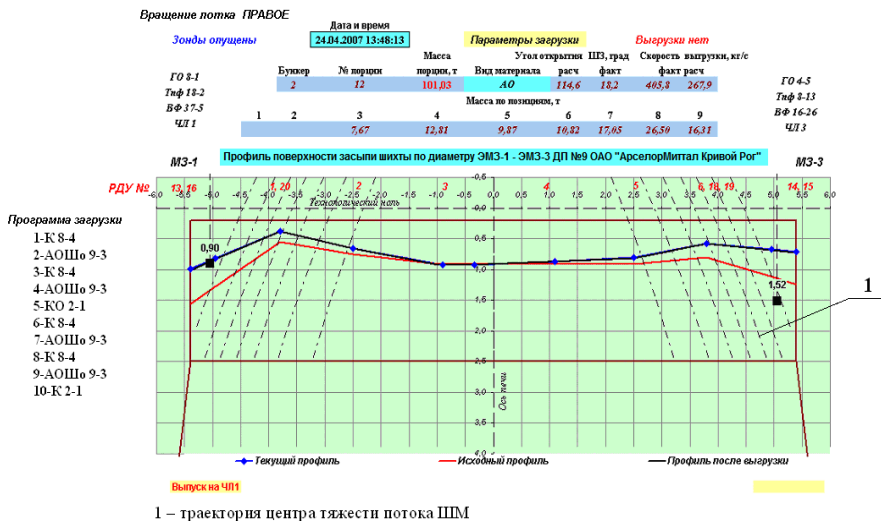
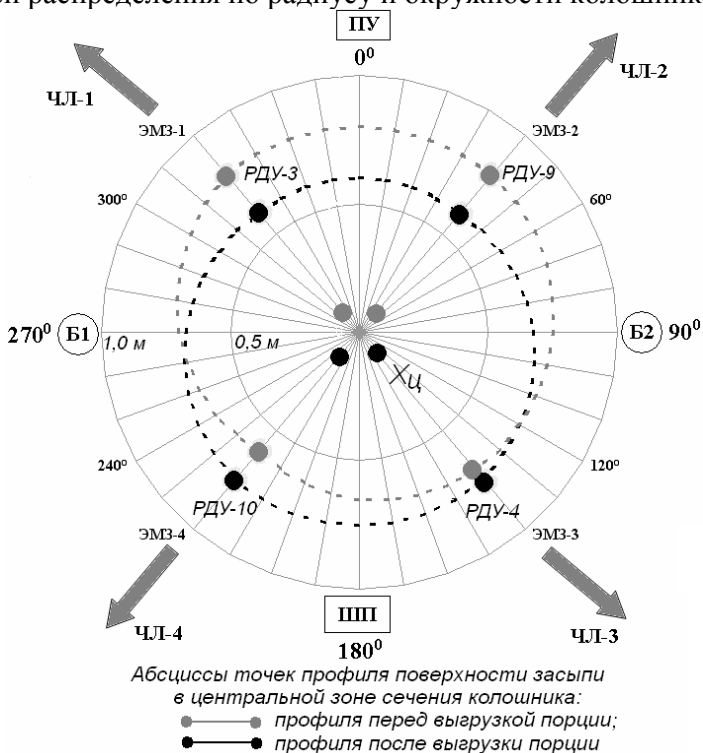


Рис. 2.1. Видеокадр профилей поверхности засыпи перед и после выгрузки порции шихтовых материалов

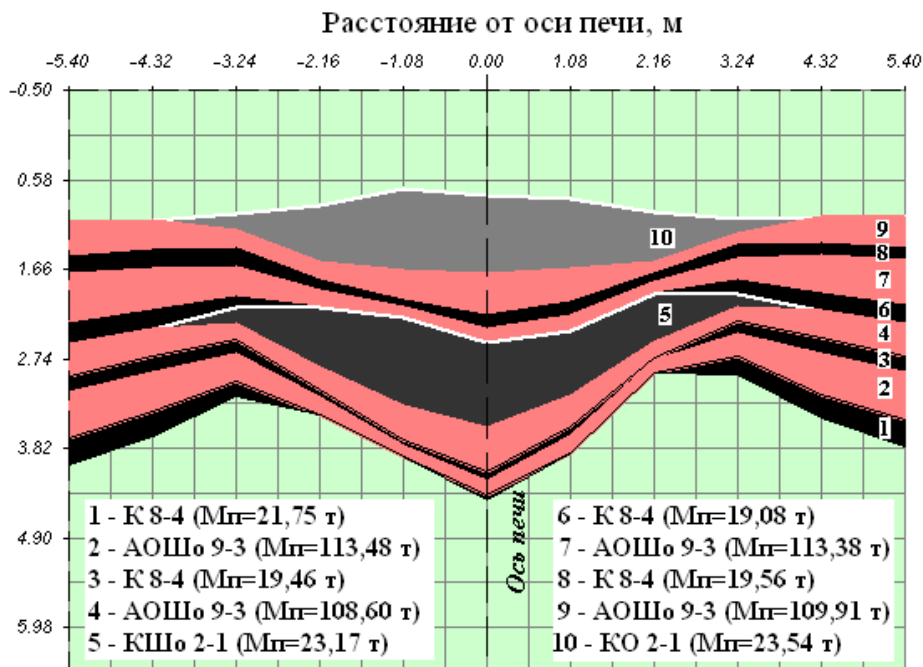
2. Важной, не только для технологов цеха, но и для исследователей, является информация об образованных за цикл загрузки слоях шихтовых материалов (рис. 2.3). Форма и высота этих слоев характеризуют образованную за цикл загрузки структуру столба шихтовых материалов на колошнике доменной печи и являются исходной информацией для исследования ее изменения по высоте шахты печи. Параметры сформированных за цикл загрузки слоев являются основой для корректировки, либо изменения программы загрузки, что имеет особое значение в случае применения многокомпонентной шихты, используемой, например, на ДП №9. Полученная с помощью профилемера информация об образованных за цикл загрузки слоях, является

исходной для расчета объемов материалов в различных сечениях колошника, на основании которых корректируется расчет показателей распределения по радиусу и окружности колошника.

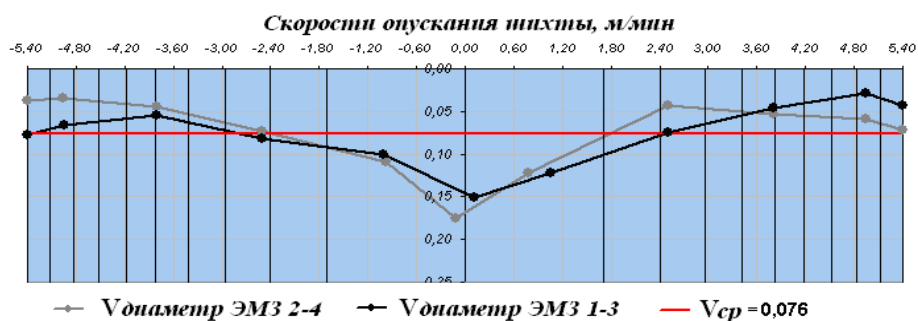


**Рис. 2.2.** Видеокادر смещения воронки профиля поверхности засыпи до и после выгрузки порции шихтовых материалов.

3. Одним из основных параметров, характеризующих ход печи, является скорость опускания шихтовых материалов (рис. 2.4). Определение скорости опускания шихты в различных сечениях колошника позволяет оценить характер распределения газового потока по сечению печи и особенности ее хода [102]. Опыт эксплуатации радиолокационного профилемера показал, что при используемых на печи программах загрузки и газодинамическом режиме плавки на поверхности засыпи после выгрузки ряда порций образуется взвешенный слой материалов,



**Рис. 2.3.** Видеокадр конфигурации слоев шихтовых материалов за цикл загрузки



**Рис. 2.4.** Видеокадр распределения скоростей опускания шихты по диаметрам печи за цикл загрузки

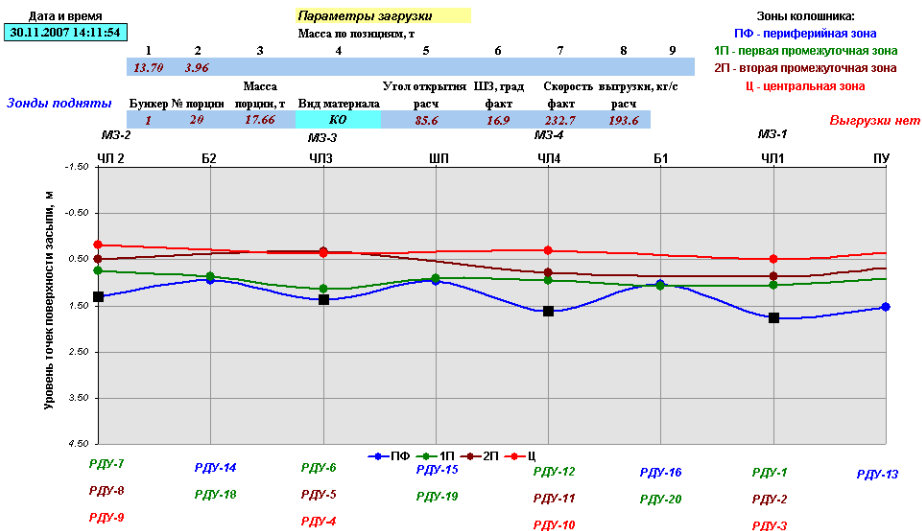
сконцентрированный, в основном, в осевой зоне сечения колошника. Зафиксировать процесс образования взвеси над поверхностью засыпи возможно в результате анализа характера изменения ежесекундных значений скорости опускания шихты в осевой зоне печи, что может служить показателем напряженности газодинамического режима (признаком наличия взвешенного слоя) и в последующем быть использовано для обоснованного выбора давления колошникового газа или корректировки программы загрузки. Скорость опускания шихты в осевой зоне сечения колошника является также необходимым параметром, с использованием которого могут быть разработаны способы прогнозирования теплового состояния печи и контроля загромождения горна. Скорость опускания шихты в периферийной и промежуточной зонах колошника является необходимым параметром для разработки приемов регулирования окружного распределения шихтовых материалов и газов.

4. Оценка перекоса поверхности засыпи шихты по окружности печи (окружного распределения) осуществляется по изменению уровня засыпи в измеряемых сечениях колошника (рис. 2.5). Измерение и оценка окружного распределения уровней поверхности засыпи в различных сечениях колошника позволяют обоснованно выбирать приемы управления и оценивать эффективность воздействий, направленных на выравнивание окружного распределения.

5. Распределение шихтовых материалов на колошнике может быть выполнено по относительным величинам рудных нагрузок, которые может характеризовать отношение высот слоев железорудных материалов и кокса –  $H_p/H_k$ . Правомочность этого подтверждена экспериментальными исследованиями, в результате которых установлена взаимосвязь рассчитанных с помощью информации профилемера отношения высот железосодержащих материалов ( $H_p$ ) и кокса ( $H_k$ ) по радиусу колошника ( $H_p/H_k$ ) с долей  $CO_2$  в радиальном газе и рудной нагрузкой, рассчитанной с помощью модели радиального распределения ИЧМ, с коэффициентом корреляции  $r_{x,y} = 0,9$ . Информативной является также величина относительной высоты слоя кокса, определяемой отношением высот слоя кокса к суммарной величине высот железосодержащих материалов и кокса  $H_k/(H_k + H_p)$ .

Как показано в работах [55, 122, 123], это отношение, характеризующее долю кокса в зонах сечения колошника, в совокупности с тепловыми нагрузками на элементы системы охлаждения является показателем изменения распределения

потоков газов в печи. На рис. 2.6 представлена информация об изменении высот слоев, образованных после выгрузки порций железосодержащих материалов, кокса, а также их отношения за цикл загрузки печи по диаметру колошника, на котором выполняются измерения.

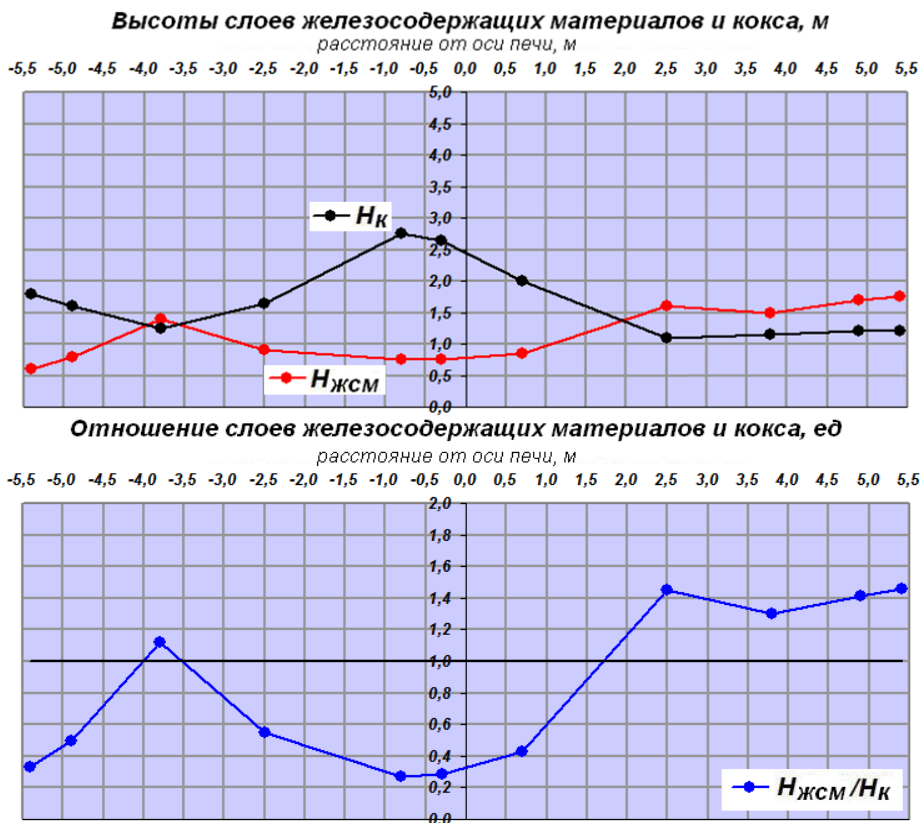


*РДУ-1 ... 20 – измерители уровня, установленные в секторе:  
 ЧЛ1 ... 4 – чугунных леток, МЗ-1 ... 4 – механических зондов, ШП – шихтоподачи, Б1 ... 2 – бункеров БЗУ, ПУ – пылеуловителей*

**Рис. 2.5.** Видеокادر изменения уровней точек поверхности засыпи по окружности колошника

По результатам эксплуатации системы и выполненных исследований информационная система отображения информации о параметрах поверхности поверхности засыпи шихты на колошнике была усовершенствована на основе разработанных специальных методов их расчета [4, 119, 120, 126–130, 132, 133].





**Рис. 2.6.** Видеокадр изменения высот слоев железосодержащих материалов и кокса, а также их отношения по диаметру колошника за цикл загрузки

## 2.2 Требования к установке систем измерения профиля поверхности засыпи

### 2.2.1 Особенности установки систем на колошнике доменной печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством

Начиная с 2003 г. доменные печи Украины оснащаются радиолокационными системами измерения профиля засыпи, представляющими собой совокупность измерителей,

установленных на куполе печи [10]. Получение наиболее полной информации о параметрах, характеризующих состояние поверхности засыпи, технологическое обоснование которых сформулировано выше, зависит от количества и места установки измерителей, что требует научного обоснования.

Основой разработки требований к размещению измерителей явились результаты эксплуатации системы измерения профиля засыпи шихты, разработанной Национальной Металлургической академией Украины и Научно-исследовательским институтом металлургии и материаловедения (г. Днепропетровск) в соответствии с технологическим заданием ИЧМ и установленной в 2003 г. на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» [6, 124]. Установка системы осуществлялась впервые и в соответствии с технологическим заданием реализована в количестве 20 измерителей, что позволило обеспечить получение полной информации о состоянии поверхности засыпи по всему сечению колошника и дальнейшее ее использование не только технологическим персоналом цеха в принятии управляющих воздействий на ход плавки, но и для проведения широкого круга исследований. Требования к установке и размещению радиолокационных измерителей уровня точек поверхности в доменных печах, оборудованных БЗУ, были разработаны с учетом конструктивных особенностей загрузочного устройства и распределения шихтовых материалов, осуществляемого этим загрузочным устройством. Они предусматривают максимальное использование возможностей системы измерения профиля и рельефа поверхности на основе установления наиболее информативных сечений печи с учетом расположения электромеханических уровнемеров и машин для отбора проб радиального газа и возможных мест установки радиолокационных измерителей уровня точек на поверхности шихты в этих сечениях. По радиусу печи ДП №9 радиолокационные измерители осуществляют контроль профиля засыпи в следующих кольцевых зонах сечения колошника:

– в периферийной зоне (ПФ) на расстоянии 0,35 м от колошниковой защиты, определенного исходя из условий предотвращения отражения излучаемого ими луча от стенки печи, и в первой промежуточной зоне (1П) на расстоянии 1,5–1,6 м от стенки колошника для фиксирования расположения геометрического «гребня». В этих зонах контроль поверхности засыпи шихты осуществляется в секторах по окружности печи, где

расположены зоны приближения и удаления потоков шихты от стенки печи (в секторах бункеров БЗУ);

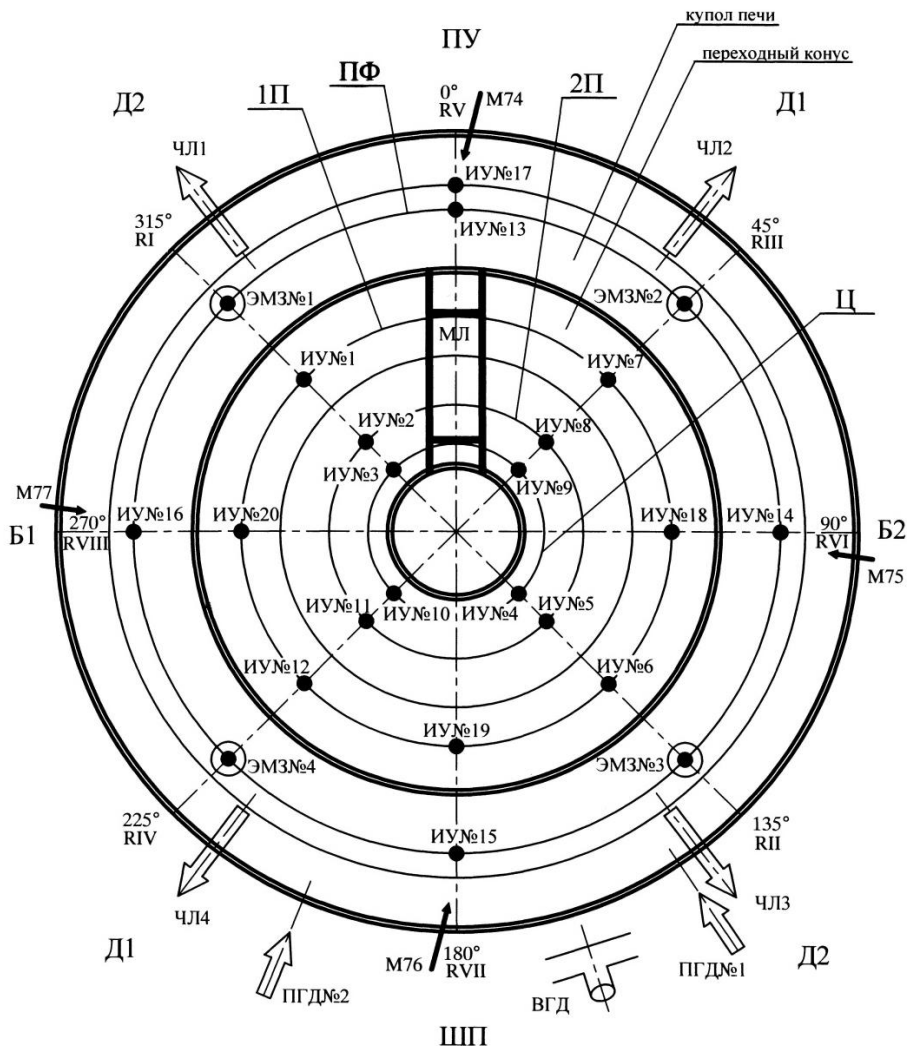
– во второй промежуточной зоне (2П), расположенной между первой промежуточной и осевой зонами, в которой может быть существенным влияние на форму профиля засыпи особенностей распределения газового потока;

– в осевой зоне (Ц) радиусом 1,0–1,5 м от оси печи для контроля осевой воронки профиля засыпи.

Расположение радиолокационных измерителей и электромеханических зондов по радиусам колошника ДП №9 приведено на рис. 2.7.

Получаемая в результате работы измерителей информация представляет собой совокупность изменяющихся во времени значений уровней поверхности засыпи шихты в различных точках сечения колошника. На основе этих значений формируется необходимая информация о профиле поверхности засыпи шихты: положение геометрического «гребня», углы наклона поверхности к оси и к стенке печи, высоты слоев шихты, распределение уровней точек поверхности засыпи по окружности колошника печи, высота (глубина) осевой воронки профиля и смещение ее относительно оси печи, а также распределение скоростей опускания шихты по радиусу и окружности печи.

Для получения технологическим персоналом информации о профиле поверхности засыпи, структуре образованных на колошнике слоев шихтовых материалов, образованных за цикл загрузки, достаточно установить измерители по двум диаметрам колошника, один из которых, в зависимости от конструктивных особенностей купола печи и диаметра колошника, должен содержать до 10 измерителей, и являться наиболее информативным диаметром. Количество измерителей, контролирующих поверхность засыпи в сечении этого диаметра, может быть определено исходя из условия обеспечения максимально возможной информации об изменении всей поверхности засыпи шихты. Для условий ДП №9 наиболее информативный диаметр должны контролировать 10 измерителей. При наличии требования к уменьшению количества измерителей, устанавливаемых в составе системы, что может быть вызвано конструктивными особенностями купола печи, либо удешевлению системы за счет меньшего количества используемых измерителей, их минимальное число может быть определено из условия – пятна лучей радиолокационных измерителей не должны пересекать друг друга.



ПУ, ШП, ЧЛ, МЛ – пылеуловители, шихтоподача, чугунные летки, монтажный люк; ЭМЗ№№1-4 – электромеханические зонды; М 74-77 – радиальные газоотборные зондовые машины; Б1, Б2 – бункера БЗУ; ВГД, ПГД№№1,2 – оси воздухопровода и подводов горячего дутья. ПФ, ПП, 2П, Ц – периферийная, первая и вторая промежуточная, центральная кольцевые зоны колошника установки измерителей.

**Рис. 2.7.** Схема расположения измерителей уровней засыпи (ИУ) по диаметрам (Д) и радиусам (R) колошника ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

Такое требование основано не на особенностях процесса измерения посредством излучения электромагнитных волн и их последующего приема антенной (излучаемый антенной сигнал измерителя не может быть принят соседним источником), а на получении с помощью измерителей достоверной и наиболее полной информации о состоянии профиля поверхности засыпи. Диаметр пятна луча измерителя, образованного на поверхности засыпи, может быть рассчитан согласно выражению  $D=0,15 \cdot H$ , где  $H$  – расстояние от места установки измерителя до точки пересечения его луча с поверхностью засыпи. Например, для условий ДП №9 при рабочем уровне засыпи 1,2–1,3 м диаметры пятен лучей измерителей, установленных на высоте 3,875 м над технологическим нулем, изменяются от 0,76 до 0,78 м.

Выбор относительного расположения по сечению колошника наиболее информативного диаметра осуществляется исходя из возможности установления взаимосвязей изменения параметров профиля поверхности засыпи с технологическими параметрами процесса плавки, что является необходимым для дальнейшего управления процессом с использованием информации профилемера. Расчет с помощью профилемера таких показателей распределения как толщины слоев шихтовых материалов, образуемые за цикл загрузки, и объемы шихтовых материалов в зонах сечения колошника осуществляется на основе формализации ряда процессов, происходящих в результате формирования структуры столба шихты: вытеснения кокса после выгрузки на него железосодержащих порций шихты и изменения профиля поверхности засыпи по мере ее опускания за цикл загрузки. Поэтому для обоснованного выбора управляющих воздействий на ход процесса важно подтвердить достоверность рассчитываемых на основе данных, полученных профилемером, показателей распределения, что может быть реализовано установлением степени взаимосвязи их с распределением температур и объемной долей  $CO_2$  в газе по радиусу печи. Отсюда следует, что расположение наиболее информативного диаметра должно быть привязано к устанавливаемым на доменных печах средствам контроля температур над поверхностью засыпи с помощью термобалок, а также радиальных зондовых машин для отбора проб газа. На печах, оборудованных стационарными термобалками для измерения температуры над поверхностью засыпи и радиальными зондовыми машинами, при условии их расположения в одном сечении, измерители целесообразнее устанавливать вдоль диаметра, расположенного под углом  $\approx 20^\circ$  по отношению к

диаметру установки средств контроля температуры и газа. Это позволит исключить попадание лучей измерителей на поверхность термобалок, что особенно важно при их конструктивном исполнении в виде прямоугольного сечения, как это реализовано, например, на ДП №4 ОАО «Северсталь». Кроме того, в ходе исследований при загрузке ДП №4 ОАО «Северсталь» перед ее задувкой после капитального ремонта установлено, что при выгрузке материалов лотковым распределителем, в результате заноса потока шихты и его попадания на термобалки на поверхности засыпи образуется неравномерность по окружности печи с направленностью в сторону вращения распределителя. Как показали исследования, при рабочих уровнях засыпи, изменяющихся в пределах 1,0–1,5 м, смещение неравномерностей составляет  $\sim 15^\circ$ , что отвечает сформулированным требованиям по расположению информативного диаметра под углом  $\approx 20^\circ$  по отношению к диаметру установки термобалок.

Расположение диаметра установки измерителей по отношению к чугунным лоткам зависит от режима выпусков продуктов плавки, используемого на печи. При режиме работы печи с накоплением продуктов плавки, а затем их выпуском, в связи с влиянием выпусков на характер формирования поверхности засыпи, диаметр установки измерителей не должен находиться в сечении, расположенным над лотками. При работе печи без накопления продуктов плавки, с непрерывным их выпуском, как это имеет место на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», ограничений по расположению диаметра установки измерителей относительно лоток, не должно быть.

Информация о профиле поверхности засыпи, полученном в одном сечении колошника, является необходимой, но недостаточной для выбора управляющих воздействий на ход процесса плавки. В дополнение к ней необходимо обеспечить получение информации о состоянии поверхности засыпи по окружности колошника. Обоснование выбора сечений колошника, в которых необходимо обеспечить получение информации о состоянии поверхности засыпи, может быть выполнено на основании возможностей ее дальнейшего использования для управления процессом доменной плавки. Выполненные в течение времени эксплуатации системы исследования по разработке и использованию на ДП №9 способов контроля и управления процессом доменной плавки показали, что для выбора управляющих воздействий на ход процесса необходимо обеспечить получение с помощью радиолокационной системы информации о

распределении уровней поверхности засыпи и скоростей опускания шихтовых материалов в периферийной, промежуточной и осевой зонах печи.

Для получения этой информации достаточной является установка в каждой из этих зон двух измерителей, расположенных на одном диаметре, перпендикулярном основному информативному диаметру. Периферийные измерители целесообразно устанавливать на расстоянии 0,35–0,5 м от стенки колошника для исключения влияния колошниковой защиты на показания измерителей. Измерители, контролирующие осевую зону печи, целесообразно устанавливать под углами наклона к оси печи, не превышающими 35°. Это заключение сделано на основании двух определяющих угол установки факторов: полученных на ДП №9 данных об изменении профиля, которые свидетельствуют о том, что максимально возможный угол, образованный на поверхности засыпи в осевой зоне печи, составляет 45°, и согласно приведенным в работе [125] ограничениям к углу встречи радиолуча с поверхностью засыпи не менее 10°, что связано с потерей мощности отраженного сигнала при скольжении луча по поверхности. Установка измерителей, контролирующих осевую зону печи под указанными углами, позволит определять профиль поверхности засыпи после выгрузки порций осевого кокса, который может быть практически горизонтальным, либо иметь возвышение в приосевой зоне без потери сигнала за счет его скольжения по поверхности.

Таким образом, в общем виде требования к количественному составу измерителей и местам их установки на печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Количественный состав измерителей стационарно установленной на куполе печи системы измерения профиля поверхности засыпи определяется исходя из размеров колошника (его диаметра) при условии, что установка измерителей осуществляется по двум диаметрам, один из которых – наиболее информативный, содержит количество измерителей, позволяющих контролировать поверхность засыпи с расстоянием между измеряемыми точками до 1 метра. При необходимости минимизации количества измерителей в составе системы, их число на информативном диаметре определяется отношением диаметра колошника к размеру образуемых на поверхности засыпи пятен излучаемого сигнала, т.е.  $K \approx D_k/D$ . Второй диаметр располагается под углом  $\sim 90^\circ$  к наиболее информативному, и содержит 4

измерителя, два из которых расположены на расстоянии 0,35–0,5 м от стенки колошника, а два других – в осевой зоне печи, установленных под углами наклона к оси печи, не превышающими 35°.

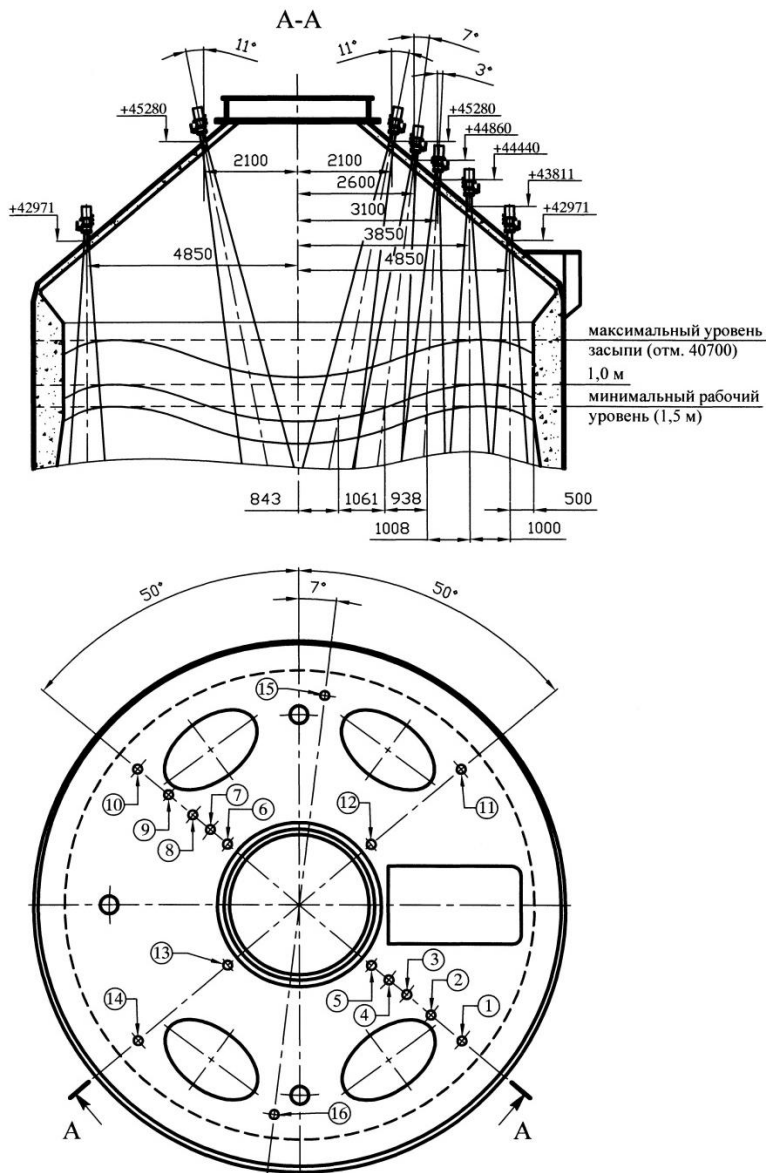
2. Наиболее информативный диаметр ориентирован под углом  $\approx 20^\circ$  относительно диаметра устанавливаемых на печи средств контроля: термобалок и радиальных зондовых машин для отбора проб газа.

Схемы установки систем измерения профиля поверхности засыпи шихты на основе сформулированных требований на доменных печах большого и среднего объема, оборудованных бесконусным загрузочным устройством, приведены на рис. 2.8 и 2.9.

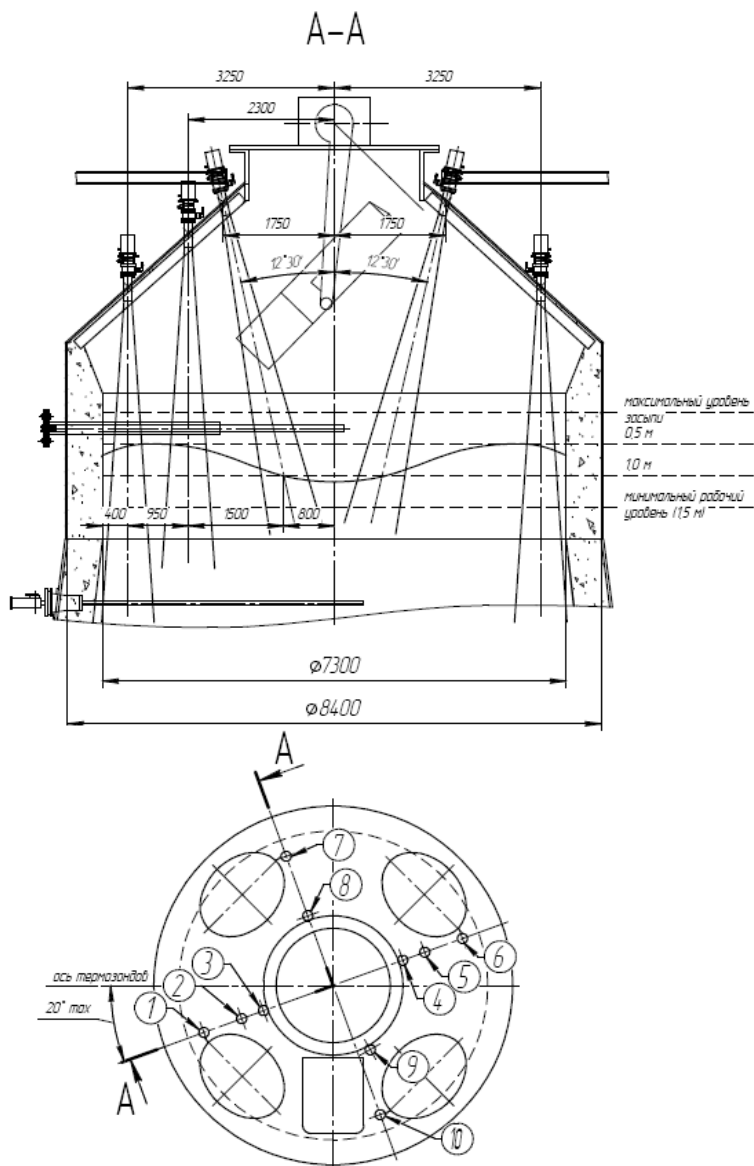
### **2.2.2 Особенности установки систем на колошнике доменной печи, оборудованной конусным загрузочным устройством**

На печах, оборудованных конусными загрузочными устройствами (КЗУ), установка систем измерения профиля поверхности засыпи шихты в большей степени обусловлена конструктивными особенностями загрузочного устройства, большой конус которых не позволяет осуществлять вертикальное измерение профиля поверхности засыпи в осевой и в приосевой зонах печи [9, 62]. Кроме того, фактором, который необходимо учитывать при установке измерителей, осуществляющих контроль профиля поверхности засыпи в осевой зоне печи, является образование профиля поверхности засыпи с явно выраженной воронкой  $\surd$  – образной формы. Для исключения возможности скольжения радиолуча по поверхности засыпи, что возникает при его попадании на поверхность под углом менее  $10^\circ$  и сопровождается потерей мощности отраженного сигнала, измерители необходимо направлять на противоположный склон, обеспечивая измерение по нормали к противоположному склону профиля засыпи. Важным фактором, который необходимо учитывать при выборе мест установки измерителей, является характерное для конусных загрузочных устройств изменение уровня засыпи, что отличает их от бесконусных устройств. Уровень засыпи может изменяться в пределах от 0,5 до 2,5 м, что является средством управления распределением шихтовых материалов по радиусу колошника на печах с КЗУ. Количественный состав систем измерения профиля поверхности





**Рис. 2.8.** Рекомендованное расположение измерителей уровней засыпи 1...16 по диаметрам колошника доменной печи большого объема.



**Рис. 2.9.** Рекомендованное расположение измерителей уровней засыпи 1...10 по диаметрам колошника доменной печи среднего объема

засыпи определяется на основании требований, аналогичных требованиям к установке на печах, оснащенных БЗУ и приведенных выше. Аналогичны и требования к местам установки измерителей на куполе печи.

Известны различные варианты разновидностей конусных загрузочных устройств, в которых предусматривается выгрузка порции осевого кокса. Например, ДП №8 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» оборудована двухконусным загрузочным устройством, состоящим из приемной воронки с лепестковым распределителем шихты (ЛРШ), малого и большого конусов. Лепестковый распределитель шихты располагается над малым конусом и представляет собой воронку с днищем, выполненным из восьми секторов. Каждый из лепестков имеет индивидуальный привод и может занимать различное положение, отклоняясь от исходного положения, что позволяет регулировать окружное распределение шихты на колошнике. В ходе выполнения проектных работ при проведении капитального ремонта I-го разряда предполагалось усовершенствовать загрузочное устройство, предусмотрев возможность выгрузки кокса в осевую зону колошника. Для этого в полости большого конуса должен был быть расположен автоматизированный осевой промежуточный конус (АОПК).

Вышеуказанные особенности загрузочного устройства должна учитывать установка системы измерения профиля поверхности засыпи шихты. Исходя из технологических аспектов и конструктивных особенностей загрузочного устройства, измерители радиолокационной системы на этой печи должны быть установлены по четырем радиусам. Одним из основных требований к установке системы является такое расположение измерителей, чтобы хотя бы один из измеряемых радиусов находился по оси одного из лепестков распределителя шихты. Такое расположение измерителей позволит определить радиальное распределение шихты, а также характер формирования гребня шихты при использовании различных положений лепестков. Установка измерителей по четырем радиусам колошника позволит, помимо радиального, оценить окружное распределение шихты, что является необходимым при исследованиях и управлении загрузкой печи, связанных с установкой на печи усовершенствованного конусного загрузочного устройства.

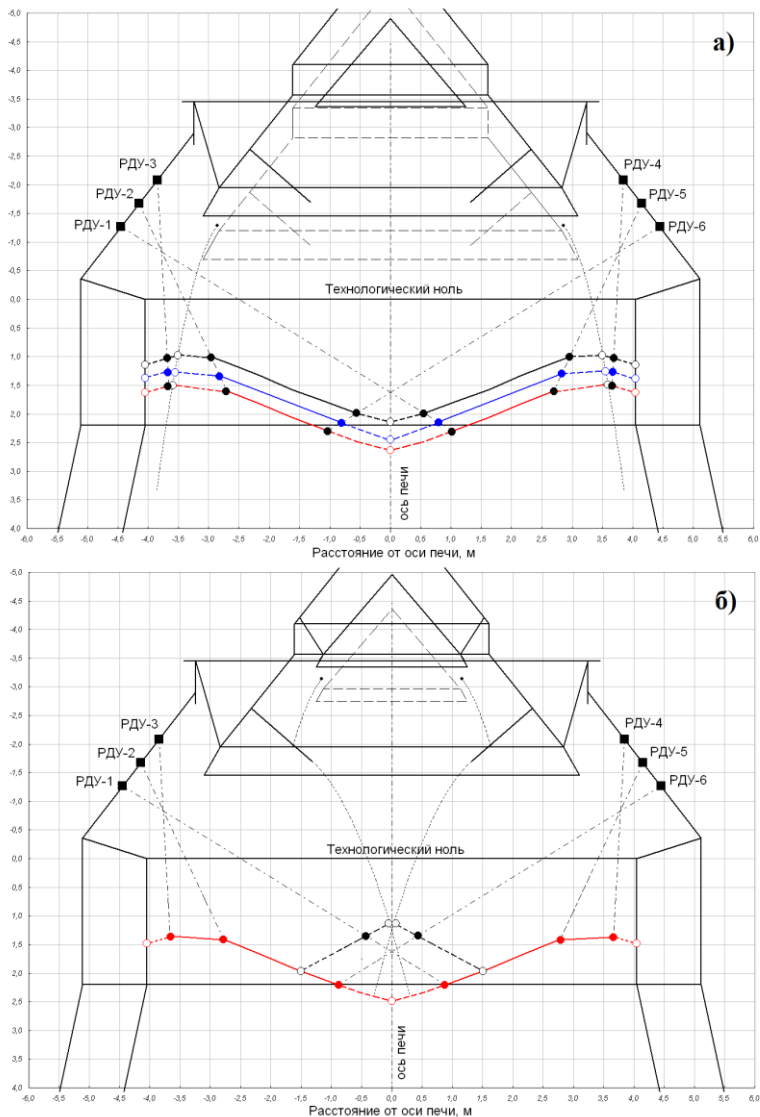
В силу объективных причин установка измерителей уровня на колошнике ДП №8 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» не в полной мере отвечает сформулированным требованиям и

измерение профиля поверхности засыпи на этой печи осуществляется по одному диаметру. Однако такая установка измерителей, наряду с разработанным ИЧМ методом определения профиля поверхности засыпи, позволяет контролировать состояние поверхности шихты как в случае использования типового режима загрузки, так и при использовании выгрузки осевых порций кокса. На рис. 2.10 приведена схема установки измерителей по диаметру колошника ДП №8 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». На рис. 2.10а представлена схема определения профиля поверхности засыпи шихты при выгрузке ее в печь с большого конуса, на рис. 2.10б – при выгрузке осевых порций с АОПК.

В общем виде требования к количественному составу измерителей и местах их установки на печи, оборудованной конусным загрузочным устройством, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Для доменной печи, на которой установлено типовое конусное загрузочное устройство, либо устройство, конструктивные особенности которого позволяют осуществлять выгрузку кокса в осевую зону печи, количественный состав измерителей стационарно установленной на куполе печи системы измерения профиля поверхности засыпи определяется исходя из размеров колошника (его диаметра) при условии, что установка измерителей осуществляется по двум диаметрам, один из которых – наиболее информативный, содержит количество измерителей, позволяющих контролировать поверхность засыпи с расстоянием между измеряемыми уровнями до 1 метра. При условии минимизации состава системы измерения профиля поверхности засыпи количество измерителей выбирается исходя из отношения диаметра колошника к размеру образуемых на поверхности засыпи пятен излучаемого сигнала, т.е.  $K \approx D_k/D$ . Второй диаметр располагается под углом  $\sim 90^\circ$  к первому – наиболее информативному, и содержит 4 измерителя, два из которых расположены на расстоянии 0,35–0,5 м от стенки колошника, а два других – в осевой зоне печи, установленных под углами наклона к оси печи, позволяющими осуществлять измерение расстояния до противоположного склона воронки поверхности засыпи.

2. Наиболее информативный диаметр ориентирован под углом  $\approx 20^\circ$  относительно устанавливаемых на печи средств контроля – термобалок и радиальных зондовых машин для отбора проб газа.



**Рис. 2.10.** Установка радиолокационных измерителей на колошнике ДП №8 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Измерение профиля поверхности засыпи при выгрузке шихтовых материалов в печь с большого конуса (а) и при выгрузке с АОПК (б).

3. Для доменной печи, на которой в дополнение к конусному загрузочному устройству установлены устройства, позволяющие регулировать окружное распределение шихтовых материалов, аналогичное лепестковому распределителю, измерители радиолокационной системы должны быть установлены по четырем радиусам. Причем, хотя бы один из измеряемых радиусов должен находиться по оси одного из лепестков распределителя шихты для осуществления контроля влияния распределителя на окружное распределение шихтовых материалов.

Первой в СНГ доменной печью, оснащенной конусным загрузочным устройством, на которой установлена радиолокационная стационарная система измерения профиля поверхности засыпи, является ДП №8 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Система установлена в соответствии с разработанным ИЧМ технологическим заданием, а информационная система отображения полученной с ее помощью информации создана на основе оригинальных методов и специальных алгоритмов [133]. Отличительными, от использованных на печах с БЗУ, особенностями информационной системы является включение в ее состав специальных методов, позволяющих построить профиль поверхности засыпи с учетом установки измерителей, осуществляющих контроль осевой зоны печи с помощью измерений противоположного склона.

### **2.2.3 Особенности определения расстояний до поверхности шихты при выдувке печи**

Выдувка доменной печи является одним из наиболее сложных (в отношении возможности возникновения аварийных ситуаций) режимов работы доменной печи. Одновременно с освобождением рабочего пространства от шихтовых материалов выдувка доменной печи, сопровождается освобождением значительного количества тепловой энергии, а также образованием значительного объема газов, которые, по мере выдувки, движутся в режиме противотока без полноценной отдачи тепловой и химической энергии. В связи с указанными особенностями процесса выдувки, как особого технологического состояния доменной печи, важное значение для ее успешного проведения имеет контроль текущего уровня засыпи и скорости опускания поверхности шихтовых материалов, характеризующих согласование дутьевого и температурного режимов. Наиболее

опасной является ситуация, когда при выдувке печи нарушается баланс между весом столба шихты и напором дутья.

Установленные на доменных печах традиционные средства контроля уровня засыпи – электромеханические зонды, позволяют контролировать положение опускающейся поверхности шихты до уровня 4,0-5,0 м. Ниже 5,0 м остаточный объем шихтовых материалов и уровень их поверхности в доменной печи определяют расчетным методом, достоверность которого может быть подтверждена только после окончания выдувки печи. При этом текущий контроль параметров, характеризующих опускание шихты, оперативное определение и прогноз подвисаний и обрывов шихты, а также соответствующая своевременная корректировка дутьевых и тепловых параметров невозможны.

Для непрерывного контроля опускания шихты при выдувке ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в 2003 г. по рекомендации Института черной металлургии впервые в отечественной практике применен радиолокационный измеритель уровня, установленный на куполе печи и обеспечивший измерение расстояния до поверхности засыпи шихтовых материалов и скорости ее опускания до отметки 30 м. В процессе выдувки своевременное выявление подстоя шихты позволило определить причину резкого увеличения содержания водорода в составе шахтных газов и оперативно отреагировать на это возмущение путем корректировки количества воды, подаваемой в доменную печь [134, 135].

При выдувке этой печи в 2008 г. для измерения уровня засыпи и определения скорости опускания шихты были применены два радиолокационных измерителя уровня, которые обеспечили непрерывный, стабильный контроль указанных параметров в течение всего процесса выдувки (подробная информация об особенностях установки и использования радиолокационных измерителей при выдувке 2008 г. приведена в главе 5).

Опыт применения радиолокационных измерителей уровня для контроля опускания шихты в процессе выдувки доменной печи №9 позволил сформулировать требования к количеству измерителей, обеспечивающих эффективный контроль уровня засыпи шихтовых материалов в печах, оборудованных бесконусными загрузочными устройствами.

Согласно этим требованиям достаточным является установка трех радиолокационных измерителей по одному диаметру печи, не являющимся диаметром расположения электромеханических зондов. Это позволит на начальном этапе

выдувки определить возможный перекося поверхности засыпи шихты. Два измерителя должны быть установлены вертикально в периферийной зоне печи на расстоянии 0,35–0,50 м от стенки колошника для исключения влияния колошниковой защиты на показания измерителей. Установка третьего измерителя не может быть осуществлена вертикально из-за конструктивных особенностей загрузочного устройства. Поэтому он устанавливается под углом, не превышающим  $10^\circ$  с возможностью измерения расстояния до уровня засыпи в сечении, расположенном в непосредственной близости к осевой зоне печи. Расстояние, на котором должен быть установлен третий измеритель, определяется исходя из требования исключения пересечения образуемых на поверхности засыпи пятен излучаемого сигнала на уровне распара печи. С помощью этого измерителя и наиболее близко к нему расположенному, одному из периферийных, может быть зафиксировано расположение конуса остаточного кокса в печи после выдувки.

Измеритель, контролирующий приосевую зону печи, должен быть установлен на расстоянии  $R_2$  от оси печи, величина которого определяется исходя из следующего выражения:

$$R_2 = tg(\alpha_{II}^{uzm}) \cdot (H_p + H_{II}^{uzm}),$$

где  $\alpha_{II}^{uzm}$  – угол наклона измерителя, установленного в приосевой зоне, определяемый из выражения:

$$\alpha_{II}^{uzm} = arctg\left(\frac{X_2 - X_1}{H_p + H_{II}^{uzm}}\right);$$

$H_p$  – расстояние от технологического нуля до распара,

$H_{II}^{uzm}$  – высота от технологического нуля до установки приосевого измерителя,

$X_1$  – расстояние от стенки печи на уровне распара до луча периферийного измерителя, определяемое согласно выражению:

$$X_1 = R_1 + (H_p - H_k) \cdot ctg(\alpha_{ш});$$

$R_1$  – расстояние от стенки печи на уровне колошника до луча периферийного измерителя, которое изменяется в пределах от 0,35 до 0,50 м;

$H_k$  – расстояние от технологического нуля до низа колошника;

$\alpha_{ш}$  – угол наклона шахты печи;



$X_2$  – расстояние от стенки печи на уровне распара до луча приосевого измерителя, должно изменяться в пределах от

$$X_1 + \frac{D_{ПФ}^{изм}}{2} + \frac{D_{Ц}^{изм}}{2} \text{ до } R_p, \text{ где } R_p \text{ – радиус распара печи;}$$

$D_{ПФ}^{изм}$  – диаметр пятна периферийного измерителя, определяемый согласно выражению:

$$D_{ПФ}^{изм} = (H_p + H_{ПФ}^{изм}) \cdot 0,15;$$

$D_{Ц}^{изм}$  – диаметр пятна приосевого измерителя, определяемый исходя из следующего выражения:

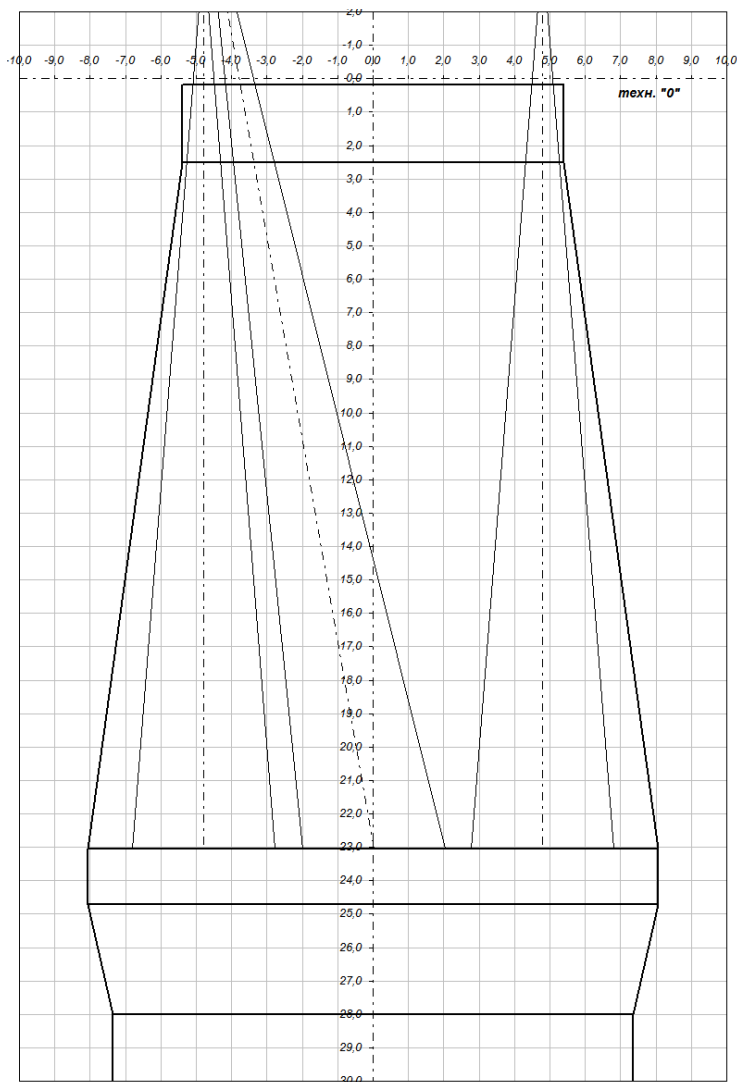
$$D_{Ц}^{изм} = \frac{(H_p + H_{Ц}^{изм})}{\cos(\alpha_{Ц}^{изм})} \cdot 0,15;$$

$H_{ПФ}^{изм}$  – высота от технологического нуля до установки периферийного измерителя.

Установка измерителей в соответствии с приведенными выше требованиями представлена на рис. 2.11. Установка трех измерителей позволит также обеспечить резервирование оборудования, что особенно важно для условий выдувки, предусматривающих подачу воды в печь с образованием при этом пара, негативно влияющего на показания измерителей. Поэтому, при выборе места установки измерителей необходимо учитывать расположение водяных форсунок, предназначенных для распыления воды в рабочем пространстве печи, поскольку образующийся в зоне установки форсунок пар может существенно исказить показания датчиков.

На печах, оборудованных конусными загрузочными устройствами, в связи с конструктивными особенностями этих устройств, процесс выдувки могут контролировать только измерители, установленные в периферийной зоне сечения колошника.

Радиолокационные измерители, установленные в периферийной зоне сечения колошника, могут быть использованы в обычном режиме работы доменной печи в качестве измерителей уровня засыпи вместо, либо в дополнении к электромеханическим зондам.



**Рис. 2.11.** Установка измерителей уровня на доменной печи при ее выдувке

Необходимо также обеспечить графическое представление текущего уровня и скорости опускания шихты при помощи средств АСУ ТП для сопоставления их с расчетными значениями этих параметров.

В процессе выдувки печи контроль положения уровня засыпи, осуществляемый при помощи радиолокационных уровнемеров, целесообразно сопоставлять с результатами расчетного определения уровня по проплавленному объему материалов и объему сгоревшего кокса. Темп уменьшения газодутьевых параметров печи в процессе выдувки должен обеспечить ровный сход столба шихтовых материалов. В случае проявления признаков «подстоя» шихтовых материалов и возможного последующего их подвисяния, технологическим персоналом в течение 15 минут должны быть приняты меры для предотвращения развития (ликвидации) подвисяния шихты путем уменьшения расхода и его температуры.

Имеющийся опыт контроля уровня засыпи при помощи радиолокационных измерителей, полученный при проведении двух выдувок ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (2003 г. и 2008 г.) позволил обобщить полученные результаты и сформулировать следующие требования к установке измерителей для контроля поверхности шихты в процессе выдувки доменной печи:

1. Для печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами, должна быть осуществлена установка трех измерителей, которая определяется конструктивными особенностями купола печи и предусматривает:

- вертикальное расположение двух измерителей на одном диаметре в периферийной зоне печи на расстоянии 0,35–0,5 м от стенки колошника;

- определение для конкретной доменной печи расстояния установки третьего приосевого измерителя от оси печи и угла его наклона, исходя из требования исключения пересечения образуемых на поверхности засыпи пятен излучаемого сигнала на уровне распара печи для контроля расположения конуса остаточного кокса после выдувки;

- диаметр установки радиолокационных измерителей не должен являться диаметром расположения электромеханических зондов;

- максимальную удаленность от мест расположения форсунок для подачи воды.

2. Для доменных печей, оснащенных конусными загрузочными устройствами, процесс выдувки может быть проконтролирован двумя радиолокационными измерителями, установленными в периферийной зоне печи. Установка третьего

измерителя в связи с особенностями загрузочного устройства не может быть реализована.

3. Настройка диапазона измерения датчиков на расстояние не менее 30,0 м.

При этом необходимо предусмотреть:

– настройку алгоритмов обработки сигналов измерителей и представления информации, включая графическое представление изменения уровня засыпи и скорости опускания;

– непрерывный контроль уровня засыпи и скорости опускания шихты в процессе выдувки по показаниям радиолокационных измерителей и сопоставление их показаний с показаниями электромеханических зондов (до уровня 3,5 – 4,0 м), а также с результатами расчета изменения уровня засыпи по объему проплавленных материалов и объему сгоревшего кокса;

– сопоставление скорости опускания шихтовых материалов с предельными значениями, устанавливаемыми на основании опыта предыдущих выдувок доменной печи.

Для корректировки газодутьевого и температурного режимов выдувки необходимым является идентификация предаварийных или потенциально опасных ситуаций:

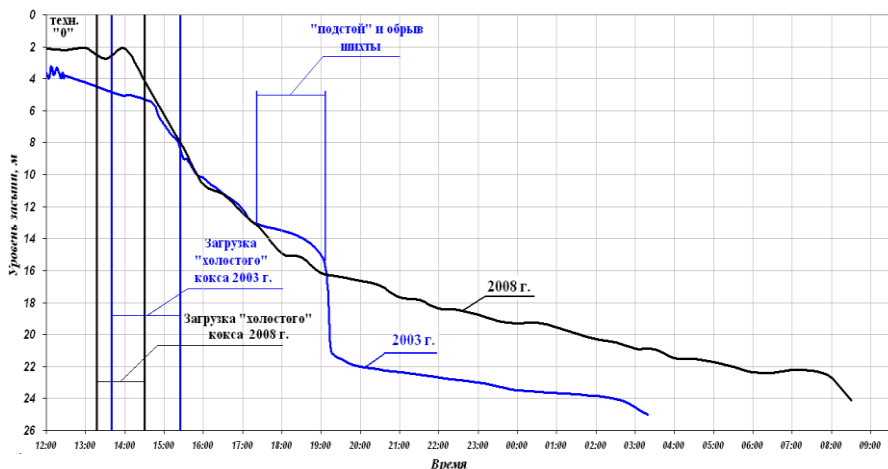
– зависаний («подстоев») шихты, характеризующихся устойчивым (30 минут и более) уменьшением скорости опускания шихты до критических значений. В диапазоне изменения уровня засыпи 0 – 15,0 – 17,0 м (наиболее опасная, с точки зрения обрывов шихты и их последствий, фаза выдувки) критерием возможного возникновения подвисяния шихты можно принять уменьшение скорости опускания до 0 – 0,015 м/час. (Принятое значение в два раза меньше средней скорости опускания шихты до уровня 15,0 – 17,0 м при нормальном ходе процесса);

– обрывов шихты, проявляющихся как резкое возрастание скорости опускания до 0,100–0,150 м/мин и более.

В процессе выдувки ДП №9 в 2003 г. применение радиолокационного метода контроля уровня засыпи позволило своевременно выявить обрыв шихты, определить причину резкого повышения содержания водорода в составе шахтных газов и своевременно отреагировать на это возмущение корректировкой количества воды, подаваемой в доменную печь. В 2008 г. применение аналогичного метода обеспечило прогнозируемый и управляемый ход выдувки в течение всего процесса (рис. 2.12).

На доменных печах, оснащенных радиолокационными системами измерения профиля засыпи, оперативный контроль

опускания шихты в начальный период выдувки может быть реализован при помощи всех измерителей системы. При отсутствии такой системы, как штатного оборудования, установка трех радиолокационных измерителей для контроля уровня засыпи шихты в процессе выдувки должна предусматриваться как регламентированное мероприятие в плане подготовки доменной печи к выдувке.



**Рис. 2.12.** Результаты измерения уровня засыпи шихты при помощи радиолокационного датчика в процессе выдувки ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в 2003 г. и 2008 г.

### 2.2.4 Контроль уровня засыпи шихтовых материалов при загрузке задувочной шихты

Основной целью контроля уровня засыпи шихтовых материалов при загрузке задувочной шихты является определение фактического объема загруженных шихтовых материалов и корректировка состава шихты первого объема.

Непрерывный (оперативный) контроль уровня засыпи шихтовых материалов в течение всего процесса загрузки задувочной шихты необходим, поскольку на стадии подготовки к задувке при расчетах состава и объема задувочной шихты используются усредненные значения параметров, характеризующих физико-механические свойства шихтовых материалов, в частности, насыпной массы и коэффициента «уминки». Как показала практика загрузки задувочной шихты,

фактические значения этих характеристик на момент загрузки шихты первого объема могут существенно отличаться от расчетных. При отсутствии оперативного определения фактического уровня засыпи и объема загруженной шихты несоответствие этих параметров расчетным значениям проявляется и может быть достоверно установлено только в верхней части шахты – в зоне измерения уровня засыпи электромеханическими зондами, то есть, когда возможности корректировки состава шихты первого объема существенно ограничены. Такая ситуация может обусловить искажение требуемого распределения шихтовых материалов и рудных нагрузок по высоте печи и соотношения компонентов в целом в шихте первого объема, и, как следствие, нерациональное распределение и неэффективное использование газового потока и тепла в объеме печи.

При отсутствии на доменной печи системы измерения профиля поверхности засыпи для контроля уровня засыпи шихтовых материалов при загрузке задувочной шихты достаточно установить три измерителя, требования к расположению которых аналогичны сформулированным выше для условий выдувки печи. При выполнении указанных выше требований установленные датчики могут быть использованы при задувке и выдувке доменной печи.

Результаты применения радиолокационного метода контроля уровня засыпи шихты в процессе выдувки и задувки доменных печей показывают перспективность проведения дальнейших исследований и разработок эффективных способов использования этого метода для обеспечения проведения процессов выдувки и задувки в регламентированном режиме без аварийных ситуаций или ситуаций, ухудшающих ход доменной плавки и снижающих ее эффективность.

## ГЛАВА 3

### МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ

Параметры состояния поверхности засыпи шихты на колошнике доменной печи (уровень засыпи, углы наклона поверхности засыпи, конфигурация слоев материалов, глубина и объем осевой воронки поверхности засыпи и ее смещение относительно оси печи, скорость опускания шихты) тесно взаимосвязаны и определяются характером взаимодействия шихтовых материалов и газов.

Стационарно устанавливаемые на куполе доменных печей системы измерения профиля поверхности засыпи позволяют непрерывно определять расстояние до поверхности засыпи в контролируемых сечениях колошника. Для определения параметров состояния поверхности засыпи шихты на основе полученной с помощью профилемера информации разработаны специальные методы, учитывающие особенности получаемой с помощью радиолокационной системы информации. Достоверность этих методов, претерпевших несколько этапов усовершенствования, подтверждена опытом эксплуатации радиолокационной системы на ДП №9 ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог”.

#### **3.1 Метод определения профиля поверхности засыпи шихты по измеряемым радиусам сечения колошника печи**

Уровни точек поверхности засыпи шихты, по которым строятся профили засыпи, фиксируются в паузах между выгрузками порций: после закрытия шихтового затвора фиксируются уровни точек поверхности засыпи после выгрузки порции ( $Y_{ПВ}$ ), в момент поступления команды на открытие шихтового затвора фиксируются исходные уровни точек поверхности засыпи перед выгрузкой порции ( $Y_{ИИ}$ ). Исходные уровни затем корректируются на величины их изменений за время выгрузки порций и принимаются исходными для последующей выгружаемой порции. Скорректированные уровни точек поверхности засыпи ( $Y_{ИИ}$ ) за время выгрузки порции шихтовых материалов определяются по двум вариантам, в зависимости от

характера изменения уровней точек поверхности засыпи в паузах между выгрузкой порций шихтовых материалов.

В первом варианте, представленном на рис. 3.1а, время начала уменьшения уровней засыпи соответствует времени начала выгрузки порции, в этом случае скорректированные уровни засыпи определяются из выражения:

$$Y_{III} = Y_{III} + (Y_{III} - Y_{III}) = 2Y_{III} - Y_{III}, \quad (3.1.1)$$

где  $Y_{III}$  – уровни засыпи, регистрируемые во время  $t = t_{III} - t_{\text{выгрузки}}$

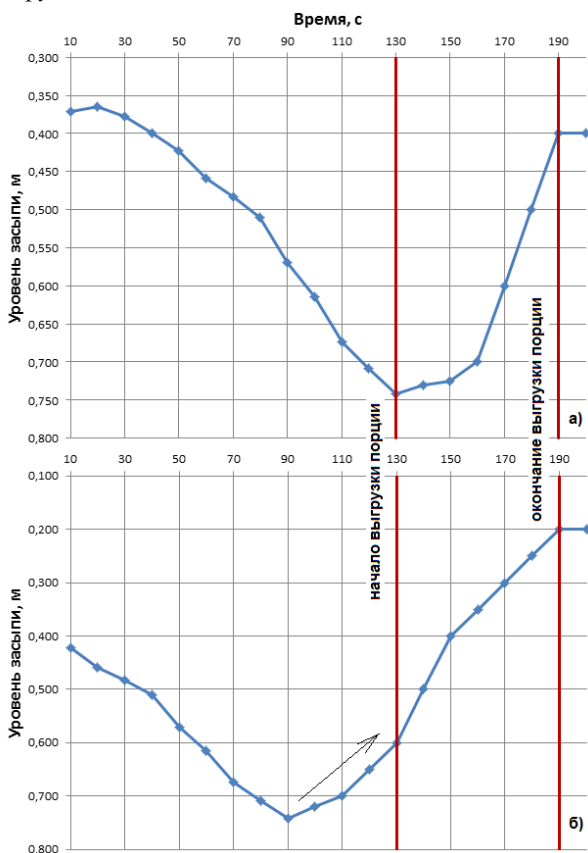


Рис. 3.1. Два варианта изменения уровня засыпи в паузах между выгрузкой порции



Во втором варианте, представленном на рис. 3.1б, время начала уменьшения уровней засыпи меньше времени начала выгрузки порции, т.е. уменьшение величин уровней засыпи наступает до начала выгрузки и может быть вызвано образованием над поверхностью засыпи взвешенного слоя. В этом случае скорректированные уровни точек поверхности засыпи определяются из выражения:

$$Y_{\overline{ПИ}} = Y_{MAX} + V_{ПОРЦ.} \cdot (t_{ВЗВ} + t_{выгрузки}), \quad (3.1.2)$$

где  $Y_{MAX}$  – максимальные значения уровня засыпи в паузе между выгрузкой порции,  $t_{ВЗВ}$  – время от начала уменьшения величин уровней засыпи до начала выгрузки порции,  $V_{ПОРЦ.} = \frac{Y_{MAX} - Y_{ПВ}}{t_{Y_{MAX}} - t_{Y_{ПВ}}}$  – скорость опускания текущей порции до появления взвешенного слоя.

Профили поверхности засыпи после выгрузки порции (ПВ) и исходные перед выгрузкой порции шихтовых материалов, скорректированные за время выгрузки ( $\overline{ПИ}$ ), образуются в результате кусочно-линейной аппроксимации точек поверхности засыпи, полученных в результате измерений с помощью радиолокационных измерителей.

По диаметрам (диаметру) установки измерителей профили поверхности засыпи строятся по измеренным точкам, 2-м пристеночным, полученным путем экстраполяции, и расчетной центральной точки [127].

Координаты  $(X_{cm}, Y_{cm})$  пристеночной точки профиля поверхности засыпи определяются следующим образом:

$$X_{cm} = R_K; \quad Y_{cm} = \frac{(X_{cm} - X_{1np}) \cdot (Y_{nф} - Y_{1np})}{X_{nф} - X_{1np}} + Y_{1np}, \quad (3.1.3)$$

где  $R_K$  – радиус колошника печи,  $X_{nф}, Y_{nф}$  – координаты точки профиля поверхности засыпи периферийной зоны сечения колошника,  $X_{1np}, Y_{1np}$  – координаты точки профиля поверхности засыпи первой промежуточной зоны сечения колошника.

Координаты  $(X_{Ц}, Y_{Ц})$  центральной точки профиля поверхности засыпи рассчитываются по следующим выражениям:

– в случае выгрузки осевых порций шихты на угловых позициях лотка 4...1 (образование выпуклой воронки поверхности засыпи, для которой характерно условие  $\left(\frac{Y'_n + Y''_n}{2}\right) - \left(\frac{Y'_1 + Y''_1}{2}\right) < 0$ ) координаты  $(X_{Ц}, Y_{Ц})$  точки поверхности засыпи в осевой зоне печи могут быть получены с помощью приведенных ниже выражений:

$$X_{Ц} = 0, \quad Y_{Ц} = \frac{1}{2} \left[ Y'_2 + Y''_1 - \frac{a \cdot X'_2}{d} - \frac{c \cdot X''_1}{b} \right] \quad (3.1.4)$$

– с использованием 9...3 положений лотка (образование положительной осевой воронки поверхности засыпи, т. е. выполнение условие  $\left(\frac{Y'_n + Y''_n}{2}\right) - \left(\frac{Y'_1 + Y''_1}{2}\right) > 0$ ) координаты точки поверхности засыпи определяются в соответствии с выражением:

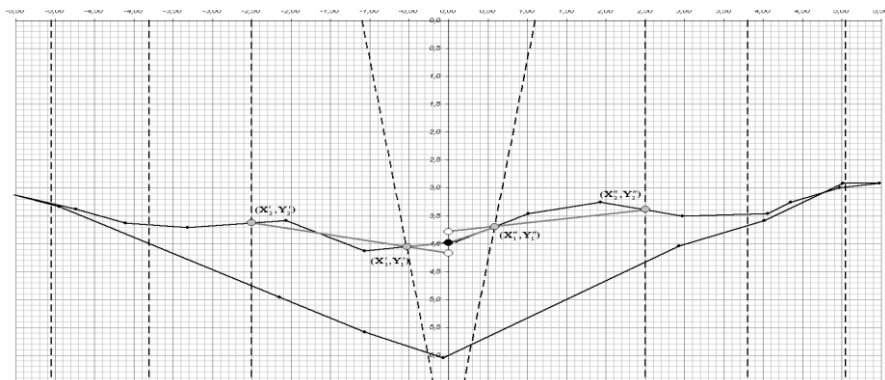
$$X_{Ц} = \frac{X'_1 + X''_1}{4} + \frac{ab \cdot X'_2 - cd \cdot X''_1 - bd \cdot (Y'_2 - Y''_1)}{2(ab - cd)}$$

$$Y_{Ц} = \frac{Y'_1 + Y''_1}{4} + \frac{a}{2d} \left[ \frac{ab \cdot X'_2 - cd \cdot X''_1 - bd \cdot (Y'_2 - Y''_1)}{ab - cd} - X'_2 \right] + \frac{Y'_2}{2}. \quad (3.1.5)$$

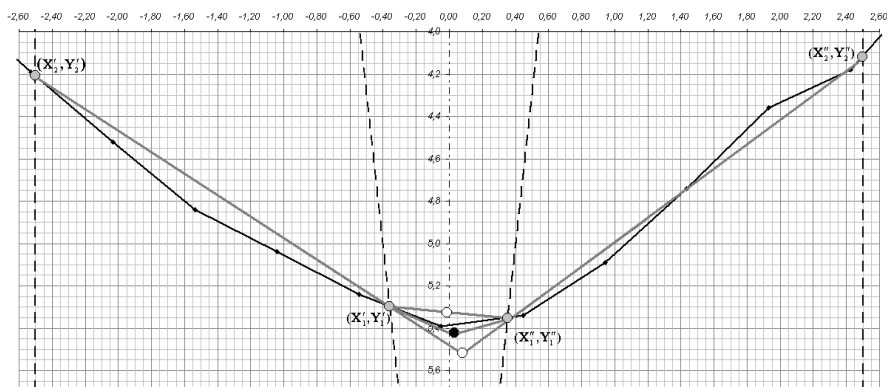
Для условия  $|X'_1| > |X_{Ц}| < |X''_1|$  координаты центральной точки профиля поверхности засыпи как для первого, так и для второго случаев определяются из выражений:

$$X_{Ц} = \frac{X'_1 + X''_1}{2}, \quad Y_{Ц} = \frac{Y'_1 + Y''_1}{2}$$

Варианты определения координат центральной точки поверхности засыпи для случаев выгрузки порций шихты из угловых позиций лотка 4...1 и 9...3 представлены на рис. 3.2 и 3.3 соответственно.



**Рис. 3.2.** Схема для определения центральной точки профиля поверхности засыпи для условия (3.1.4)



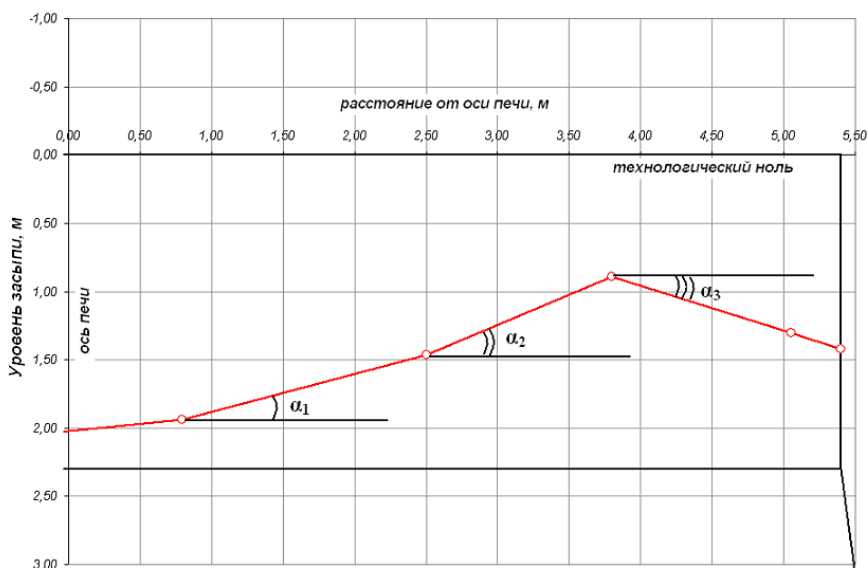
**Рис. 3.3.** Схема для определения центральной точки профиля поверхности засыпи для условия (3.1.5)

### 3.2 Определение углов наклона поверхности шихтовых материалов

Одним из параметров, характеризующих формирование поверхности засыпи, образованной в результате выгрузки шихты, являются углы ее наклона. Углы наклона поверхности засыпи шихты зависят от углов откоса шихтовых материалов в печи. Определение углов откоса шихтовых материалов осуществляют, как правило, при проведении предпусковых исследований с целью

последующего их использования в качестве исходных данных в модели радиального распределения, которая служит для расчета показателей распределения шихты и аналитического исследования характера образования слоев шихтовых материалов после их выгрузки [119].

Наклон поверхности засыпи может быть охарактеризован следующими углами: углами наклона поверхности к стенке и к оси печи, а также углами наклона участков поверхности засыпи, расположенных между сечениями установки измерителей. Например, для условий установки измерителей на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», где контролируются четыре сечения колошника, радиус колошника печи может быть условно разбит на три зоны и принято, что в каждой из этих зон процессы перераспределения шихтовых материалов происходят при соответствующих углах их наклона. Схема к определению углов наклона поверхности засыпи шихты для этих условий представлена на рис. 3.4.



**Рис. 3.4.** Схема к определению углов наклона поверхности засыпи шихты  $\alpha_{1...3}$  в доменной печи №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

### 3.3. Определение глубины и смещения осевой воронки

Глубина воронки профиля поверхности засыпи определяется как разность уровня засыпи в центральной зоне на измеряемом радиусе печи и уровня засыпи в промежуточной зоне измерения (наименьшего уровня засыпи по радиусу колошника) [120].

Например, для условий ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (рис. 2.7) глубина воронки для каждого измеряемого радиуса рассчитывается следующим образом:

для радиуса ЭМЗ–1:

$$B_1 = Y_{Ц}^{\text{ЭМЗ1-3}} - \frac{Y_{ИУ-20} + Y_{ИУ-1}}{2} \quad (3.3.1)$$

для радиуса ЭМЗ–2:

$$B_2 = Y_{Ц}^{\text{ЭМЗ2-4}} - \frac{Y_{ИУ-7} + Y_{ИУ-18}}{2} \quad (3.3.2)$$

для радиуса ЭМЗ–3:

$$B_3 = Y_{Ц}^{\text{ЭМЗ1-3}} - \frac{Y_{ИУ-6} + Y_{ИУ-18} + Y_{ИУ-19}}{3} \quad (3.3.3)$$

для радиуса ЭМЗ–4:

$$B_4 = Y_{Ц}^{\text{ЭМЗ2-4}} - \frac{Y_{ИУ-19} + Y_{ИУ-12} + Y_{ИУ-20}}{3} \quad (3.3.4)$$

в среднем для печи:

$$B_{CP} = \frac{\sum_{n=1}^4 B_n}{4} \quad (3.3.5)$$

где  $Y_{ИУ-i}$  – координата точек поверхности засыпи;  $Y_{Ц}$  – координата

центральной точки профиля поверхности засыпи; ЭМЗ 1...4 – электромеханические зонды.

Поведение осевой воронки профиля поверхности засыпи, ее смещение относительно оси печи, можно характеризовать по изменению координат  $X$  осевых измерителей уровня и координаты  $X_{ц}$  центральной точки профиля, рассчитанной по выражениям 3.1.3–3.1.4, т.е. изменению границ и центра воронки профиля поверхности засыпи, измеренного перед выгрузкой порции шихтовых материалов (исходного профиля) и после выгрузки (профиля после выгрузки) (рис. 2.2).

Поскольку на положение центра воронки после выгрузки каждой порции могут оказывать влияние случайные факторы, для его оценки следует усреднять данные за 5–10 циклов загрузки.

### 3.4 Метод определения формы, высоты слоев выгруженных порций шихты по измеряемым радиусам колошника и их отношений

Информация об образованных за цикл загрузки слоях шихтовых материалов – форме и их толщине, позволяет оценивать сформированную за цикл загрузки структуру столба шихты. Эта информация является основанием для корректировки либо изменения программы загрузки, что имеет особое значение в случае применения многокомпонентной шихты.

В точках измерения по радиусам установки измерителей и в кольцевых зонах измерения поверхности засыпи определяются высоты слоев шихтовых материалов, образованных после выгрузки каждой порции в цикле загрузки печи. Каждый слой материала ограничен измеренным скорректированным исходным профилем (ПИ) перед выгрузкой порции и профилем, образованным после выгрузки порции материала (ПВ).

Объемы материала в слое шихтовых материалов в каждой кольцевой зоне сечения колошника, ограниченной точками измерения профиля поверхности засыпи, на каждом радиусе установки измерителей определяются следующим образом:

$$V_{\text{ПИ}1\dots k1\dots s}^{\text{ИЗМ}} = \frac{\pi \cdot X_{\text{выгр}} \cdot (X_{32\text{выгр}} + X_{31\text{выгр}}) \cdot (X_{32\text{исх}} \cdot X_{\text{выгр}} \cdot Y_{\text{исх}} - X_{31\text{выгр}} \cdot X_{\text{исх}} \cdot Y_{\text{выгр}})}{X_{\text{выгр}} \cdot X_{\text{исх}}} + \pi \cdot (Y_{31\text{выгр}} - Y_{32\text{исх}}) + \frac{2\pi}{X_{\text{выгр}} \cdot X_{\text{исх}}} \cdot \left( \frac{(X_{32\text{выгр}}^3 - X_{31\text{выгр}}^3) \cdot (X_{\text{исх}} \cdot Y_{\text{выгр}} - X_{\text{выгр}} \cdot Y_{\text{исх}})}{3} \right), \quad (3.4.1)$$

где  $X_{\text{выгр}} = X_{32\text{выгр}} - X_{31\text{выгр}}$ ;  $X_{\text{исх}} = X_{31\text{исх}} - X_{32\text{исх}}$ ;  
 $Y_{\text{выгр}} = Y_{32\text{выгр}} - Y_{31\text{выгр}}$ ;  $Y_{\text{исх}} = Y_{31\text{исх}} - Y_{32\text{исх}}$ ;  
 $X_{31\text{исх}}$ ,  $X_{31\text{выгр}}$ ,  $X_{32\text{исх}}$ ,  $X_{32\text{выгр}}$ ,  $Y_{31\text{исх}}$ ,  $Y_{31\text{выгр}}$ ,  $Y_{32\text{исх}}$ ,  $Y_{32\text{выгр}}$  – координаты X и Y точек исходного скорректированного профиля и профиля поверхности засыпи после выгрузки порции для

кольцевой зоны радиуса, расположенной между соседними точками измерения 31 и 32.

Для уточнения объемов материалов в слоях, полученных с помощью радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи, объемы в каждой измеряемой зоне сечения колошника корректируются с учетом объемов фактически выгруженных материалов согласно выражению:

$$V_{i_{1...r},k_{1...s}}^{скор} = \frac{V_{Pi_{1...r},k_{1...s}}^{изм} \cdot m_{П} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{\omega_j}{\gamma_j}}{\sum_{i=1}^{r,s} V_{Pi,k}^{изм}} \quad (3.4.2),$$

где  $V_{i_{1...r},k_{1...s}}^{скор}$  – скорректированный объем материалов в каждой измеряемой зоне сечения колошника ( $i_{1...r}$ ) на каждом радиусе установки измерителей ( $k_{1...s}$ ),  $V_{Pi_{1...r},k_{1...s}}^{изм}$  – измеренные объемы материалов в каждой зоне сечения колошника на каждом радиусе установки измерителей,  $n$  – число компонентов в порции,  $m_{П}$  – масса порции,  $\omega_j$  – содержание компонентов в порции,  $j$  – компонент шихтовых материалов, используемый в программе загрузки шихты,  $\gamma$  – насыпной вес материала, значения которого приняты: для кокса и коксового “ореха” –  $0,45 \div 0,5 \text{ т/м}^3$ , антрацита –  $0,8 \text{ т/м}^3$ , агломерата –  $1,6 \div 1,8 \text{ т/м}^3$ , окатышей –  $1,95 \div 2,2 \text{ т/м}^3$ , обогащенного шлака –  $1,6 \text{ т/м}^3$ , известняка –  $1,3 \text{ т/м}^3$  и чугунистого скрапа –  $2,2 \text{ т/м}^3$ ,  $\sum_{i=1}^{r,s} V_{Pi,k}^{изм}$  – суммарный измеренный объем

материалов в порции,  $i$  – измеряемая кольцевая зона сечения колошника,  $k$  – измеряемый радиус,  $r$  – количество кольцевых зон установки измерителей,  $s$  – количество радиусов установки измерителей.

Для построения структуры слоев материалов, образованных за цикл загрузки печи, высоты слоев по радиусам измерения поверхности засыпи корректируются пропорционально отношению измеренных объемов и объемов, скорректированных с учетом масс фактически выгруженных материалов. Скорректированные высоты слоев в каждой точке радиусов измерения определяются согласно следующему выражению:

$$H_{i_{1...r},k_{1...s}}^{скор} = \frac{H_{i_{1...r},k_{1...s}}^{изм} \cdot V_{i_{1...r},k_{1...s}}^{скор}}{V_{\Pi_{i_{1...r},k_{1...s}}}^{изм}} \quad (3.4.3)$$

Слои шихтовых материалов, образованные после выгрузки порций, корректируются с учетом процессов перераспределения кокса при выгрузке на него железосодержащих материалов. Для этого разработан специальный метод описания указанного процесса, приведенный в следующем разделе.

В связи с тем, что расчет абсолютных значений рудных нагрузок в зонах сечения колошника требует проведения дополнительных исследований, направленных на оценку изменения насыпного веса шихтовых материалов при их выгрузке на поверхность засыпи, распределение шихты на колошнике может быть выполнено по относительным величинам рудных нагрузок, которые может характеризовать отношение толщин слоев железорудных материалов и кокса –  $H_p/H_k$ . Правомочность этого подтверждена экспериментальными исследованиями, в результате которых установлена взаимосвязь рассчитанных с помощью информации профилемера отношения высот железосодержащих материалов ( $H_p$ ) и кокса ( $H_k$ ) по радиусу колошника ( $H_p/H_k$ ) с долей  $CO_2$  в радиальном газе и рудной нагрузкой, рассчитанной с помощью модели радиального распределения ИЧМ, с коэффициентом корреляции  $r_{x,y} = 0,9$ .

Информативной является также величина относительной толщины слоя кокса, определяемой отношением высот слоя кокса к суммарной величине высот железосодержащих материалов и кокса  $H_k/(H_k + H_p)$ . Как показано в работах [55, 122, 123], это отношение, характеризующее долю кокса в зонах сечения колошника в совокупности с тепловыми нагрузками на элементы системы охлаждения, является показателем изменения распределения потоков газов в печи.

### **3.5 Метод определения объема вытесненного кокса при выгрузке на него железосодержащих компонентов шихты с использованием информации о поверхности засыпи**

Исследования формы слоев шихтовых материалов, образованных за цикл загрузки, и показателя распределения – отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса, а также расчет показателей распределения шихты с помощью математического моделирования показали, что объем кокса,



вытесненного при выгрузке на него железосодержащих порций шихты, существенно влияет на распределение шихтовых материалов по радиусу колошника. Это подтверждают расчеты показателей распределения, выполненные на математической модели ИЧМ радиального распределения шихты для программы загрузки (табл. 3.1) без учета кокса, вытесняемого при выгрузке на него железосодержащих материалов, и с заданием значений объемов вытесненного кокса, изменяющихся от 3 до 9%. Результаты расчетов представлены в табл. 3.2 и на рис. 3.5.

Как следует из приведенных в табл. 3.2 и на рис. 3.5 данных, задание различного количества вытесняемого железосодержащими материалами кокса приводит к существенным отклонениям в распределении рудных нагрузок по радиусу колошника, причем максимальные отклонения приходится на 1-ю, 4-ю и 5-ю равновеликие зоны сечения колошника. Это свидетельствует о том, что объем вытесненного кокса не может задаваться фиксированной величиной в качестве исходных данных при расчете показателей распределения, а должен определяться используемой на печи программой загрузки и как следствие – конфигурацией, сформированной в результате выгрузки порций шихты, поверхности засыпи.

Таблица 3.1

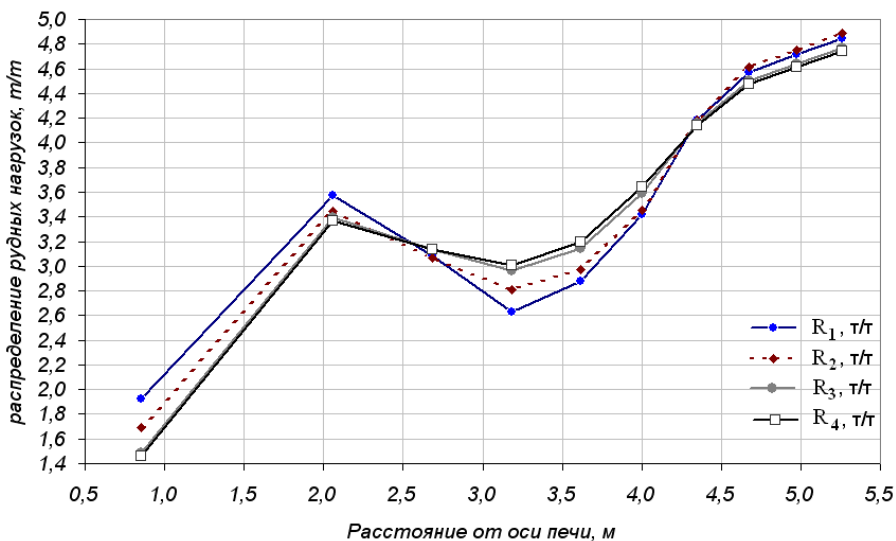
**Распределение шихтовых материалов по позициям лотка для исследуемой программы загрузки**

№ порции	Вид материала	Распределение масс по позициям лотка, %									Всего, т
		Угловая позиция распределителя									
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1	К 8-4		17	16	22	24	21				18,94
2	АОШо 9-3	15	26	18	11	11	14	4			109,77
3	К 8-4		14	18	21	23	24				18,94
4	АОШо 9-3	15	27	18	12	11	14	4			108,31
5	КШо 2-1								29	72	20,95
6	К 8-4		11	20	23	25	21				19,16
7	АОШо 9-3	15	26	18	10	11	15	5			109,77
8	К 8-4		13	18	21	24	24				19,07
9	АОШо 9-3	15	27	18	13	11	12	4			108,31
10	КО 2-1								30	70	21,49

Таблица 3.2




**Отклонения рудных нагрузок, полученных при задании 3, 6 и 9% объема вытесненного кокса от общей его массы ( $R_{i2}$ ,  $R_{i3}$  и  $R_{i4}$ ) от рудных нагрузок, полученных без учета вытеснения кокса ( $R_{i1}$ )**

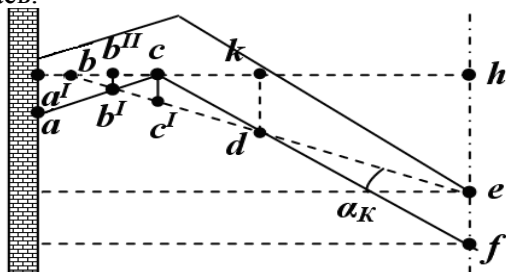
Варианты отклонений рудных нагрузок	V вытесненного кокса, %	Отклонения рудных нагрузок (т/т)									
		в равных по площади зонах сечения колошника									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		радиус средин зон, м									
		0,85	2,06	2,69	3,19	3,62	4,00	4,35	4,67	4,98	5,26
$R_1$	0	<b>1,922</b>	<b>3,571</b>	<b>3,087</b>	<b>2,629</b>	<b>2,875</b>	<b>3,415</b>	<b>4,182</b>	<b>4,574</b>	<b>4,713</b>	<b>4,847</b>
$\Delta R_{i2}$ , %	3	-0,234	-0,126	-0,016	0,180	0,095	0,041	0,006	0,041	0,041	0,042
$\Delta R_{i3}$ , %	6	-0,440	-0,180	0,049	0,333	0,267	0,180	-0,026	-0,072	-0,076	-0,080
$\Delta R_{i4}$ , %	9	-0,462	-0,203	0,046	0,375	0,320	0,231	-0,045	-0,099	-0,103	-0,106



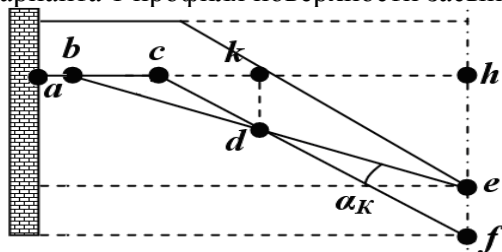
**Рис. 3.5.** Распределение рудных нагрузок  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  по радиусу колошника для исследуемой программы загрузки печи с заданием объема вытесняемого железосодержащими материалами кокса – 0, 3, 6 и 9 % соответственно

Установленная на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» система измерения профиля засыпи шихты позволяет определять фактические профили поверхности, образованные после выгрузки порций шихтовых материалов, а также с учетом их изменения в паузах между выгрузкой порций – исходные профили

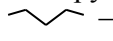
поверхности засыпи. Как показали результаты исследований с помощью радиолокационного профилемера, профиль поверхности засыпи, образованный при различных программах загрузки после выгрузки порций кокса из угловых позиций лоткового распределителя 8-4 (7-3), в большинстве случаев имеет  – образную форму (вариант 1, рис. 3.6) или  – образную форму (вариант 2, рис. 3.7). Поскольку  – образная форма профиля не является характерной для доменных печей, оборудованных БЗУ, в последующих исследованиях она не рассматривалась.



*Рис. 3.6.* Схема к определению объема вытесненного кокса для варианта 1 профиля поверхности засыпи.



*Рис. 3.7.* Схема к определению объема вытесненного кокса для варианта 2 профиля поверхности засыпи.

Как показали исследования, во время выгрузки на поверхность кокса порций железосодержащих материалов из первых по ходу выгрузки угловых позиций лоткового распределителя, при  – образной форме исходного профиля происходит заполнение железорудными материалами «кармана» в периферийной зоне сечения колошника. При этом следует подчеркнуть, что во время выгрузки железосодержащих порций из угловых позиций 9–7, вытеснения кокса к стенке печи практически не происходит, а имеет место только частичное его смешивание с

железосодержащими материалами. Начиная с 6-5-го угловых положений, во время выгрузки железосодержащих материалов на слой кокса, происходит вытеснение кокса по направлению к осевой зоне сечения колошника с частичным его перемешиванием с железосодержащими материалами. Эти положения явились основой для разработки метода определения объема вытесняемого кокса. Как было сказано выше, по результатам исследований принято, что профиль поверхности засыпи перед выгрузкой железосодержащих материалов может иметь две возможные конфигурации, схематически представленные на рис. 3.6 и 3.7 (профиль, описываемый отрезками  $ac$  и  $cf$ ). При математическом описании процесса вытеснения кокса принято, что выгружаемая на поверхность кокса порция железосодержащих материалов вытесняет часть его объема, который сосредотачивается в осевой зоне (фигура  $def$ ), причем поверхность вытесненного кокса, описываемая отрезком  $de$ , пересекается с профилем поверхности засыпи, образованным после выгрузки железосодержащих материалов в точке, лежащей на оси печи (точка  $e$ ). Отсутствие железосодержащих материалов в оси печи подтверждено результатами предпусковых исследований на ДП №4 и ДП №5 ОАО «Северсталь» [136]. Для двух вариантов формирования поверхностей, образованных после выгрузки порций железосодержащих материалов на кокс, получены математические зависимости, позволяющие по геометрической конфигурации образованных в результате выгрузки слоев шихтовых материалов определить долю вытесненного под воздействием веса железосодержащих материалов кокса.

Метод определения объема вытесненного кокса состоит из следующей последовательности операций:

1. Определение с помощью профилемера формы слоев шихты, образованных в результате выгрузки железосодержащих материалов на кокс.

2. Для условий образования формы профиля поверхности засыпи, представленной на рис. 3.6 определяется граничная точка  $b$  фигуры, описывающей объем вытесненного кокса, и находящейся на пересечении отрезков  $bh$  и  $a'h$ . Неизвестный параметр  $bh$  определяется в результате решения системы уравнений (3.5.1)–(3.5.2).

$$V_{b'cd} = -\frac{2 \cdot \pi}{(ch - x_{b'})} \cdot \left[ \frac{(ch^2 - x_{b'}^2) \cdot (ch \cdot (y_{b'} - cc') - x_{b'} \cdot y_{b'} - (y_{b'} - cc') \cdot (ch - x_{b'}))}{2} + \right. \\ \left. + \frac{cc' \cdot (ch^3 - x_{b'}^3)}{3} \right] - \frac{2 \cdot \pi}{(kh - ch)} \cdot \left[ \frac{kh \cdot cc' \cdot (kh^2 - ch^2)}{2} - \frac{cc' \cdot (kh^3 - ch^3)}{3} \right] \quad ; \\ (3.5.1)$$

$$x_{b'} = \frac{bh \cdot (he \cdot ch - he \cdot a'h - a'a \cdot ch)}{he \cdot ch - he \cdot a'h - a'a \cdot bh} \quad ; \quad y_{b'} = -\frac{he \cdot (he \cdot ch - he \cdot a'h - a'a \cdot ch)}{he \cdot ch - he \cdot a'h - a'a \cdot bh} + he$$

$$V_{def} = V_{chf} - V_{ckd} - V_{khde} \quad ;$$

$$V_{chf} = \frac{\pi}{3} \cdot ch^2 \cdot hf \quad ; \quad V_{ckd} = \frac{\pi}{3} \cdot ck^2 \cdot kd \quad ;$$

$$V_{khde} = V_{bhe} - V_{bkd} = \frac{\pi}{3} \cdot (bh^2 \cdot he - bk^2 \cdot kd) \quad ;$$

$$V_{def} = \frac{\pi}{3} \cdot ch^2 \cdot hf - \frac{\pi}{3} \cdot ck^2 \cdot kd - \frac{\pi}{3} \cdot (bh^2 \cdot he - bk^2 \cdot kd) \quad ;$$

$$ck = ch - kh \quad ;$$

1-е условие подобия:

$$\frac{kd}{hf} = \frac{ck}{ch} \quad ; \quad kd = \frac{hf \cdot (ch - kh)}{ch} \quad ;$$

2-е условие подобия:

$$\frac{kd}{he} = \frac{bk}{bh} \quad ; \quad bk = \frac{hf \cdot (ch - kh) \cdot bh}{ch \cdot he} \quad ;$$

3-е условие подобия:

$$\frac{cc'}{he} = \frac{bc}{bh} \quad ; \quad bc = bh - ch \quad ; \quad cc' = \frac{he \cdot (bh - ch)}{bh} \quad ;$$

$$kh = bh - bk = bh - \frac{hf \cdot (ch - kh) \cdot bh}{ch \cdot he} \quad ;$$

$$kh = \frac{bh \cdot ch \cdot (he - hf)}{ch \cdot he - hf \cdot bh} \quad ;$$

$$V_{def} = \frac{\pi}{3} \cdot \left[ ch^2 \cdot hf - \frac{hf \cdot (ch - kh)^3}{ch} - bh^2 \cdot he + \frac{hf^3 \cdot (ch - kh)^3 \cdot bh^2}{ch^3 \cdot he^2} \right] \quad (3.5.2);$$

$$V_{b'cd} = V_{def} \quad (3.5.3)$$

3. Для формы профиля поверхности засыпи, представленной на рис. 3.7, объем вытесненного кокса определяется следующим образом:

$$V_{chf} = \frac{\pi}{3} \cdot ch^2 \cdot hf ; V_{bhe} = \frac{\pi}{3} \cdot bh^2 \cdot he ;$$

$$V_{bhe} = V_{chf} ; bh = ch \cdot \sqrt{\frac{hf}{he}} ;$$

$$kh = \frac{bh \cdot ch \cdot (he - hf)}{ch \cdot he - hf \cdot bh} ;$$

$$V_{def} = \frac{\pi}{3} \cdot \left[ ch^2 \cdot hf - \frac{hf \cdot (ch - kh)^3}{ch} - bh^2 \cdot he + \frac{hf^3 \cdot (ch - kh)^3 \cdot bh^2}{ch^3 \cdot he^2} \right] \quad (3.5.4)$$

Разработанный метод определения объема вытесненного кокса был опробован для шести периодов работы и программ загрузки печи (табл. 3.3) с характерными для них слоями шихтовых материалов, определенными с помощью радиолокационного профилемера. Полученные с помощью профилемера слои, образованные в результате выгрузки железосодержащих материалов на кокс, в исследуемые периоды, для которых опробовался метод определения объема вытесненного кокса, представлены на рис. 3.8. В результате расчетов для каждой рассматриваемой программы загрузки для отдельных пар порций в цикле загрузки, выбранных из соображений максимального отличия масс порций в указанных парах (см. табл. 3.4), получено, что объем вытесненного кокса после выгрузки на него железосодержащих материалов для всех вариантов работы печи в исследуемые периоды изменяется в диапазоне от 0,62 м<sup>3</sup> до 3,63 м<sup>3</sup>, что составляет, соответственно, от 1,05 % до 7,05 % от общей массы кокса. Полученные результаты представлены в табл. 3.4 и на рис. 3.9 и в достаточной степени согласуются со значениями объемов вытесненного кокса, определенными при проведении исследований перед задувкой доменных печей после проведения капитальных ремонтов I-го разряда [96, 98, 136–140].

Как следует из приведенных на рис. 3.9 графиков (для периодов 1-3, 5 и 6), при увеличении массы порций железорудных материалов, выгружаемых на слои кокса, объем вытесняемого кокса увеличивается. Однако, объем вытесненного кокса определяется не только массой выгружаемых на него железосодержащих материалов, но и зависит от массы

выгруженного перед железосодержащими кокса. Это следует из представленного на рис. 3.9 графика изменения объема вытесненного кокса в периоде 4, для которого характерным является выгрузка увеличенной массы железорудных материалов на исходный слой кокса уменьшенной массы, по сравнению с другими периодами. Это свидетельствует о том, что помимо формы поверхности засыпи и углов ее наклона, на которых основан разработанный метод, на объем вытесненного кокса существенно влияют массы выгружаемых порций материалов, которые, в свою очередь, и формируют поверхность засыпи шихты.

Таблица 3.3

**Режимы загрузки ДП №9 в анализируемые периоды ее работы**

Период работы печи <sup>1)</sup> , (дата)	Программа загрузки: угловые позиции лотка БЗУ: 9...1									
	Шихтовые материалы: А – агломерат, О – окатыши, Ш <sub>0</sub> – шлак обогащенный, К – кокс.									
	Номер порции материалов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Период 1 <sup>1)</sup> , (16.11.2004)	К 8-4	К 3-1	АШ <sub>0</sub> 9-6	АО 9-3	<b>К<sup>(2)</sup></b> <b>8-4</b>	<b>А</b> <b>9-6</b>	АО 6-3	-/-	-/-	-/-
Период 2 <sup>1)</sup> , (24.06.2005)	К 3-1	АШ <sub>0</sub> 9-5	К 8-4	АО 9-3	К 4-1	К 8-4	АШ <sub>0</sub> 9-4	<b>К<sup>(2)</sup></b> <b>7-3</b>	<b>АО</b> <b>9-3</b>	-/-
Период 3 <sup>2)</sup> , (29.05.2008)	К 8-4	АОШ <sub>0</sub> 9-3	<b>К<sup>(2)</sup></b> <b>8-4</b>	<b>АОШ<sub>0</sub></b> <b>9-3</b>	К 8-4	КО 2-1	АОШ <sub>0</sub> 9-3	К 8-4	АОШ <sub>0</sub> 9-3	К 2-1
Период 4 <sup>2)</sup> , (05.10.2006)	К 8-4	АОШ <sub>0</sub> 9-3	<b>К<sup>(2)</sup></b> <b>8-4</b>	<b>АОШ<sub>0</sub></b> <b>9-3</b>	КШ <sub>0</sub> 2-1	К 8-4	АОШ <sub>0</sub> 9-3	К 8-4	АОШ <sub>0</sub> 9-3	КО 2-1
Период 5 <sup>1)</sup> , (16.10.2004)	К 3-1	АШ <sub>0</sub> 9-6	К 8-5	АО 9-3	КО 3-1	КШ <sub>0</sub> 8-4	АО 8-4	<b>К<sup>(2)</sup></b> <b>8-4</b>	<b>АО</b> <b>9-3</b>	-/-
Период 6 <sup>1)</sup> , (25.03.2005)	К 3-1	А 9-6	К 8-5	АО 9-3	К 3-1	К 8-4	АО 8-4	<b>К<sup>(2)</sup></b> <b>8-4</b>	<b>АО</b> <b>9-3</b>	-/-

<sup>1)</sup> Углы наклона лотка БЗУ по позициям: 9-46,2°; 8-45,4°; 7-42,8°; 6-40,1°; 5-37,4°; 4-34,3°; 3-30,9°; 2-26,9°; 1-22,1°;

<sup>2)</sup> Углы наклона лотка БЗУ по позициям: 9-45,9°; 8-42,7°; 7-40,0°; 6-37,1°; 5-34,1°; 4-30,7°; 3-26,7°; 2-22,9°; 1-18,0°; 3) Пара порций в цикле загрузки, для которой отработан метод определения объема вытесненного кокса железосодержащими материалами.

Зависимость объема вытесненного кокса от отношения масс выгруженных железосодержащих материалов и исходного кокса представлена на рис. 3.10 и может быть с коэффициентом корреляции 0,96 описана функцией:

$$V_k = -1,2564 \left( \frac{M_{жссм}}{M_k} \right)^2 + 12,239 \frac{M_{жссм}}{M_k} - 23,357 \quad (3.5.5),$$

где  $V_k$  – объем вытесненного кокса, %

$M_k$  – масса кокса, т;

$M_{жссм}$  – масса железосодержащих материалов, выгружаемых на кокс, т;

Таблица 3.4

### Изменение объема вытесненного кокса под действием выгруженной на него массы железосодержащих материалов

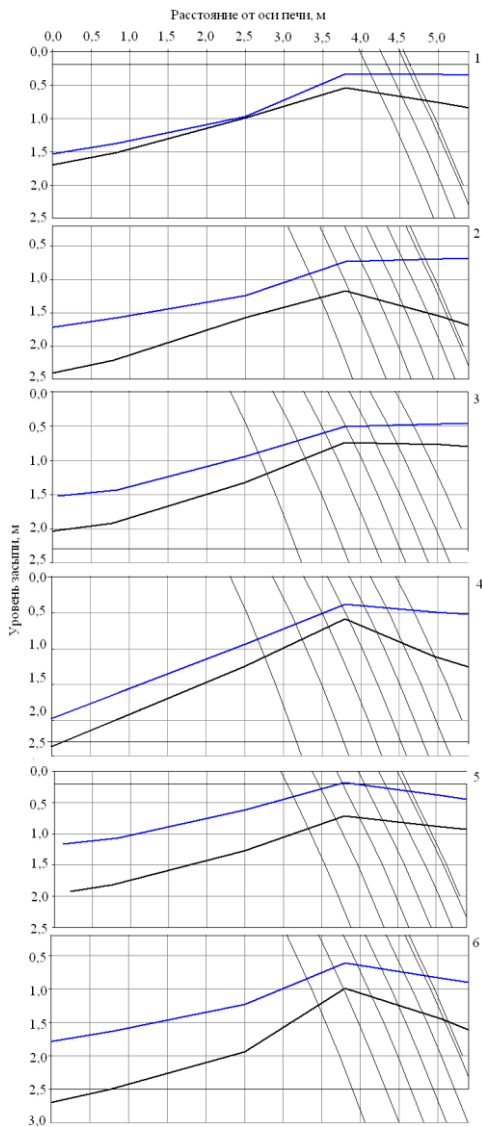
Исследуемый период, №, дата	1	2	3	4	5	6
	16.11. 2004	24.06. 2005	29.05. 2008	05.10. 2006	16.10. 2004	25.03. 2005
порция железосодержащих материалов, выгружаемая на кокс	А 9-6	АО 9-3	АОШо 9-3	АОШо 9-3	АО 9-3	АО 9-3
порция кокса	К 8-4	К 7-3	К 8-4	К 8-4	К 8-4	К 8-4
$M_{\text{к}}^{\text{II}}$ , т	29,65	26,14	22,92	18,94	22,90	25,97
$M_{\text{жсм}}^{\text{II}}$ , т	82,12	99,29	106,80	108,57	121,10	121,49
$V_{\text{вытесненного кокса}}$ , м <sup>3</sup>	0,62	2,43	2,63	1,89	3,23	3,63
$V_{\text{вытесненного кокса}}$ , %	1,05	4,65	5,70	5,00	7,05	6,99

Полученная зависимость может быть применима только при изменении отношения  $\frac{M_{\text{жсм}}}{M_{\text{к}}}$  от 2,8 ед. до 7,0 ед.

Опробование разработанного метода для исследуемых вариантов работы печи с использованием измерений радиолокационным профиломером слоев шихтовых материалов показало, что объем вытесненного кокса определяется, как конфигурацией, сформированной в результате выгрузки порций шихты, поверхности засыпи и углов ее наклона так и массами кокса и выгружаемых на него железосодержащих материалов. Это свидетельствует о влиянии соотношения толщин слоев железорудных материалов и кокса на объем вытесненного кокса, которое описано математической зависимостью.

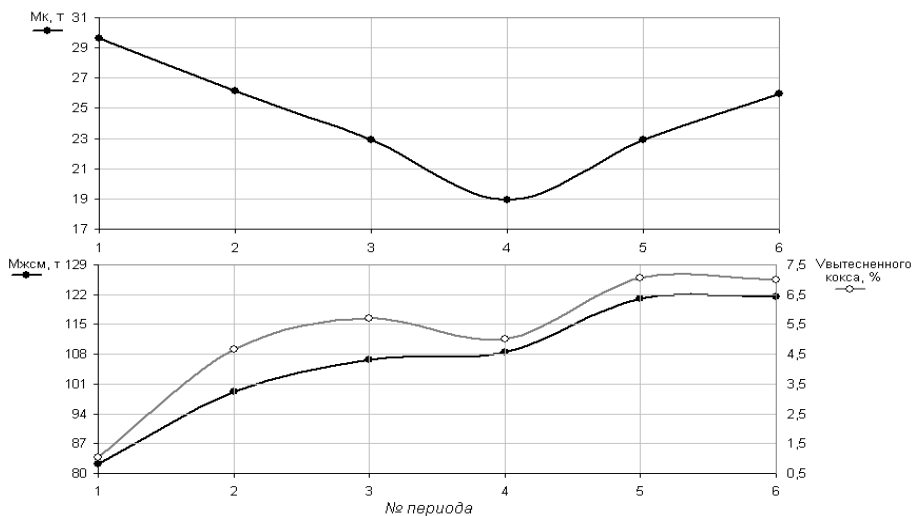
Разработанный метод определения объема вытесненного кокса при выгрузке на него железосодержащих компонентов шихты может быть использован в составе информационной системы расчета и отображения информации, полученной с помощью радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи, а также в составе математической модели радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи.



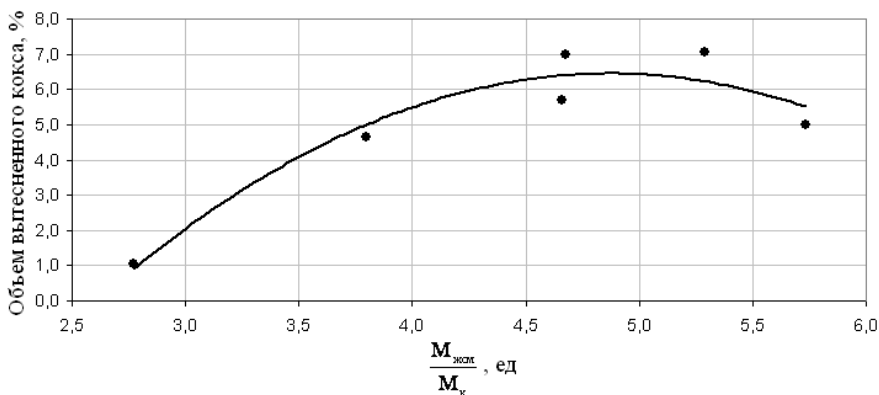


*наклонные линии – траектории центров тяжести потоков шихтовых материалов, сходящихся с лотка БЗУ при использовании 9...1 его угловых позиций.*

**Рис. 3.8.** Конфигурация слоев шихты, образованных в результате выгрузки железосодержащих материалов на кокс для шести исследуемых периодов работы печи (1–6, табл. 3.3)



**Рис. 3.9.** Изменение массы кокса, массы выгруженных на него железосодержащих материалов и объема вытесненного кокса



**Рис. 3.10.** Зависимость вытесненного кокса от отношения масс железосодержащих материалов и кокса

### 3.6 Метод определения скоростей опускания поверхности шихтовых материалов

#### 3.6.1 Разработка способа определения скоростей опускания шихтовых материалов по радиусу колошника

Одним из параметров, характеризующих ход печи, является скорость опускания шихтовых материалов. В отличие от известных профиломеров, радиолокационная система, состоящая из стационарно установленных измерителей, позволяет одновременно определять скорости опускания шихты в различных сечениях колошника.

Для определения скоростей опускания шихты, в частности, для условий ДП №9 объемом 5034 м<sup>3</sup> ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», оборудованной БЗУ и стационарной системой измерения профиля поверхности засыпи, на основе экспериментальных исследований разработан метод их расчета. На первом этапе целью проведенных исследований являлся выбор способа определения скорости опускания шихты по сечению колошника и установление фактического диапазона ее изменения для существующих параметров дутьевого и газодинамического режимов в исследуемые периоды работы печи (табл. 3.5). Характерной особенностью режима загрузки печи является использование многокомпонентной шихты, а также 9–10-ти порционной циклически повторяющейся программы загрузки шихтовых материалов, предусматривающей выгрузку в осевую зону печи 1–2 порций кокса, а также смеси его с окатышами и обогащенным шлаком. В исследуемые периоды I – III работы ДП №9 загрузка порций шихтовых материалов (А – агломерат; О – окатыши; Ш<sub>о</sub> – шлак обогащенный; К – кокс) осуществлялась в соответствии с программой: 1 – К 8-4, 2 – АОШ<sub>о</sub> 9-3, 3 – К 8-4, 4 – АОШ<sub>о</sub> 9-3, 5 – КШ<sub>о</sub> 2-1, 6 – К 8-4, 7 – АОШ<sub>о</sub> 9-3, 8 – К 8-4, 9 – АОШ<sub>о</sub> 9-3, 10 – КО 2-1. Загрузка порций из 9...1 – угловых позиций наклона лотка БЗУ осуществлялась на уровень засыпи 1,2 м, при этом в печь загружалось последовательно 10 порций, составляющих цикл. Масса рудной части подачи (М<sub>р</sub>) составляла 104,4 – 112,1 т, рудная нагрузка – 3,30 – 3,46 т/т кокса.

Параметры дутьевого и газодинамического режимов работы ДП №9 в исследуемые периоды приведены в табл. 3.5, где Q<sub>д</sub>, P<sub>д</sub> и T<sub>д</sub> – расход, давление и температура дутья; [O<sub>2</sub>] – доля кислорода в дутье; Q<sub>пр</sub> – расход природного газа, вдуваемого в печь; P<sub>к</sub> – давление колошникового газа; ΔP<sub>об</sub>, ΔP<sub>в</sub>, ΔP<sub>н</sub> – общий, верхний и

нижний перепады давления в печи;  $T_{пф}$ ,  $T_{го}$  – температура газа на периферии и в газоотовах.

Таблица 3.5

**Параметры дутьевого и газодинамического режимов работы ДП №9 в исследуемые периоды**

Период работы печи	$Q_d$ , м <sup>3</sup> /мин	$T_{гд}$ , °С	$R_d$ , ати	$[O_2]$ , %	$R_k$ , ати	$Q_{пг}$ , м <sup>3</sup> /мин
I	8584	1097	3,34	30,8	1,40	581
II	8634	1097	3,35	30,9	1,40	583
III	8663	1114	3,24	28,6	1,30	527
Период работы печи	$\Delta P_{об}$ , ати	$\Delta P_v$ , ати	$\Delta P_n$ , ати	$T_{го}$ , °С	$T_{пф}$ , °С	
I	1,94	0,50	1,44	107	267	
II	1,95	0,49	1,46	101	249	
III	1,94	0,34	1,60	76	124	

Значения скорости опускания поверхности шихты определялись в каждой точке измерения уровня засыпи по четырем радиусам колошника, расположенным вдоль осей электромеханических уровнемеров (зондов) ЭМЗ-1 – ЭМЗ-4.

Скорость опускания шихты на колошнике ( $v_{ш}$ ) определялась отношением разности уровней в измеряемых точках поверхности засыпи к интервалу времени, соответствующему периоду после и перед выгрузкой каждой очередной порции, согласно выражению:

$$v_{ш}^n = \frac{Y_{ПП}^{n+1} - Y_{ПВ}^n}{t_{ПП}^{n+1} - t_{ПВ}^n} \quad (3.6.1),$$

где: n – номер порции в цикле загрузки печи,  $Y_{ПП}$  – уровень точки поверхности засыпи перед выгрузкой порции,  $Y_{ПВ}$  – уровень точки поверхности засыпи после выгрузки порции,  $t_{ПП}$  – время регистрации уровней точек поверхности засыпи перед выгрузкой порции,  $t_{ПВ}$  – время регистрации уровней точек поверхности засыпи после выгрузки порции.

Для подтверждения правильности способа определения скоростей опускания шихтовых материалов выполнен расчет времени пребывания шихты в доменной печи и определены взаимосвязи скоростей опускания с основными параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки.

Величины средних скоростей опускания поверхности шихты по двум диаметрам колошника за 8 часов загрузки печи

( $v_{ш}^{cp}$ ), полученные в исследуемые периоды работы печи, приведены в табл. 3.6, а средние скорости опускания шихты по сечению печи – в табл. 3.7. Полученные значения скоростей усреднялись для каждой из четырех зон установки измерителей уровня засыпи: ПФ – периферийная зона (0,35 м от стенки колошника); 1П – первая промежуточная зона (1,6 м); 2П – вторая промежуточная зона (2,9 м); Ц – центральная зона (4,5 м) и приводились к среднему значению для указанных четырех радиусов колошника (табл. 3.7).

Из анализа данных, приведенных в табл. 3.6–3.8 следует, что для исследуемых периодов работы печи соотношение скоростей опускания шихтовых материалов в оси печи и на

периферии  $v_{ш}^y : v_{ш}^{nф}$  распределяется следующим образом: для периодов I – 1,19 ед., II – 1,09 ед., III – 1,34 ед. Полученные для исследуемых периодов фактические средние скорости опускания шихты (табл. 3.8) были сопоставлены с расчетными величинами среднесуточной скорости опускания шихтовых материалов ( $v_{ш}^{cp}$ ) для I-го и II-го периодов, определяемыми из выражений для расчетов средней величины времени пребывания шихты в печи ( $\tau_{ш}^{cp}$ ), ч [141, 142]:

$$\tau_{ш_1}^{cp} = 24[V_{П} / П \cdot V_{Ш} \cdot (1 - f)], \quad (3.6.2)$$

$$\tau_{ш_2}^{cp} = 25[V_{П} / П \cdot V_{Ш}], \quad (3.6.3)$$

где:  $V_{П}$  – полезный объем печи – 5034 м<sup>3</sup>; П – суточная производительность I – 10017 т/сут, II – 9630 т/сут;  $V_{Ш}$  – объем шихты (без «уминки») на 1 т чугуна – 1,974 м<sup>3</sup>/т и 1,954 м<sup>3</sup>/т; f – коэффициент «уминки» – 0,125 ед.; S – расстояние от технологического нуля до уровня оси леток для чугуна – 33 м.;  $S_{ф}$  – расстояние уровня засыпи до оси воздушных фурм – 27,5 м.

Для третьего периода работы печи среднесуточная скорость опускания шихты не рассчитывалась в связи с длительными простоями печи в этот период.

В I–м и II–м периодах работы доменной печи среднее расчетное время пребывания шихты в печи ( $\tau_{ш}^{cpI}$ ,  $\tau_{ш}^{cpII}$ ) составило:  $\tau_{ш(1)-(2)}^{cpI} = 6,674$  ч и  $\tau_{ш(1)-(2)}^{cpII} = 7,024$  ч, а средняя расчетная величина скорости опускания шихты для периодов I и II составила, соответственно,  $v_{ш(1)-(2)}^{cpI} = 4,78$  м/ч (0,080 м/мин) и  $v_{ш(1)-(2)}^{cpII} = 4,54$  м/ч (0,076 м/мин), при средней фактической (измеренной) скорости  $v_{ш\text{ факт.}}^{cpI} = 4,5$  м/ч (0,075 м/мин) и  $v_{ш\text{ факт.}}^{cpII} = 4,44$  м/ч (0,074 м/мин).

Относительная разность расчетных и фактических значений (невязка) средней скорости опускания шихты в печи –

$$\Delta_{(1),(2)}^{I,II} = v_{ш(1),(2)}^{cpI,II} - v_{факт}^{cpI,II} / v_{ш(1),(2)}^{cpI,II} \cdot 100\% \text{ для}$$

периодов I и II составила, соответственно, 6,3 % и 2,63 %. Полученные результаты указывают на достаточную сходимость расчетных и измеренных средних значений скорости опускания шихты в эти периоды работы доменной печи и являются подтверждением правильности выбора метода определения их значений по сечению колошника с помощью профилемера.

Таблица 3.6

**Значения скоростей опускания шихты по диаметрам колошника ДП №9**

Период	Радиус	Скорость опускания шихты, м/мин								Радиус
		Расстояние от оси печи до точки измерения уровня засыпи, м								
		5,05	3,8	2,5	1,0	1,0	2,5	3,8	5,05	
I	ЭМЗ-1	0,078	0,058	0,066	0,089	0,106	0,065	0,067	0,088	ЭМЗ-3
	ЭМЗ-2	0,084	0,058	0,053	0,100	0,102	0,044	0,051	0,082	ЭМЗ-4
II	ЭМЗ-1	0,087	0,062	0,070	0,086	0,101	0,058	0,059	0,092	ЭМЗ-3
	ЭМЗ-2	0,099	0,054	0,052	0,097	0,107	0,040	0,046	0,080	ЭМЗ-4
III	ЭМЗ-1	0,083	0,066	0,095	0,103	0,124	0,083	0,079	0,089	ЭМЗ-3
	ЭМЗ-2	0,091	0,076	0,080	0,115	0,116	0,125	0,057	0,080	ЭМЗ-4

Таблица 3.7

**Диапазоны изменения средней скорости опускания шихты на колошнике ДП №9**

Период работы печи	Диапазон изменения средней скорости (минимум – максимум), м/мин	Значение средней скорости опускания шихты, м/мин
	$v_{ш}^{\min} - v_{ш}^{\max}$	$v_{ш}^{cp}$
I	0,044–0,106	0,075
II	0,040–0,107	0,074
III	0,057–0,125	0,092

Анализ результатов оценки корреляционной взаимосвязи

$$r_{X,Y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - m_X) \cdot (Y_i - m_Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

величин средней скорости опускания

поверхности шихты на колошнике ( $v_{ш,Sk}^{cp}$ ) и в кольцевых зонах

его сечения ( $v_{ш,ПФ,1П,2П,Ц}^{cp}$ ) с основными параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки в исследуемые периоды I–III (табл. 3.5 и 3.8) показал следующее.

Изменение средней скорости опускания шихты по сечению колошника печи в значительной степени взаимосвязано с расходом дутья  $Q_d$  ( $r_{xy} = 0,93$ ) и средней температурой газа в газоотводах ( $r_{xy} = -0,881$ ), общим перепадом давления –  $\Delta P_{общ}$  ( $r_{xy} = -0,53$ ), а также верхним и нижним перепадами ( $r_{xy} = -0,569$  и  $r_{xy} = 0,546$ ). Изменение скорости в периферийной зоне печи взаимосвязано с давлением дутья  $P_d$  ( $r_{xy} = 0,763$ ), давлением колошниковога газа –  $P_{кол}$  ( $r_{xy} = 0,761$ ), и отношением  $P_{кол} / \Delta P_{общ}$  ( $r_{xy} = 0,758$ ), а также расходом дутья –  $Q_d$  ( $r_{xy} = 0,77$ ). Увеличение расхода дутья сопровождалось повышением скорости опускания шихты в первой, второй промежуточной и осевой зонах – ( $r_{xy} = 0,95$ ;  $r_{xy} = 0,888$  и  $r_{xy} = 0,932$ ), при этом температура газа в газоотводах уменьшалась ( $r_{xy} = -0,91$ ;  $r_{xy} = -0,945$  и  $r_{xy} = -0,727$ ). Повышение давления дутья приводило к увеличению скорости схода шихты в периферийной зоне колошника ( $r_{xy} = 0,763$ ). Увеличение давления колошниковога газа и отношения  $P_{кол} / \Delta P_{общ}$  в значительной степени приводило к ускорению опускания шихты в периферийной зоне ( $r_{xy} = 0,761$  и  $0,758$ ). Влияние общего перепада давления в печи на скорость опускания шихты проявлялось, в большей мере, в первой и во второй промежуточных зонах печи ( $r_{xy} = -0,527$ ;  $r_{xy} = -0,606$ ), а также в центральной зоне ( $r_{xy} = -0,558$ ).

Анализ изменения скоростей опускания шихты по сечению колошника показал их взаимосвязь с основными параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки, что является подтверждением правильности выбранного способа определения скоростей.

Таблица 3.8

**Средние значения скоростей опускания шихтовых материалов по сечению колошника (<sup>1</sup> – ПФ, 1П, 2П, Ц – периферийная, промежуточные, центральная зоны сечения колошника) ( $v_{ш}^{cp}$ )**

**ДП №9 за время загрузки циклов порций шихтовых материалов**

Период работы печи	Скорость опускания шихты ( $V_{ш}^{cp}$ ), М/МИН М/Ч				
	Зоны сечения колошника				Средняя
	ПФ <sup>1)</sup>	1П	2П	Ц	
I	<u>0,083</u> (4,98)	<u>0,059</u> (3,54)	<u>0,057</u> (3,42)	<u>0,099</u> (5,94)	<u>0,075</u> (4,50)
II	<u>0,090</u> (5,40)	<u>0,055</u> (3,30)	<u>0,055</u> (3,30)	<u>0,098</u> (5,88)	<u>0,074</u> (4,44)
III	<u>0,086</u> (5,16)	<u>0,070</u> (4,20)	<u>0,096</u> (5,76)	<u>0,115</u> (6,90)	<u>0,092</u> (5,52)

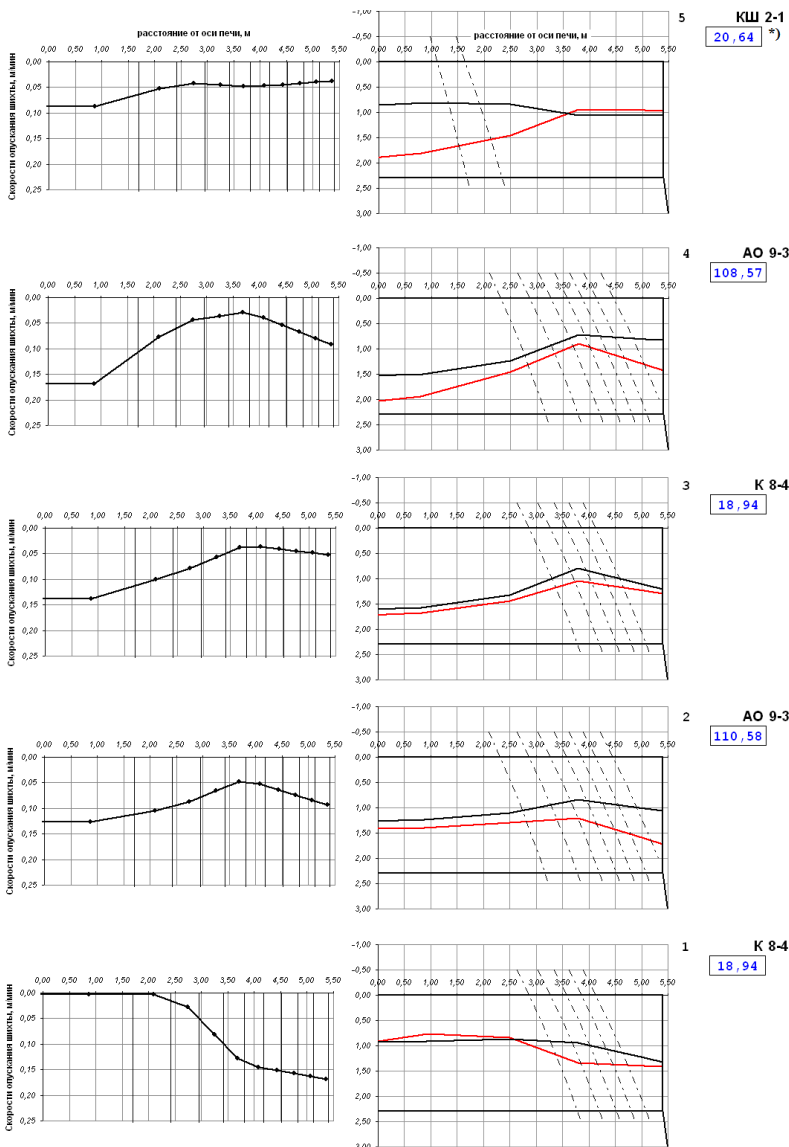
### 3.6.2 Обоснование временного интервала расчета скоростей опускания шихтовых материалов

Выполненные исследования на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» для трех периодов работы печи позволили определить скорости опускания шихтовых материалов по сечению колошника после выгрузки в печь каждой порции шихтовых материалов в цикле загрузки. Анализ рассчитанных значений скоростей опускания поверхности засыпи в различных сечениях колошника показал, что в цикле загрузки, состоящем из 10 последовательно выгружаемых порций, формирование профиля поверхности засыпи и характер ее опускания в каждой из зон различный, что обусловлено в значительной мере движением газового потока. На рис. 3.11а и 3.11б приведены графики изменения скоростей опускания шихты по радиусу колошника после выгрузки последовательно каждой порции для I-го периода работы ДП №9.

Из приведенных графиков следует, что при опускании 1-ой порции кокса, выгруженного из позиций лоткового распределителя (8-4), газовый поток интенсифицируется в осевой зоне печи, где

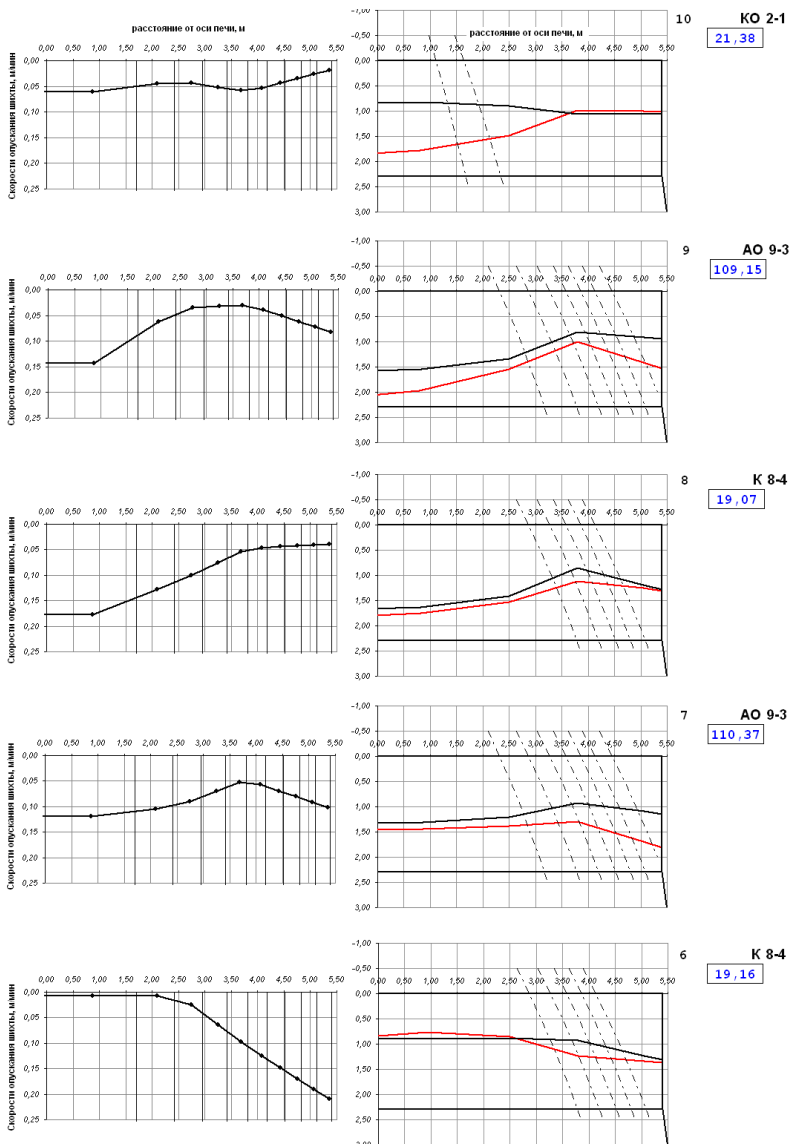


над поверхностью образуется взвешенный слой из мелких фракций кокса, что идентифицируется нулевыми значениями скоростей опускания в этой зоне. При этом в периферийной зоне шихта опускается с большой скоростью. После выгрузки 2-ой порции АО 9-3 характерным является опускание с большими скоростями поверхности засыпи в осевой зоне печи и с меньшими, по сравнению с 1-ой порцией, скоростями на периферии, что свидетельствует о преимущественном развитии потока газа в этой зоне. После загрузки 3-ей порции К 8-4 усиление газового потока в периферийной зоне сохраняется. Распределение скоростей опускания поверхности засыпи после выгрузки 4-ой порции АО 9-3 вызвано, по-видимому, выходом из цилиндрической части колошника выгруженной в центр печи 10-ой порции кокса К 3-1 предыдущего цикла, при этом резко возрастает скорость опускания поверхности шихты в осевой зоне. После выгрузки 5-ой порции КШ<sub>0</sub> 2-1 газовый поток в осевой зоне «запирается» коксом, и скорость опускания в ней шихты уменьшается. Уменьшение скорости опускания наблюдается и в периферийной зоне, что вызвано, по-видимому, перераспределением газового потока и движением большего его количества по периферии. Указанный характер распределения скоростей опускания аналогичных последующих порций в цикле загрузки повторяется. Характер распределения скоростей опускания шихты по сечению колошника печи достаточно близок к форме профиля поверхности засыпи, что наглядно иллюстрируют графики, приведенные на рис. 3.11. Характер формирования поверхности засыпи на колошнике печи после выгрузки каждой порции материалов в пределах цикла загрузки хорошо иллюстрируют приведенные на рис. 3.12 графики изменения скоростей после выгрузки порций шихтовых материалов – коксовых, выгружаемых из позиций лотка (8-4) и железосодержащих из позиций (9-3), объединенных попарно в подачи. Идентичность изменения скоростей в I-м и II-м периодах работы печи, а также увеличение их значений в третьем и четвертом периодах подтверждает достоверность их определения с помощью выбранного способа. О наличии автоколебательного процесса в печи, вызванного периодической подгрузкой рудой центральной части печи, сказано в работе [143]. В более ранних исследованиях, проведенных Кинни [104], установлено, что при выгрузке каждой подачи материалов в печь, механические устройства, с помощью которых осуществлялись измерения скорости опускания шихты, совершают затухающие колебания.

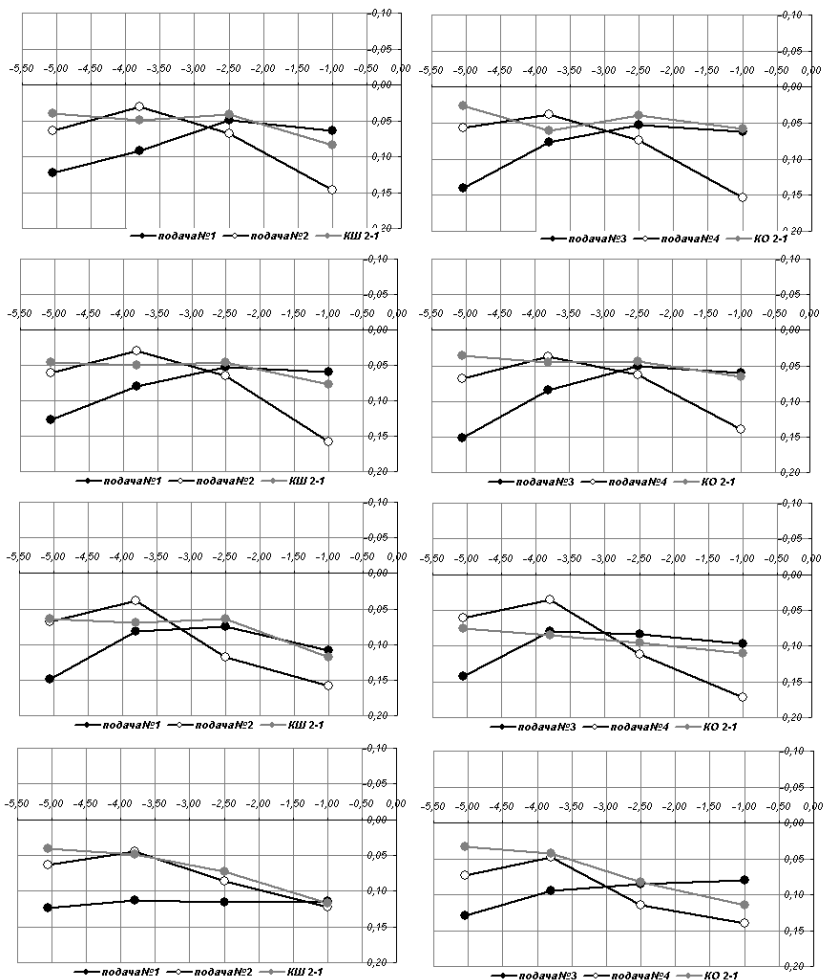


\*) - № порции, вид материала, угловые положения лотка, масса порции (т)

**Рис. 3.11а.** Изменение скоростей опускания шихты и профиля поверхности засыпи исходного и после выгрузки порции шихтовых материалов для I-го периода работы печи.



**Рис. 3.11б.** Изменение скоростей опускания шихты и профиля поверхности засыпи исходного и после выгрузки порции шихтовых материалов для I-го периода работы печи.



**Рис. 3.12.** Характер изменения скоростей опускания поверхности засыпи шихты, образованной в результате выгрузки порций, объединенных в подачи для четырех исследуемых периодов работы печи

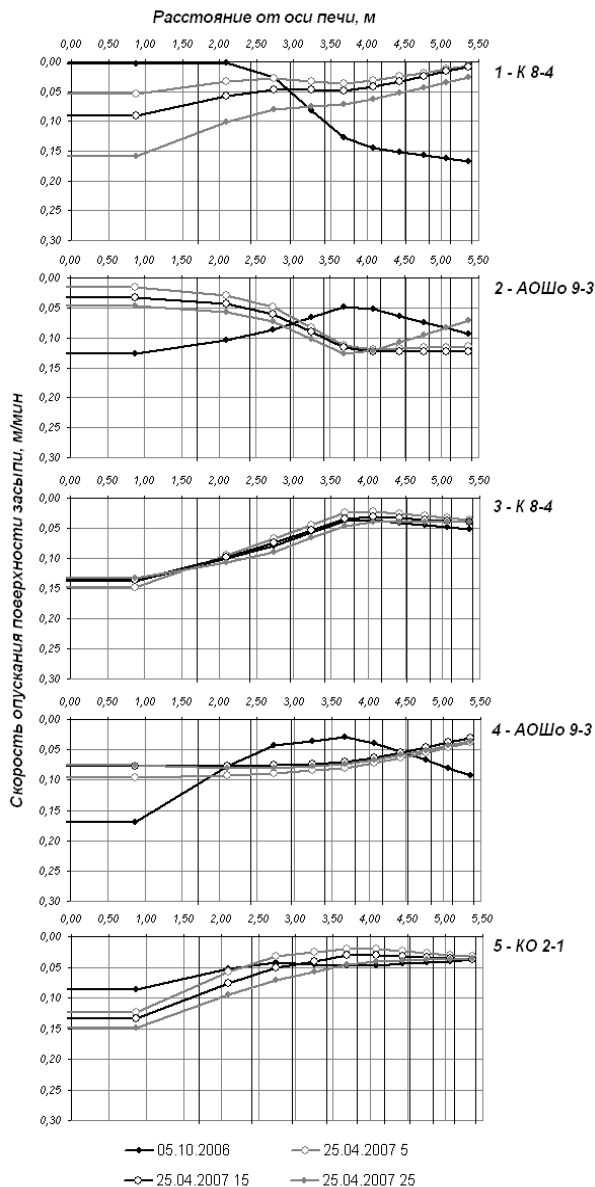
По мнению Кинни, это является следствием вертикального колебательного движения столба материалов в печи, вызываемого ударом падающих на поверхность засыпи порций материалов. В своей монографии [104] И. Г. Половченко опровергает такие предположения, считая, что толчок падающих материалов не может распространиться на всю высоту столба шихты. По его мнению, при закупоривании каналов в верхней части столба шихты после приема подачи, повышение давления газов под уровнем засыпи может вспучивать шихту и вызывать обратное движение зондов. Исходя из полученных с помощью радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи данных, следует, что для условий ДП №9 выгрузка двух порций кокса в цикле загрузки в осевую зону печи является фактором, вызывающим образование взвешенного слоя в этой зоне. В табл. 3.9 приведены значения скоростей опускания поверхности засыпи, образованной после выгрузки каждой порции шихтовых материалов в цикле загрузки печи для четырех исследуемых периодов. С целью определения причин и особенностей образования взвешенного слоя после выгрузки ряда порций в цикле загрузки, выполнены исследования изменения распределения скоростей опускания поверхности засыпи шихты, рассчитанных в различных временных интервалах по окончании процесса выгрузки порций. На рис. 3.13 и 3.14 приведены графики, иллюстрирующие характер распределения скоростей опускания поверхности шихты для двух периодов работы печи, первого – 05.10.2006 г. и второго – 25.04.2007 г. Причем, для первого исследуемого периода расчет скоростей осуществлялся по истечении 5 секунд после окончания выгрузки порций. Для сравнения на графиках представлены скорости опускания шихты для периода работы печи – 25.04.2007 г. с близкими к периоду I параметрами ее работы. Скорости опускания шихты для периода 25.04.2007 г. рассчитывались через 5, 15, 25 (рис. 3.13) и 35, 45, 55 (рис. 3.14) секунд после окончания выгрузки порций. Сопоставление кривых изменения распределения скоростей опускания показывает, что временной интервал, по окончании которого осуществляется расчет скоростей, в значительной степени влияет на их значения.

Анализ результатов исследований поведения шихтовых материалов в периоде работы ДП №9 – 25.04.2007 г. при практически аналогичной программе загрузки в периодах 05.10.2006, 06.10.2006, 17.10.2006 и 26.10.2006 гг., позволил установить некоторые особенности в опускании поверхности засыпи шихтовых материалов.

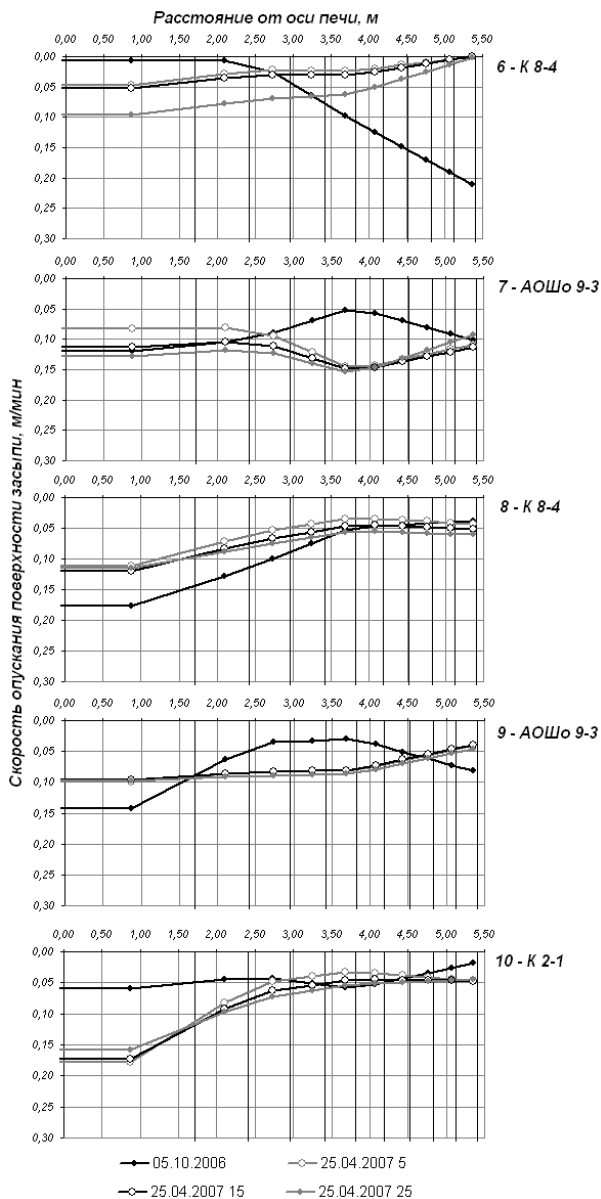
Таблица 3.9.

**Приведенные к одному радиусу значения скоростей опускания  
поверхности засыпи, образованной после выгрузки порций  
шихтовых материалов**

Период работы печи	Наименование порции	Скорости опускания шихты, м/мин			
		Кольцевая зона сечения колошника			
		<i>ПФ</i>	<i>ПП</i>	<i>2П</i>	<i>Ц</i>
05.10.2006	1 – К 8-4	0,163	0,141	0,002	0,003
	2 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,083	0,043	0,097	0,124
	3 – К 8-4	0,048	0,033	0,089	0,134
	4 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,079	0,028	0,047	0,159
	5 – КПШ <sub>0</sub> 2-1	0,040	0,049	0,041	0,084
	6 – К 8-4	0,190	0,107	0,007	0,007
	7 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,090	0,047	0,099	0,117
	8 – К 8-4	0,041	0,048	0,113	0,171
	9 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,072	0,029	0,036	0,134
	10 – КО 2-1	0,027	0,060	0,040	0,058
	Средняя скорость	0,083	0,059	0,057	0,099
06.10.2006	1 – К 8-4	0,178	0,130	0,014	0,006
	2 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,076	0,029	0,091	0,114
	3 – К 8-4	0,068	0,049	0,094	0,123
	4 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,053	0,011	0,035	0,192
	5 – КПШ <sub>0</sub> 2-1	0,046	0,050	0,046	0,078
	6 – К 8-4	0,218	0,130	0,011	0,007
	7 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,084	0,038	0,091	0,114
	8 – К 8-4	0,072	0,059	0,096	0,127
	9 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,065	0,015	0,030	0,151
	10 – КО 2-1	0,036	0,045	0,043	0,066
	Средняя скорость	0,090	0,055	0,055	0,098
17.06.2006	1 – К 8-4	0,209	0,109	0,047	0,091
	2 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,088	0,053	0,102	0,125
	3 – К 8-4	0,046	0,053	0,106	0,119
	4 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,090	0,024	0,131	0,197
	5 – КПШ <sub>0</sub> 2-1	0,064	0,070	0,063	0,119
	6 – К 8-4	0,184	0,095	0,035	0,070
	7 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,100	0,063	0,131	0,123
	8 – К 8-4	0,047	0,045	0,132	0,161
	9 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,073	0,025	0,092	0,184
	10 – КО 2-1	0,075	0,085	0,095	0,110
	Средняя скорость	0,098	0,062	0,093	0,130
26.06.2006	1 – К 8-4	0,147	0,158	0,099	0,084
	2 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,101	0,068	0,132	0,146
	3 – К 8-4	0,044	0,043	0,064	0,082
	4 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,082	0,046	0,108	0,163
	5 – КПШ <sub>0</sub> 2-1	0,041	0,049	0,073	0,117
	6 – К 8-4	0,171	0,134	0,064	0,048
	7 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,088	0,057	0,107	0,112
	8 – К 8-4	0,040	0,059	0,095	0,108
	9 – АОШ <sub>0</sub> 9-3	0,107	0,037	0,134	0,172
	10 – КО 2-1	0,034	0,042	0,082	0,114
	Средняя скорость	0,086	0,069	0,096	0,115

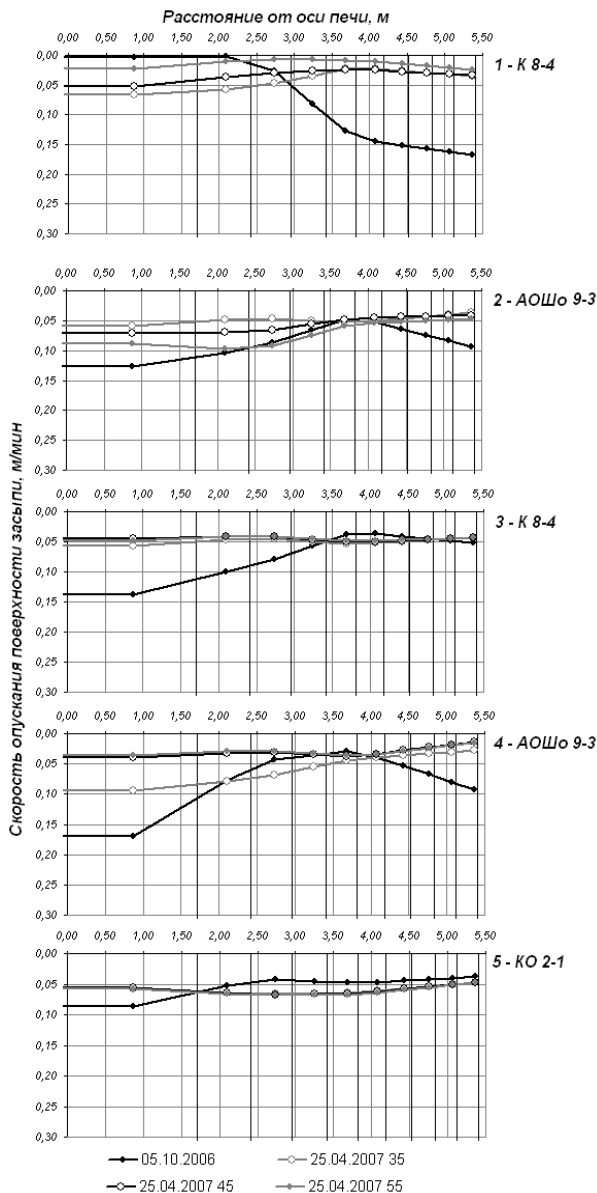


**Рис. 3.13а.** Изменение скоростей опускания поверхности засыпи шихты, рассчитанных с временной выдержкой 5, 15 и 25 с после окончания выгрузки порции

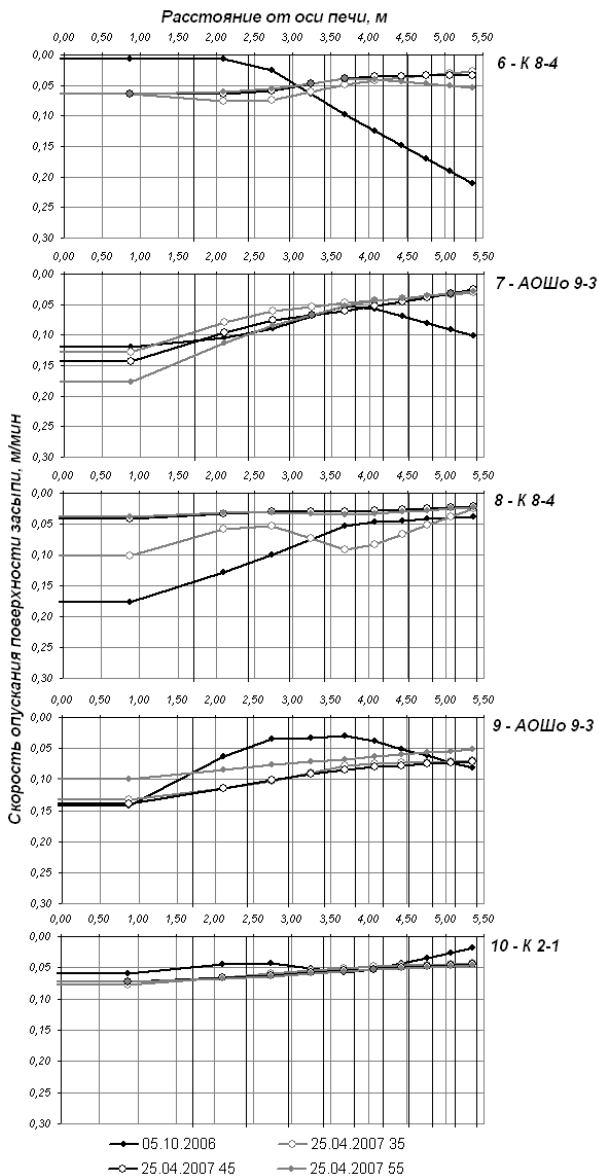


**Рис. 3.136.** Изменение скоростей опускания поверхности засыпи шихты, рассчитанных с временной выдержкой 5, 15 и 25 с после окончания выгрузки порции





**Рис. 3.14а.** Изменение скоростей опускания поверхности засыпи шихты, рассчитанных с временной выдержкой 35, 45 и 55 с после окончания выгрузки порции

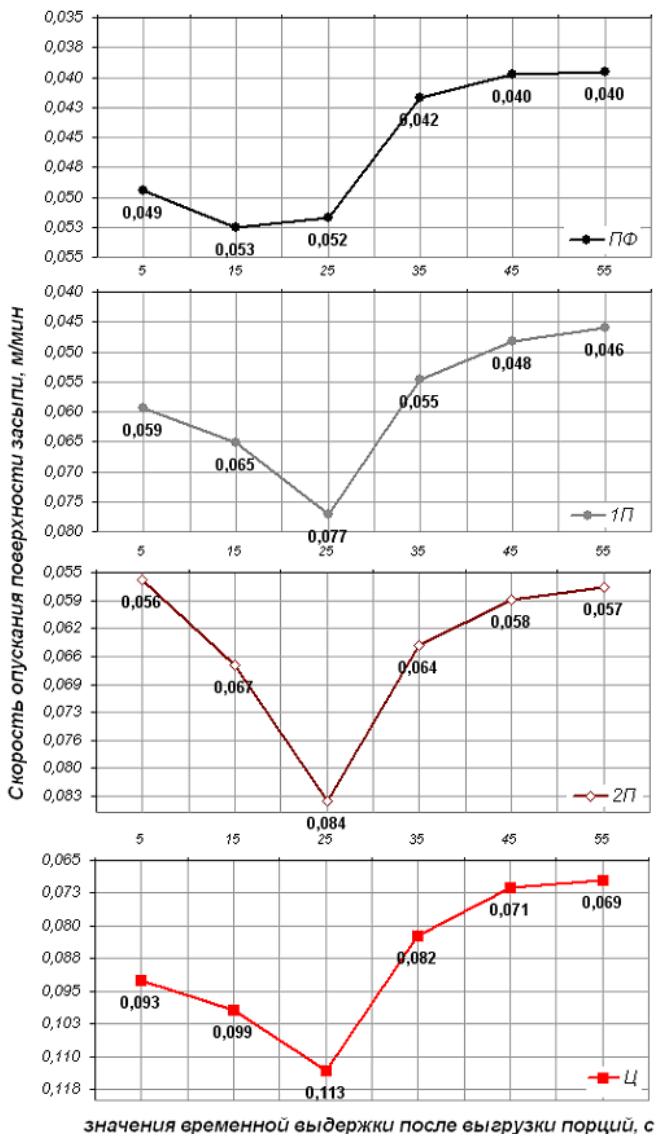


**Рис. 3.146.** Изменение скоростей опускания поверхности засыпи шихты, рассчитанных с временной выдержкой 35, 45 и 55 с после окончания выгрузки порции

Как следует из рис. 3.13 и 3.14 в периоде – 25.04.2007 г., по сравнению с периодом – 05.10.2006 г., после выгрузки 1-ой и 6-ой порций К (8-4) скорость опускания в осевой зоне печи значительно увеличивается, отлична от нулевого значения, что свидетельствует, по нашему мнению, об отсутствии взвешенного слоя над поверхностью засыпи и наличии в этой зоне причин, препятствующих прохождению газового потока. Одной из таких причин может являться загромождение горна печи, подтверждением чего является высокое содержание СО по радиусу печи, достигающее в этом периоде 41,4% по сравнению с периодом 05.10.2006 г., где содержание СО составляло 34,6%. Анализ технологической ситуации на ДП №9 в этот период показал, что в отличие от исследуемых периодов – 05.10.2006 г. и 06.10.2006 г., в периоде – 25.04.2007 г. железосодержащие брикеты, которые ранее загружали в осевую зону печи с целью промывок горна, стали выгружать вместе с порциями кокса в позиции распределителя 8-4. Возможно, это и привело к перераспределению газового потока в печи.

Установлено, что выход слоев шихтовых материалов, образованных после выгрузки порций осевого кокса 5, 10 – К (О, Ш<sub>о</sub>) 2-1, из цилиндрической части в неохлаждаемую часть шахты происходит через временной интервал, соответствующий выгрузке и опусканию материалов двух порций, выгружаемых после осевого кокса (2, 7 – АОШ<sub>о</sub> 9-3 и 3, 8 – К 8-4). Значительное увеличение скоростей опускания шихты в осевой зоне происходит после выгрузки порций 1, 6 – К 8-4, причем величина ускорения опускания шихты определяется временным интервалом начала расчета скоростей опускания после окончания выгрузки порции (рис. 3.13 и 3.14). Из рис. 3.14 следует, что расчетные значения скоростей опускания шихты уменьшаются при увеличении временного интервала их определения от 35 до 55 с с момента окончания выгрузки порции.

Рациональное значение временного интервала начала расчета скоростей опускания шихтовых материалов после выгрузки порций в цикле загрузки, установленное в результате исследований особенностей его влияния на значения и характер распределения скоростей, составляет 25–35 секунд. Это хорошо иллюстрируют графики, представленные на рис. 3.15. Представленные на них кривые изменения скоростей опускания поверхности шихты в различных зонах сечения колошника имеют явно выраженный экстремум при значении временного интервала 25–35 секунд.



**Рис. 3.15.** Изменение скоростей опускания поверхности шихты, рассчитанных с различными временными выдержками после выгрузки порций, в периоде работы печи – 25.04.2007 г.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить следующие особенности определения скоростей опускания шихтовых материалов по сечению колошника:

- расчет скоростей опускания поверхности шихты следует производить через 25–30 секунд после окончания выгрузки порций;

- скорость опускания шихты в осевой зоне печи, в совокупности с содержанием CO и CO<sub>2</sub> в этой зоне, может быть использована в качестве критерия возможного загромождения горна печи.

На основе экспериментальных исследований характера поведения поверхности засыпи шихтовых материалов на колошнике доменной печи, выполненных с помощью стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи, разработан метод определения скоростей опускания шихтовых материалов [128]. В соответствии с разработанным методом:

1. Скорость опускания шихтовых материалов определена как отношение разности уровней в измеряемых точках поверхности засыпи к интервалу времени, соответствующему периоду после и перед выгрузкой каждой очередной порции.

Скорости опускания шихты после выгрузки каждой порции в цикле загрузки рассчитываются для уровней засыпи, определенных после выгрузки  $i$ -ой порции, как отношение разности этих уровней и времени  $t_{ПВ}$ , прошедшего между регистрацией указанных уровней, т.е. исходя из выражения:

$$V^i = \frac{Y_{ПШ}^{i+1} - Y_{ПВ}^i}{t_{ПШ}^{i+1} - t_{ПВ}^i}, \text{ где } i - \text{ номер порции } (i=1\dots 10), t_{ПШ} - \text{ время}$$

регистрации уровней засыпи перед выгрузкой  $(i+1)$ -ой порции,  $t_{ПВ}$  – время закрывания шихтового затвора (ШЗ) выгрузки  $i$ -ой порции.

2. Скорости опускания шихтовых материалов могут быть рассчитаны для шести временных интервалов, изменяющихся с равным шагом от 10 до 60 с. Выбор временного интервала зависит от характера информации, которую необходимо получить в результате расчета скоростей. Скорости, рассчитанные для условий изменения временного интервала в пределах 10–30 с, прошедших после окончания выгрузки порции шихтовых материалов, характеризуют процесс формирования поверхности засыпи, сопровождающийся пересыпанием материалов по поверхности засыпи, возвратом взвешенного слоя в исходное состояние и т.д. Опускание сформированной поверхности засыпи характеризуют скорости, рассчитанные для 30–60 секундного интервала.

Скорости опускания шихты ( $i-1$ )-ой порции определяются следующим образом: рассчитывается разность уровней, усредненных в течение 3-5 секунд с момента поступления команды на открывание ШЗ выгрузки  $i$ -ой порции и уровней, полученных в интервале 10 с ( $Y_{1ПВ}^{i-1}$ ), 20 с ( $Y_{2ПВ}^{i-1}$ ), 30 с ( $Y_{3ПВ}^{i-1}$ ), 40 с ( $Y_{4ПВ}^{i-1}$ ), 50 с ( $Y_{5ПВ}^{i-1}$ ), 60 с ( $Y_{6ПВ}^{i-1}$ ) после закрытия ШЗ выгрузки ( $i-1$ )-ой порции. Скорости опускания шихты определяются согласно выражению:

$$V_{1...6}^{i-1} = \frac{Y_{ШЗ}^i - Y_{1...6ПВ}^{i-1}}{t_{ШЗ}^i - t_{1...6ПВ}^{i-1}},$$

где  $i$  – номер порции ( $i=1...10$ ),  $t_{1ПВ}$  – время закрытия ШЗ выгрузки ( $i-1$ )-ой порции ( $t_{ШЗ}^{i-1}$ ) + 10 с,  $t_{2ПВ} - t_{ШЗ}^{i-1} + 20$  с,  $t_{3ПВ} - t_{ШЗ}^{i-1} + 30$  с,  $t_{4ПВ} - t_{ШЗ}^{i-1} + 40$  с,  $t_{5ПВ} - t_{ШЗ}^{i-1} + 50$  с,  $t_{6ПВ} - t_{ШЗ}^{i-1} + 60$  с.

3. Процесс формирования столба шихтовых материалов из последовательно выгружаемых порций шихтовых материалов может быть охарактеризован средними значениями скоростей за выбранный период усреднения в измеряемых сечениях колошника. Средние скорости за выбранный период времени усреднения могут являться исходными для задания в математическую модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике печи при расчете параметров их распределения для условий использования аналогичных программ загрузки.

### 3.7 Изменение параметров поверхности засыпи шихты по окружности печи

Контроль поверхности засыпи шихты по окружности печи (окружное распределение) осуществляется по значениям уровней засыпи в кольцевых сечениях установки измерителей.

Как показали выполненные ранее исследования [132], радиолокационная система измерения профиля поверхности засыпи шихты позволяет фиксировать области расположения зон с пониженной газопроницаемостью («локальные зоны») по сечению колошника для различных условий работы печи. Для этого в полярной системе координат отображается распределение высот слоев шихтовых материалов в периферийной зоне по периметру колошника, образованных после загрузки печи из разных бункеров (Б1 и Б2) БЗУ в течение заданного интервала времени для установленного направления вращения лотка, при этом точки пересечения этих кривых характеризуют расположение

«локальных зон». Помимо этого, отображается также распределение высот слоев шихтовых материалов в этой же зоне по периметру колошника, характерных для последующего периода работы печи с противоположным вращением лоткового распределителя. Распределение высот слоев шихтовых материалов по периметру колошника, образованных после загрузки печи, позволяет также оценить влияние разгружаемого бункера БЗУ на неравномерность окружного распределения.

Например, для условий установки системы измерения профиля поверхности засыпи на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», высоты слоев шихтовых материалов определяются в периферийной и первой промежуточной кольцевых зонах колошника по точкам измерения уровней поверхности засыпи согласно выражению  $\gamma^{\overline{ПП}} - \gamma^{ПВ}$ . Причем, расчет высот производится для слоев центрального кокса (2-1, 3-1), кокса (7-3, 8-4) и железорудных материалов (9-3, 9-6) отдельно при выгрузке этих порций из Б1 и из Б2. Затем значения этих высот откладываются на схеме колошника печи в относительных единицах с указанием направления вращения распределительного лотка. На пересечениях линий высот слоев указываются расположения «локальных зон», что иллюстрируют приведенные на рис. 3.16 графики.

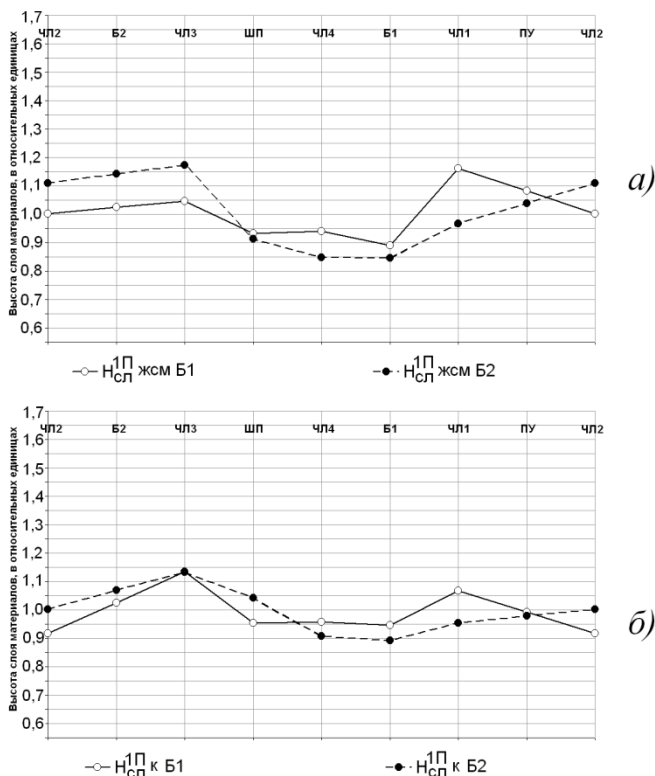
Таким образом, на основе результатов исследований разработаны оригинальные методы расчета параметров состояния поверхности засыпи шихты по показаниям стационарных систем измерения профиля поверхности засыпи, позволяющие определить:

- профиль поверхности засыпи шихты по контролируемым радиусам сечения колошника печи;
- углы наклона поверхности шихтовых материалов;
- глубину и смещение осевой воронки;
- форму, толщину слоев выгруженных порций шихты по измеряемым радиусам колошника и их отношения;
- скорости опускания шихтовых материалов в различных сечениях колошника за цикл загрузки;
- изменение параметров поверхности засыпи шихты по окружности печи.

Разработанные методы могут быть дополнены новыми положениями на основе дальнейших исследований.

Методы реализованы в информационной системе отображения информации, полученной с помощью

радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на ДП №9 и ДП №8 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».



**Рис. 3.16.** Изменение средней высоты слоев материалов по окружности колошника после выгрузки из бункеров 1 и 2 порций шихтовых материалов: ЖСМ (а) и К (б) в течение 8 часов при вращении лотка против часовой стрелки БЗУ и выпуском продуктов плавки через ЧЛ2 и ЧЛ4.



## ГЛАВА 4

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ  
ЗАСЫПИ ШИХТЫ

## 4.1 Влияние программ загрузки шихтовых материалов и углов наклона лоткового распределителя на формирование профиля поверхности засыпи и скоростей опускания шихты

Формирование профиля поверхности засыпи шихты зависит как от хода печи, так и от параметров режима загрузки. С помощью установленной на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» системы измерения профиля поверхности засыпи были выполнены исследования по оценке изменения профиля поверхности засыпи и скоростей опускания шихтовых материалов в зависимости от используемых на печи программ загрузки [129].

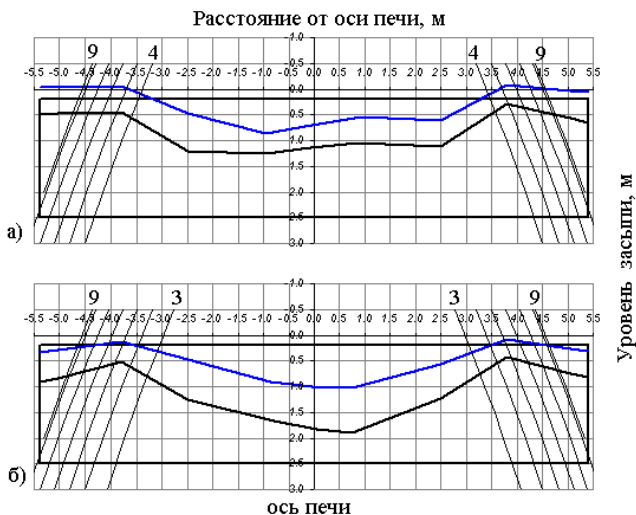
Анализ параметров, характеризующих состоянии поверхности засыпи, рассчитанных с помощью разработанных методов, показал, что увеличение в программе загрузки печи массы выгружаемой порции смеси агломерата (А) и окатышей (О) от 111 т до 121 т приводило к увеличению, как это следует из рис. 4.1, средней толщины слоя ( $H^{cp}$ ) от 0,55 м до 0,66 м. Кроме того, изменение угловых положений распределительного лотка БЗУ при выгрузке порций смеси агломерата и окатышей – АО с 9–4 на 9–3 способствовало увеличению толщины слоя материала, расположенного в центральной зоне колошника печи ( $r=3,0$  м), по сравнению с периферийной кольцевой зоной ( $r=3,0-5,4$  м). При этом, средняя высота слоя в центральной зоне печи ( $H_u^{cp}$ ) увеличилась от 0,56 м до 0,80 м, а отношение средней толщины слоя в центральной ( $H_u^{cp}$ ) и периферийной ( $H_{нф}^{cp}$ ) зонах колошника ( $H_u^{cp} : H_{нф}^{cp}$ ) возросло от 1,03 ед. до 1,68 ед. Указанные изменения параметров профиля засыпи вызваны смещением траекторий ссыпания материалов с лотка к оси печи при использовании третьего его углового положения, а также увеличением угла откоса исходного профиля засыпи к оси печи ( $\alpha_1$ ) от 20° до 26°.

В другом случае, уменьшение на 21,4% массы (объема) кокса с 26,7 т (53,4 м<sup>3</sup>) до 22,0 т (44,0 м<sup>3</sup>) в порциях, выгружаемых с угловых позиций лотка 3–1 («осевого» кокса) на поверхность

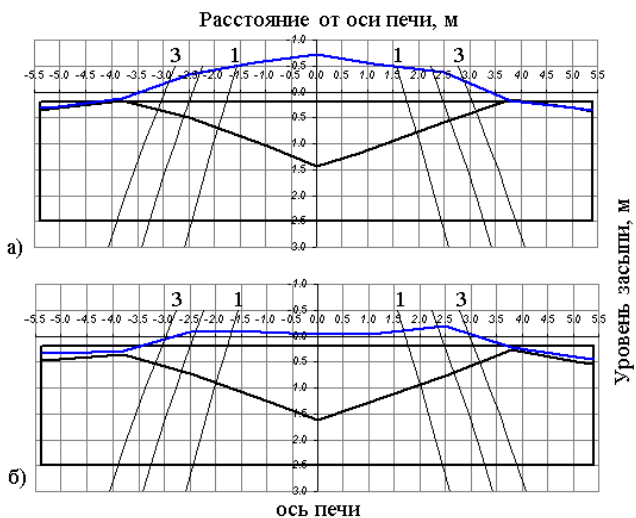
засыпи с углами откоса исходного профиля к оси печи  $\alpha_1=20-24^\circ$ , характеризовалось уменьшением высоты слоя в центре колошника ( $r=3,75$  м) на 19% и выравниванием профиля поверхности засыпи в этой зоне (рис. 4.2).

Для одного из исследуемых периодов работы печи 16.10.2004 г. (период I) для десяти полуциклов (длительностью 8 часов) были определены средние профили и высоты слоев материалов по диаметрам колошника после выгрузки каждой порции, а затем приведены к одному радиусу печи (рис. 4.3а). При этом использовалась программа загрузки, в которой один полуцикл состоял из 9 порций: К 3–1; АШо 9–6; К 8–5; АО 9–3; КО 3–1; КШо 8–4; АО 8–4; К 8–4; АО 9–3. В этом и последующих периодах работы печи цикл загрузки условно разделен на два аналогичных по выгружаемым порциям материалов полуцикла.

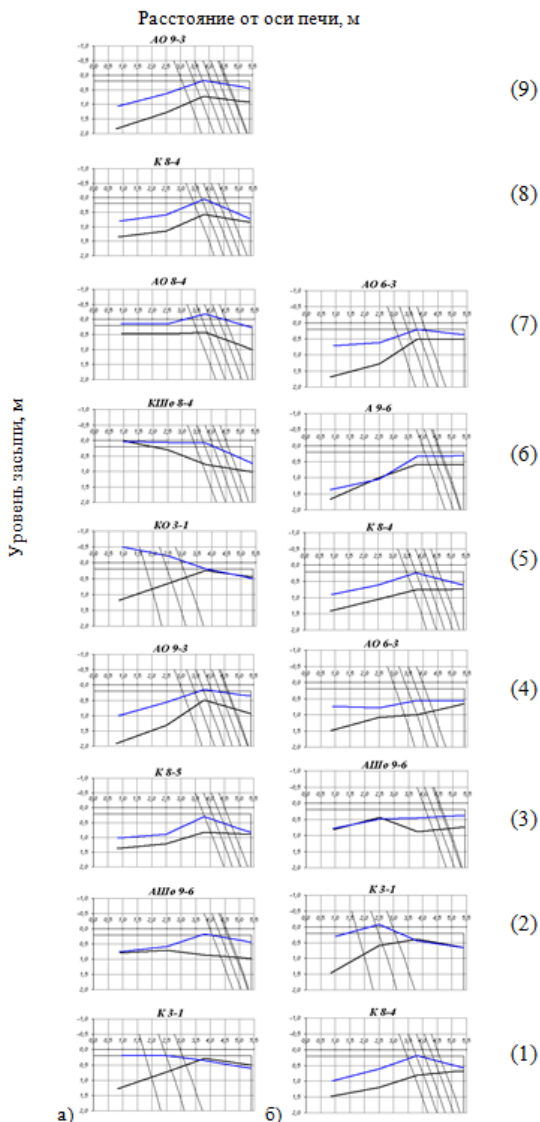
Причем, по окончании полуцикла производится смена вида материала из выгружаемых бункеров. Загрузка шихты велась на уровень засыпи 1,0 м (по показаниям радиолокационных измерителей), масса рудной сыпи в подаче составляла – 120,7 т, рудная нагрузка – 3,81 т/т кокса,  $\eta_{CO}=0,459$ . Аналогичные исследования были выполнены во время работы печи 16.11.2004 г. (период II) с увеличенной до 163,5 т массой рудной составляющей подачи (рудная нагрузка 3,80 т/т кокса), загрузкой шихты на уровень засыпи 0,75 м (по показаниям радиолокационных измерителей) и при  $\eta_{CO}=0,431$ , при опробовании программы II, включающей 7 порций в полуцикле: К 3–1; АШо 9–6; АО 6–3; К 8–4; А 9–6; АО 6–3; К 8–4. В связи с увеличением массы рудной части подачи до 163,5 т ( $V_{\text{подачи}} \approx 85-90 \text{ м}^3$ ), при объеме бункера БЗУ  $75 \text{ м}^3$ , рудная сыпь выгружалась двумя порциями А 9–6 и “следом” без “меры” – АО 6–3. Для программы II усреднились профили, образованные по двум диаметрам колошника после загрузки 13 полуциклов (в течение 8 часов), и приводились к одному радиусу печи (рис. 4.3б). В анализируемые периоды доменная печь работала с близкими параметрами дутьевого и газодинамического режимов. В первом и во втором периодах в печь подавалось (через 42 воздушные фурмы диаметром 150 мм)  $7013 \text{ м}^3/\text{мин}$  и  $6847 \text{ м}^3/\text{мин}$  дутья нагретого до  $1104^\circ\text{C}$  и  $1145^\circ\text{C}$ , при этом доля кислорода в дутье составляла 28,1% и 27,2%, а расход природного газа –  $510 \text{ м}^3/\text{мин}$  и  $516 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Давление дутья в первом периоде составляло 3,23 ати (верхний перепад давления в печи – 0,48 ати, нижний – 1,55 ати), во втором периоде – 3,10 ати (при верхнем и нижнем перепадах давления 0,57 ати и 1,47 ати). Параметры дутьевого режима обеспечивали скорость истечения



**Рис. 4.1.** Конфигурация слоя шихтовых материалов после выгрузки порции смеси АО массой 111 т и 121 т из 9-4 (а) и 9-3 (б) угловых положений лотка



**Рис. 4.2.** Конфигурация слоя на поверхности засыпи после выгрузки порций кокса массой 26,7 т (а) и 22,0 т (б) из 3–1 угловых положений лотка БЗУ



наклонные линии – траектории центров тяжести потоков шихтовых материалов, сходящихся с лотка БЗУ при использовании 9...1 его угловых позиций.

**Рис. 4.3.** Профили поверхности засыпи и слои шихтовых материалов, усредненные и приведенные к одному радиусу колошника, после загрузки в печь порций шихты (1)...(9) по программам I (а) и II (б).

дутья из воздушных фурм 201,2 м/с в первом периоде и 209,6 м/с во втором. Из данных, приведенных на рис. 4.3а и 4.3б, следует, что при близких параметрах дутьевого режима изменение программ загрузки и уровня засыпи от 1,0 м в программе I до 0,75 м в программе II существенно влияет на состояние поверхности засыпи и формирование слоев шихтовых материалов на колошнике печи. После выгрузки в печь порции «осевого» кокса – К 3–1 в полуциклах загрузки по программам I и II (рис. 4.3а, порция (1) и рис. 4.3б, порция (2)) на исходный профиль, образованный, соответственно, после выгрузки порций АО 9–3 и К 8–4 с углами откоса  $\alpha_1^I=20^\circ$  и  $\alpha_1^{II}=25^\circ$  «гребень» профиля поверхности засыпи удалялся от оси печи с 1,0 м до 2,6 м.

При этом, высота (толщина) слоя кокса в «гребне» во втором случае, по сравнению с первым, была меньше в 1,25 раза и составила 0,75 м. В центре печи высота образовавшегося слоя «осевого» кокса при использовании программы I составила 1,5 м, а при программе II уменьшилась до 1,25 м, т.е. кокс переместился ближе к стенке печи, в промежуточную зону колошника. Образовавшийся слой кокса после выгрузки его с 8...4 угловых позиций лотка БЗУ (рис. 4.3а, порция (8) и рис. 4.3б, порция (5)) на поверхность засыпи, сформированную после выгрузки порций АО 8–4 (программа I,  $\alpha_1^I=18^\circ$ ) и АО 6–3 (программа II,  $\alpha_1^{II}=15^\circ$ ), характеризовался утолщением его в направлении промежуточной зоны и к стенке печи. После выгрузки порций АШо 9–6 на профиль поверхности засыпи, зафиксированный после выгрузки порции К 3–1 (рис. 4.3а, порция (2) и рис. 4.3б, порция (3)), высота слоя рудных материалов в периферийной зоне печи при загрузке по программе I была выше, чем при программе II и составила, соответственно 0,8 м и 0,5 м. Выгрузка порций АО 6–3 на поверхность из агломерата и окатышей при использовании программы II, в отличие от выгрузки порций АО 9–3 и АО 8–4, используемых в полуциклах и выгружаемых на поверхность коксового слоя программы I, способствовала перемещению рудных материалов в промежуточную и осевую зоны печи и увеличению высоты слоя в этих зонах (рис. 4.3а, порции (4, 7, 9) и рис. 4.3б, порции (4, 7)).

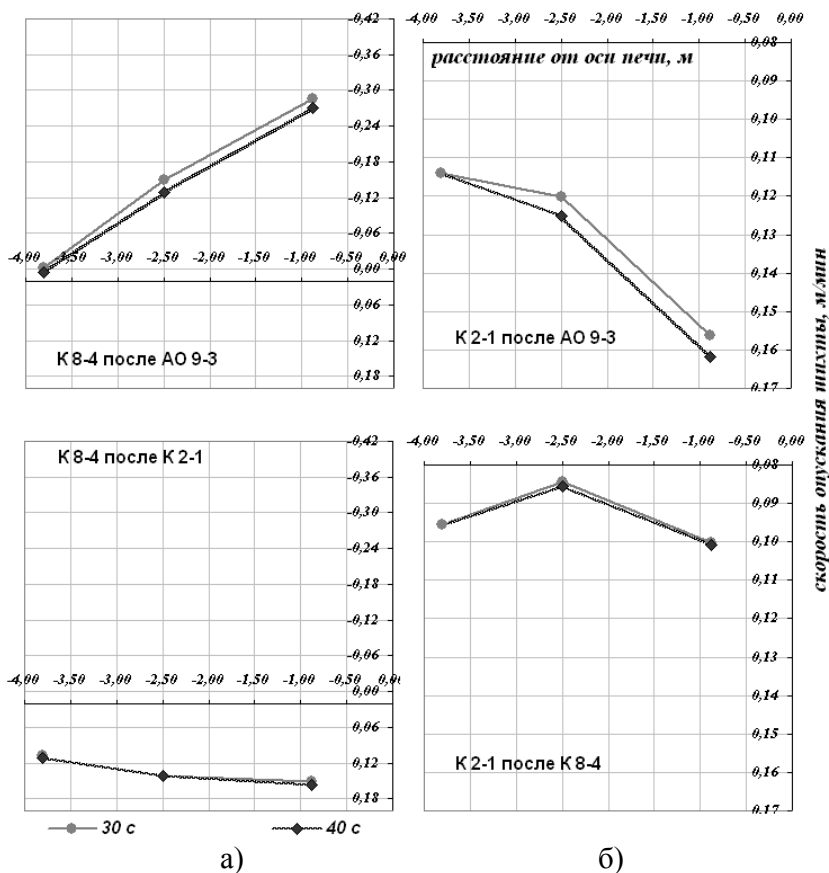
С помощью профилемера выполнены исследования влияния изменения последовательности выгрузки порций в цикле загрузки на формирование поверхности засыпи и характер изменения скоростей опускания шихтовых материалов в различных сечениях колошника. Этот прием управления распределением шихтовых материалов, направленный на увеличение степени использования

восстановительной способности газов и уменьшение расхода кокса и предложенный ИЧМ, используется на ДП №9 с 2007 года. Для исследуемого периода 29.05.08 г. при используемой программе загрузки, приведенной в табл. 3.3 (Глава 3), период 3, определены значения скоростей опускания шихты, рассчитанные через 30 и 40 с после выгрузки каждой порции в рамках цикла загрузки.

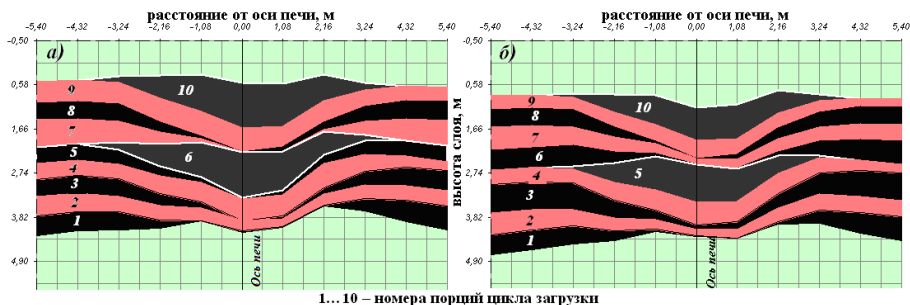
Анализ влияния изменения последовательности выгрузки порций в цикле загрузки выполнен для двух условий, одно из которых – после выгрузки порции 5–К 2-1 выгружают порцию 6–К 8-4, другое условие – после выгрузки порции 5–К 8-4 выгружают порцию 6–К 2-1.

Как следует из сопоставления графиков, приведенных на рис. 4.4, при изменении последовательности выгрузки 5-ой порции К 2-1, а затем К 8-4 (6-ая порция) на К 8-4 (5-ая порция) и К 2-1 (6-ая порция) происходит резкое изменение характера опускания шихтовых материалов, сопровождающееся образованием взвешенного слоя над поверхностью засыпи, о чем свидетельствуют отрицательные значения скоростей. На рис. 4.5 представлены рассчитанные с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи слои шихтовых материалов на уровне колошника ДП №9, сформированные при программе загрузки с двумя вариантами последовательности выгрузки порций в цикле загрузки. Как следует из рис. 4.5, слой, образованный при выгрузке в печь смешанной железорудной порции 7–АОШо 9-3, в первом варианте последовательности выгрузки порций «огражден» от осевой зоны коксовой порцией К 2-1, что способствует стабилизации осевой отдушины. Кроме того, такая особенность взаимного расположения слоев на колошнике позволяет увеличивать рудную нагрузку в приосевых зонах при сохранении достаточной газопроницаемости осевой зоны столба шихты.

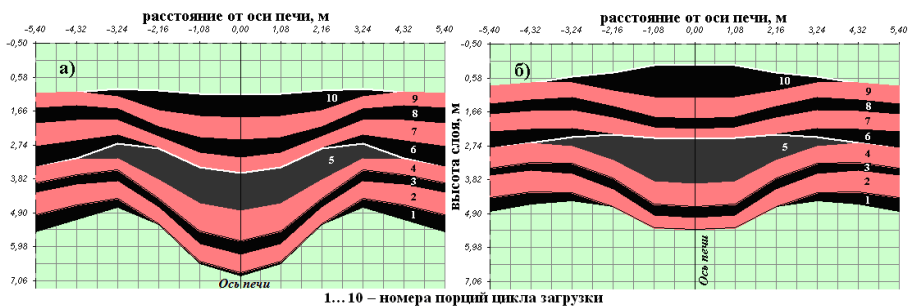
С помощью профилемера в период работы доменной печи №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в августе 2005 г. была выполнена оценка влияния изменения углов наклона распределителя шихты (лотка) на формирование коксовых слоев, образующихся в результате выгрузки порций кокса из 3-1 и 2-1 позиций лотка [144]. Эти порции формируют коксовую «отдушину» в столбе шихты, определяющую газопроницаемость осевой зоны печи, а также влияют на формирование слоев кокса и рудных материалов по сечению колошника, что в конечном итоге, влияет на распределение рудных нагрузок, объемов материалов и газового потока в печи, степень использования энергии печных газов и расход кокса на выплавку чугуна.



**Рис. 4.4.** Изменение скоростей опускания шихты по радиусу колошника после выгрузки порций шихты в цикле загрузки: 5–К 8-4 (4–АО 9-3), 6–К 8-4 (5–К 2-1) (а) и 5–К 2-1 (4–АО 9-3), 6–К 2-1 (5–К 8-4) (б), определенных с временной выдержкой 30 и 40 с после закрытия шихтового затвора для исследуемого периода работы печи – 29.05.08 г.



**Рис. 4.5.** Конфигурации слоев шихтовых материалов на уровне колошника ДП №9, сформированных при программе загрузки с использованием (а) и без использования (б) приема изменения последовательности выгрузки порций



Период	Нжсм/Нк, ед			Средн. по $R_{кол}, м$	Расход кокса, кг/т. чугу.	$\eta_{со}, \%$
	Расстояние от оси печи, м					
	0,55	2,70	4,85			
а)	0,88	0,84	1,18	0,96	421,3	43,5
б)	0,62	1,07	1,53	1,07	420,0	44,1

**Рис. 4.6.** Конфигурация слоев порций шихтовых материалов на уровне колошника, загруженных в ДП №9 в (а) и (б) исследуемых периодах ее работы по программе: 1 – К 8-4, 2 – АОШ<sub>0</sub>, 9-3, 3 – К 8-4, 4 – АОШ<sub>0</sub>, 9-3, 5 – КО 3-1, 6 – К 8-4, 7 – АОШ<sub>0</sub>, 9-3, 8 – К 8-4, 9 – АОШ<sub>0</sub>, 9-3, 10 – К 2-1.

С помощью радиолокационной системы измерения профиля засыпи шихты были определены средние за 8 часов профили и высоты слоев шихтовых материалов по измеряемым диаметрам колошника после выгрузки каждой порции, а затем приведены к



одному радиусу печи (рис. 4.6). Из полученных данных следует, что при близких параметрах дутьевого режима и одинаковых программах загрузки (табл. 4.1) в анализируемые периоды а и б, изменение углов наклона лотка в периоде б, по сравнению с его углами в периоде а (табл. 4.2), вызвало следующие изменения формы профиля поверхности засыпи шихты и слоев материалов на колошнике (рис. 4.6, табл. 4.3).

Таблица 4.1

**Программа цикла загрузки и распределение шихтовых материалов (%) по позициям лотка БЗУ при загрузке ДП №9 в исследуемые периоды а и б**

№ порции	Состав порции*)	Распределение масс по угловым позициям лотка, %								
		9	8	7	6	5	4	3	2	1
10	К 2-1	-	-	-	-	-	-	-	30	70
9	АОШ <sub>о</sub> 9-3	15	26	18	12	10	13	6	-	-
8	К 8-4	-	12	22	22	22	23	-	-	-
7	АОШ <sub>о</sub> 9-3	15	26	18	10	10	15	6	-	-
6	К 8-4	-	11	22	22	22	23	-	-	-
5	КО 3-1	-	-	-	-	-	-	25	25	50
4	АОШ <sub>о</sub> 9-3	15	26	18	11	10	14	6	-	-
3	К 8-4	-	12	22	21	22	23	-	-	-
2	АОШ <sub>о</sub> 9-3	15	26	18	11	10	14	6	-	-
1	К 8-4	-	11	22	22	22	23	-	-	-

\*) А – агломерат, О – окатыши, Ш<sub>о</sub> – обогащенный шлак, К – кокс; 9...1 – угловые позиции лотка БЗУ; масса рудной части подачи (M<sub>р</sub>)=117-118 т. Состав подачи: M<sub>А</sub>=92,6-93,0 т; M<sub>О</sub>=17,0 т; M<sub>Ш</sub>=5,2-5,4 т; отходы блюминга 0,1-0,4 т; масса окатышей в порциях КО 3-1 – 4-6 т, масса кокса в порциях КО 3-1 и 2-1 – 15 т.

Таблица 4.2

**Расположение точек встречи потоков шихты с поверхностью засыпи по радиусу колошника (расстояние от оси печи, м) при различных уровнях засыпи для рабочих углов наклона лотка БЗУ, установленных на ДП №9 в указанные периоды**

Период	Уровень засыпи, м	Угловые положения распределителя								
		9	8	7	6	5	4	3	2	1
		Углы наклона лотка, град								
		46,2°	45,4°	42,8°	40,1°	37,4°	34,3°	30,9°	26,9°	22,1°
а	1,00	4,94	4,86	4,59	4,32	4,06	3,74	3,34	2,78	2,03
	1,20	5,03	4,94	4,67	4,40	4,13	3,81	3,40	2,82	2,04
	1,50	5,13	5,05	4,78	4,51	4,24	3,92	3,52	2,95	2,17
б		45,9°	42,7°	40,0°	37,1°	34,1°	30,7°	26,7°	22,9°	18,0°
	1,00	4,91	4,58	4,31	4,02	3,71	3,30	2,72	1,96	1,36
	1,20	5,0	4,66	4,39	4,10	3,79	3,38	2,79	2,02	1,41
	1,50	5,12	4,78	4,51	4,22	3,91	3,49	2,90	2,12	1,48

В периоде б, по сравнению с периодом а, форма профилей поверхности засыпи шихты на колошнике до и после выгрузки порций материалов изменилась от  $\wedge\wedge$ -образной до  $\surd$ -образной, а глубина осевой воронки профилей уменьшилась, в среднем, от 0,75–2,0 м до 0,5–1,5 м, что способствовало предотвращению перемещения материалов по откосу профиля к оси печи. После выгрузки в печь порций «осевого» кокса – 10–К 2-1 и 5–КО 3-1 в исследуемые периоды работы печи а и б (рис. 4.6, табл. 4.3) на исходный профиль засыпи, образованный, соответственно, после загрузки порций №9 и №4 – АОШ 9-3 с углами наклона профиля засыпи к оси печи:  $\alpha^{I,9}=8^\circ$ ,  $\alpha^{II,9}=10^\circ$  и  $\alpha^{I,4}=25^\circ$ ,  $\alpha^{II,4}=20^\circ$ , высота слоя, образовавшегося на участке радиуса 0-1,08 м от оси печи в периоде б увеличилась на 47–48% от средней ее величины по радиусу (от 0,8-0,75 м до 1,05-1,00 м) и на 30–35% (от 1,23-1,17 м до 1,45-1,42 м), а на участке радиуса 2,16-3,24 м от оси печи уменьшилась на 30–48% (от 0,7-0,3 м до 0,6-0,1 м) и на 27–28% (от 1,0-0,48 м до 0,84-0,30 м), т.е. кокс переместился из промежуточной зоны радиуса ближе к оси печи. При этом диаметр коксовой “отдушины” в периоде б уменьшился на 0,5–0,7 м.

Полученные для исследуемых периодов а и б работы печи величины отношения высот слоев железорудных материалов ( $H_p$ ) и кокса ( $H_k$ ) –  $H_p/H_k$  показывают, что в осевой и приосевой зонах сечения колошника (отм. 0,00-2,16 м от оси печи) их значения в периоде б были на 41,2% меньше, а в промежуточной и периферийной зонах (расстояние от оси печи 2,16-5,40 м) на 28-19% больше, чем в периоде а. Указанные изменения формы профиля поверхности засыпи и слоев шихтовых материалов, а также отношения высот слоев  $H_p/H_k$  в периоде б характеризуют уменьшение рудной нагрузки в осевой и приосевой и увеличение ее в промежуточной и периферийной зонах сечения колошника печи. Это подтверждается распределением степени использования оксида углерода ( $\eta_{CO}$ ) в 10-ти равновеликих кольцевых зонах сечения колошника печи рассчитанной по данным химанализа проб газа, отобранных по радиусу верхнего горизонта шахты. Установлено, что увеличение зоны перемещения лотка БЗУ при загрузке шихты из позиций 9...1 в периоде б (углы наклона лотка  $45,9^\circ \dots 18^\circ$ ), по сравнению с периодом а (углы наклона лотка  $46,2^\circ \dots 22,1^\circ$ ) от  $24,1^\circ$  до  $27,9^\circ$  (табл. 4.3) привело к перераспределению рудных нагрузок и объемов шихтовых материалов в столбе шихты по радиусу печи и характеризовалось увеличением степени использования CO в периферийных (№№ 10

Таблица 4.3  
Изменение высоты слоев<sup>1)</sup> кокса и железосодержащих материалов по радиусу колосника ДШ №9 в исследуемые периоды ее работы: период а – числитель, период б – знаменатель.

Номер порции	Вид материала, угловые позиции лотка, выгруженная (↓) и предшествующая <sup>2)</sup> ей порции	Высота слоя, м (доли ед.)												Средн. по R <sub>ср.</sub> , м, (доли ед.)	
		Расстояние от оси печи, м						Периферийная зона							
		0,00		1,08		2,16		3,24		4,32		5,40		м	доли ед.
		м	доли ед.	м	доли ед.	м	доли ед.	м	доли ед.	м	доли ед.	м	доли ед.		
10	(АОШ 9-3) <sup>2)</sup> К 2-1↓	0,80	1,86	0,75	1,74	0,70	1,63	0,30	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	1,00
		1,05	2,33	1,00	2,22	0,60	1,33	0,10	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	1,00
5	(АОШ 9-3) <sup>2)</sup> КО 3-1↓	1,23	1,86	1,17	1,77	1,00	1,52	0,48	0,73	0,10	0,15	0,00	0,00	0,66	1,00
		1,45	2,16	1,42	2,12	0,84	1,25	0,30	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	1,00
1	(К2-1) <sup>2)</sup> К8-4↓	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29	1,38	0,45	2,14	0,54	2,57	0,21	1,00
		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	1,37	0,40	2,11	0,50	2,63	0,19	1,00
6	(К3-1) <sup>2)</sup> К8-4↓	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	1,17	0,50	2,08	0,65	2,71	0,24	1,00
		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	1,30	0,43	2,15	0,50	2,50	0,20	1,00
3,8	(АОШ 9-3) <sup>2)</sup> К 8-4↓	0,50	1,25	0,47	1,18	0,30	0,75	0,37	0,93	0,40	1,00	0,40	1,00	0,40	1,00
		0,40	1,05	0,40	1,05	0,40	1,05	0,40	1,05	0,35	0,92	0,30	0,79	0,38	1,00
2,4,7,9	(К8-4) <sup>2)</sup> АОШ 9-3↓	0,67	1,20	0,62	1,11	0,49	0,88	0,43	0,77	0,34	0,96	0,59	1,05	0,56	1,00
		0,50	0,93	0,50	0,93	0,52	0,96	0,52	0,96	0,38	1,07	0,61	1,13	0,54	1,00
	ΣАОШ↓	2,68	1,20	2,48	1,11	1,96	0,88	1,72	0,77	2,16	0,97	2,36	1,06	2,23	1,00
		2,00	0,93	2,00	0,93	2,08	0,97	2,08	0,97	2,32	1,08	2,44	1,13	2,15	1,00
	ΣК↓, КО↓	3,03	1,29	2,86	1,22	2,30	0,98	2,09	0,89	1,85	0,79	1,99	0,85	2,35	1,00
		3,30	1,45	3,22	1,42	2,24	0,99	1,72	0,76	1,53	0,67	1,60	0,70	2,27	1,00
	ΣАОШ↓ ΣК↓, КО↓	0,88	0,92	0,87	0,91	0,85	0,82	0,85	1,17	1,22	1,19	1,24	0,96	1,00	
		0,61	0,57	0,62	0,58	0,95	0,87	1,21	1,13	1,52	1,42	1,53	1,43	1,07	

<sup>1)</sup> средние значения, полученные для порций, находящихся в коксе, загрузку (10 порций) в количестве, указанном в таблице; <sup>2)</sup> предшествующая порция.

и 9) и промежуточных (№№ 8-5) равновеликих кольцевых зонах в сумме на 11,8%, при уменьшении ее на 11,3% в осевых зонах (№№ 3-1). В целом, степень использования СО, рассчитанная по составу радиального и общего колошниковога газа при загрузке печи в периоде б, в сравнении с периодом а, увеличилась на 0,5% и 0,63%.

Результаты анализа влияния качества шихтовых материалов и технологических факторов на удельный расход кокса для сопоставляемых а и б периодов работы печи показали, что по отношению к периоду а (расход кокса 421,3 кг/т чугуна), приведенный удельный расход кокса (с учетом влияния на его величину качества рудных материалов и кокса, антрацита, параметров комбинированного дутья, химсостава чугуна, количества добавок, простоев и тихого хода печи), в сопоставимом периоде б составил 420,0 кг, т. е. уменьшился на 1,3 кг [144]. Указанная величина экономии кокса – 1,3 кг/т чугуна была достигнута за счет повышения степени использования СО ( $\eta_{CO}$ ) на 0,63% от 43,49% до 44,12% , в результате более эффективного распределения шихты и использования энергии газового потока в периоде б, по сравнению с периодом а.

Таким образом, в результате исследований влияния программ загрузки шихтовых материалов и углов наклона лоткового распределителя на формирование профиля поверхности засыпи и скоростей опускания шихты, определенных с помощью разработанных методов, установлено:

- существенное влияние на формирование профиля и слоев шихтовых материалов на колошнике изменений в программе загрузки печи: увеличения массы выгружаемой порции смеси агломерата и окатышей, изменения угловых положений распределительного лотка, уменьшения массы порций кокса;

- влияние на конфигурацию слоев шихтовых материалов приема изменения последовательности выгрузки порций в цикле загрузки печи. Определено, что при выгрузке порций осевого кокса К 2-1 перед выгрузкой железосодержащих АОШ<sub>0</sub> 9-3, по сравнению с выгрузкой осевого кокса после АОШ<sub>0</sub> 9-3, уменьшается попадание железосодержащих материалов в осевую зону сечения колошника печи, что в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности газового потока в центральной зоне печи.

В результате выполненной оценки особенностей назначения и реализации углов наклона лотка БЗУ с использованием результатов измерения профиля поверхности засыпи шихты подтверждено, что приближение величин, установленных на печи

углов наклона лотка к расчетным, позволяет формировать рациональные профили засыпи и структуру столба шихты. Эффективность реализации на ДП №9 углов наклона лотка, назначение которых осуществлялось с использованием информации о поверхности засыпи шихты подтверждена увеличением степени использования восстановительной способности газов ( $\eta_{CO}$ ) на 0,63% с 43,49 до 44,12% и уменьшением удельного расхода кокса на 1,3 кг/т выплавляемого чугуна.

## **4.2 Использование информации радиолокационной системы измерения поверхности засыпи шихты для адаптации математических моделей распределения шихты на колошнике доменной печи**

### **4.2.1 Определение углов наклона поверхности шихтовых материалов на колошнике доменной печи с помощью радиолокационного профилемера**

Как было показано в главе 3, стационарная система измерения профиля поверхности засыпи шихты позволяет определять углы ее наклона по сечению колошника. Основываясь на этой информации, предложена методика определения углов наклона поверхности шихтовых материалов на колошнике печи. Известно, что углы откоса материалов являются одним из основных параметров, задаваемых в качестве исходных в математическую модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике печи, с помощью которой может осуществляться корректировка либо выбор программ загрузки. Поэтому, задание в модель измеренных с помощью профилемера углов наклона поверхности шихтовых материалов позволит адаптировать ее к конкретным технологическим условиям и, тем самым, повысить достоверность осуществляемых с ее помощью расчетов параметров распределения шихты.

Согласно алгоритмам математической модели радиального распределения, образование слоя шихты в результате выгрузки каждой порции цикла программы загрузки, осуществляется в результате формирования на поверхности объемных фигур вращения вокруг оси печи, в вертикальном сечении представляющих собой треугольники (рис. 4.7). Углы наклона сторон этих треугольников к горизонтали являются углами откоса материалов, которые условно можно обозначить в зависимости от их направления – к стенке и к оси печи. Совокупность

сформированных фигур с характерными углами откоса загружаемых материалов к стенке и к оси печи образует слой шихтовых материалов [145]. Основываясь на этом, предложена методика определения углов откоса шихтовых материалов на колошнике печи по результатам измерения наклона поверхности засыпи с помощью профилемера. Согласно этой методики, определение углов откоса материалов в печи осуществляется с помощью итерационного метода, приближением рассчитанного с помощью модели профиля поверхности засыпи к фактически измеренному с помощью профилемера. Для исследований выбрана программа загрузки, представленная в табл. 4.4. Анализ выполнялся для полученных с помощью профилемера восьми вариантов конфигураций заключительного в цикле загрузки профиля поверхности засыпи, образованного в результате выгрузки порции АО 9-3 (рис. 4.8). Теснота взаимосвязи расчетного заключительного профиля поверхности засыпи с профилем, измеренным профилемером, оценивалась по величине коэффициентов корреляции (табл. 4.5).

Основываясь на приведенных в литературных источниках сведениях об углах естественного откоса материалов и об изменении их в условиях работающей доменной печи (уменьшении в результате взаимодействия с газовым потоком), в расчетах задавались следующие диапазоны изменения углов:

Железосодержащие материалы (Жсм): к стенке 8–27 град, к оси 22–30;

Кокс: к стенке 8–27 град, к оси 22–30;

Осевой кокс: к стенке 8–21 град, к оси 22–30.

Целесообразность разграничения углов откоса кокса определяется существенными различиями формирования поверхности в зависимости от кольцевых зон, в которые осуществляется его выгрузка.

Общее количество сочетаний углов откоса из указанных диапазонов составило 91854 варианта. Из результатов выполненных исследований следует, что для шести вариантов конфигураций измеренного профиля поверхности засыпи, коэффициенты корреляции с расчетным, заключительным в цикле загрузки, профилем составили 0,650–0,994. Достаточно высокая теснота связи расчетного и измеренного заключительного в цикле загрузки профиля поверхности засыпи является основанием для выбора диапазонов изменения углов откоса материалов на работающей печи. Из анализа результатов исследований, представленных в табл. 4.5, выделены следующие диапазоны

изменения углов откоса шихтовых материалов на колошнике печи: 8–27 град. к стенке печи и 20–30 град. к оси печи для кокса и железосодержащих материалов, а для случаев выгрузки кокса в центральную зону печи, углы откоса к стенке печи изменяются в диапазоне 8–21 град.

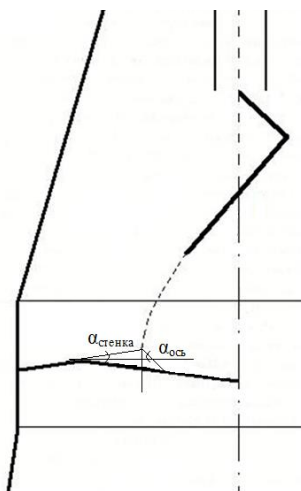
Задание в математическую модель радиального распределения шихты полученных углов откоса позволяет адаптировать ее к реальным условиям ДП №9 и повысить достоверность рассчитываемых с помощью модели параметров распределения и их последующего использования для выбора или корректировки программ загрузки.

Таблица 4.4

**Программа загрузки ДП №9**

№ порции	Вид материала	Распределение шихтовых материалов по угловым положениям лотка, %									Масса порции, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1	Кокс (К 2-1)								22	78	14,9
2	Кокс, скрап (К 8-4)		12	20	22	23	23				22,6
3	Жсм (АО 9-3)*)	18	25	17	11	9	17	4			111,9
4	Кокс, скрап (К 8-4)		15	18	21	22	24				22,3
5	Жсм (АО 9-3)	18	26	17	11	9	17	2			109,8

\*) агломерат, окатыши, шлак обогащенный, известняк, антрацит, орех



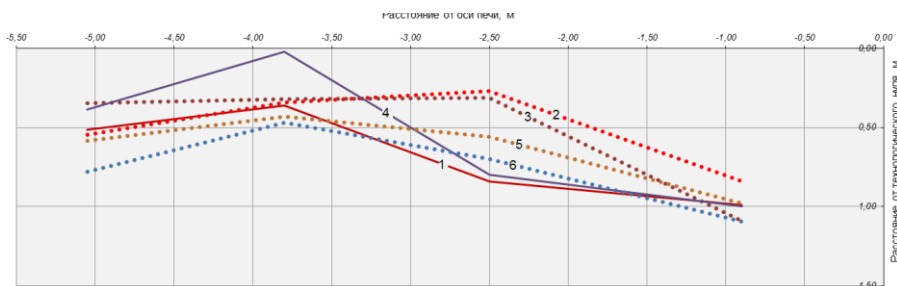
**Рис. 4.7.** Схематическое представление используемого в модели радиального распределения шихтовых материалов на колошнике принципа формирования поверхности засыпи

Таблица 4.5

**Результаты моделирования цикла загрузки с заключительной порцией АО 9-3**

№ профиля порции АО 9-3 (представлены на рис. 4.8)	Углы откоса, град						R <sub>x,y</sub> <sup>*)</sup>
	ЖСМ		Кокс		Осевого кокс		
	к стенке	к оси	к стенке	к оси	к стенке	к оси	
1	10–12	28–30	10–13	28–30	10–15	28–30	0,650–0,688
2	<b>10–27</b>	<b>20–30</b>	<b>8–27</b>	<b>20–30</b>	<b>8–21</b>	<b>20–30</b>	<b>0,950–0,994</b>
3	<b>10–13</b>	<b>28–30</b>	<b>10–16</b>	<b>28–30</b>	<b>10–15</b>	<b>28–30</b>	<b>0,950–0,971</b>
4	8–16	24–30	8–16	23–30	8–15	22–30	0,650–0,701
5	<b>8–14</b>	<b>22–24</b>	<b>8–16</b>	<b>22–24</b>	<b>8–13</b>	<b>22–24</b>	<b>0,900–0,931</b>
6	8–27	20–30	8–25	20–30	8–21	20–30	0,850–0,875

<sup>\*)</sup> – коэффициенты корреляции заключительного в цикле загрузки расчетного профиля поверхности засыпи шихты с профилем, измеренным профиломером.



**Рис. 4.8.** Конфигурации измеренных профилей поверхности засыпи шихты после выгрузки порции АО 9-3 для шести исследуемых вариантов

**4.2.2 Исследование формирования поверхности засыпи во время выгрузки порций шихтовых материалов**

Информация об особенностях формирования поверхности засыпи во время выгрузки материалов лотковым распределителем шихты, а также исследования изменения поверхности засыпи шихтовых материалов после выгрузки каждой порции шихты в цикле загрузки печи, позволяет определить перераспределение шихтовых материалов по радиусу колошника, что позволит уточнить результаты расчетов показателей распределения с



помощью математической модели. Как показали результаты исследований формирования поверхности засыпи, выполненные с использованием радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты, обрабатывая по специальным алгоритмам получаемую от системы информацию, можно фиксировать изменения профиля поверхности засыпи шихты во время выгрузки порций шихтовых материалов в цикле загрузки печи. Это позволяет получить информацию о распределении объемов кокса и железосодержащих материалов по радиусам колошника при заданных их значениях по угловым позициям распределителя в точках измерения профиля. Полученная информация может быть использована для оценки процессов перераспределения материалов по поверхности засыпи и контроля фактически выгруженных на поверхность засыпи из каждого углового положения лоткового распределителя объемов шихтовых материалов в рамках выгрузки порций шихты [146].

Для обоснования возможности получения информации о формировании поверхности засыпи шихты в точках измерения после выгрузки шихтовых материалов из каждого углового положения лоткового распределителя шихты в рамках выгрузки каждой порции материалов, разработан алгоритм определения параметров профиля поверхности засыпи шихты в точках измерения, который включает следующую последовательность выполняемых операций (при этом построение профиля поверхности засыпи шихты осуществляется согласно разработанному способу [127]):

1) регистрация средних показаний профилемера за интервал времени 1-3 секунды после поступления команды на начало открывания шихтового затвора (ШЗ) перед выгрузкой каждой порции в цикле загрузки шихты в выбранном периоде, соответствующих исходному профилю поверхности засыпи;

2) регистрация средних показаний профилемера за интервал времени 5-7 секунд после поступления команды на закрывание ШЗ после выгрузки каждой порций материалов в цикле загрузки в выбранном периоде, соответствующих изменению уровня поверхности засыпи в точках измерения после выгрузки порции;

3) корректировка масс материалов, выгружаемых из каждого углового положения лоткового распределителя каждой выгружаемой порции, определяемых из протокола загрузки БЗУ в соответствии с массой материалов соответствующей порции,

взвешенной на шихтоподаче ( $M_{II}^{III}$ ). (Корректировка обусловлена меньшей точностью взвешивания материалов в бункерах БЗУ. Так, например, для исследуемого периода работы печи погрешность составила: для порций КСкр 8-4 – 12,4%, для АОШо 9-3 – 11,3%, для К 2-1 – 3,1%);

4) определение времени выгрузки материалов из каждого углового положения лоткового распределителя ( $T_{ПОЗ}$ ), с :

$$T_{ПОЗ} = \frac{M_{ПОЗ}^{КОР} \cdot T_B}{M_{II}^{III}},$$

где  $M_{ПОЗ}^{КОР}$  – скорректированная масса материалов, выгружаемых из каждого углового положения лоткового распределителя,  $T_B$  – время выгрузки порции шихты,  $M_{II}^{III}$  – масса порции;

5) определение изменений уровней поверхности засыпи в точках измерения по радиусу колошника после выгрузки материалов из каждого углового положения лоткового распределителя;

6) определение координат поверхности засыпи шихты в точках измерения перед выгрузкой порции шихтовых материалов (исходного профиля) с учетом его изменения во время выгрузки (т.е. корректировка с учетом скорости опускания поверхности засыпи);

7) согласно разработанному и представленному в работе [133] методу, производится корректировка изменения профиля поверхности засыпи после выгрузки материалов из каждого углового положения лоткового распределителя с учетом их изменений во время выгрузки.

Исследования динамики изменения профиля поверхности засыпи шихты с использованием разработанного алгоритма были выполнены для периода работы ДП №9 14–15.01.2008 г. Состав шихтовых материалов и программа загрузки, используемые в исследуемом периоде работы печи, представлены в табл. 4.6 и 4.7. Результаты определения профиля поверхности засыпи шихты по четырем контролируемым радиусам во время выгрузки порций, полученные в соответствии с разработанным алгоритмом для порций цикла загрузки печи (КСкр 8-4, АОШо 9-3 и К 2-1), представлены на рис. 4.9 и 4.10.

Таблица 4.6

**Состав шихтовых материалов в исследуемом периоде работы печи**

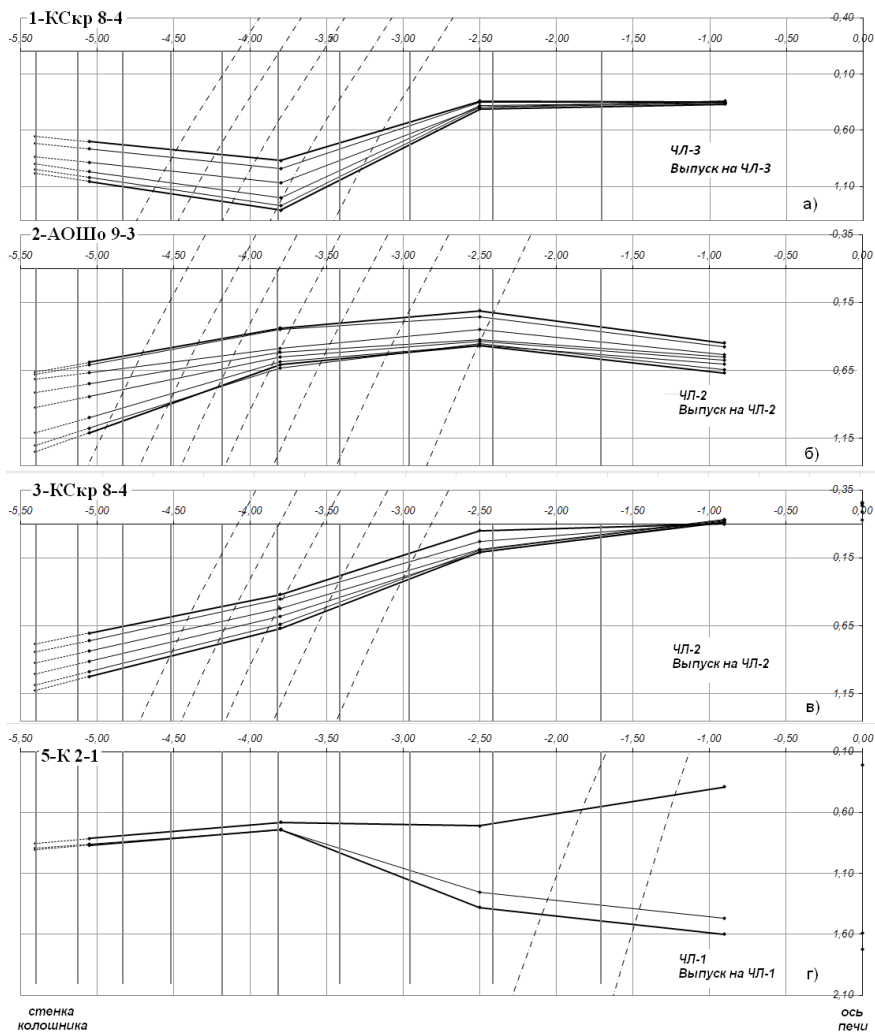
Вид материала	$\gamma, \text{т/м}^3$	№ порции, вид материала, масса, т, %									
		1-КСкр <sup>1)</sup> 8-4		2-АОШо 9-3		3-КСкр 8-4		4-АОШо 9-3		5-К 2-1	
		т	%	т	%	т	%	т	%	т	%
КХП 1-2 батарея	0,50	4,89	21,62	-/-	-/-	7,16	32,17	-/-	-/-	-/-	-/-
КХП 5-6 батарея	0,50	4,19	18,55	-/-	-/-	10,35	46,49	-/-	-/-	-/-	-/-
Польский кокс	0,50	8,42	37,23	-/-	-/-	0,32	1,44	-/-	-/-	14,66	98,55
Египет	0,50	0,65	2,87	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Орех	0,50	-/-	-/-	2,65	2,37	-/-	-/-	2,38	2,17	0,22	1,45
Антрацит		-/-	-/-	2,13	1,91	-/-	-/-	2,10	1,91	-/-	-/-
<b>Коксовая часть</b>		<b>18,15</b>	<b>80,27</b>	<b>4,78</b>	<b>4,28</b>	<b>17,83</b>	<b>80,10</b>	<b>4,48</b>	<b>4,08</b>	<b>14,88</b>	<b>100,00</b>
Агломерат НГОК II	1,70	-/-	-/-	78,42	70,07	-/-	-/-	65,38	59,54	-/-	-/-
Агломерат НГОК II (склад)	1,70	-/-	-/-	5,47	4,89	-/-	-/-	17,59	16,02	-/-	-/-
СевГОК	1,95	-/-	-/-	20,65	18,46	-/-	-/-	20,43	18,60	-/-	-/-
Известняк	1,30	-/-	-/-	0,13	0,11	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Скрап чугунный	2,40	4,46	19,73	-/-	-/-	4,43	19,90	-/-	-/-	-/-	-/-
Шлак обогащенный	1,60	-/-	-/-	2,45	2,19	-/-	-/-	1,94	1,76	-/-	-/-
<b>Железосодержащая часть</b>		<b>4,46</b>	<b>19,73</b>	<b>107,12</b>	<b>95,72</b>	<b>4,43</b>	<b>19,90</b>	<b>105,34</b>	<b>95,92</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>Σ</b>		<b>22,61</b>	<b>100,00</b>	<b>111,90</b>	<b>100,00</b>	<b>22,27</b>	<b>100,00</b>	<b>109,81</b>	<b>100,00</b>	<b>14,88</b>	<b>100,00</b>
$\Sigma \gamma, \text{т/м}^3$		0,87		1,70		0,88		1,70		0,50	
$\Sigma V, \text{м}^3$		25,85		65,91		25,36		64,53		29,74	

<sup>1)</sup> – К – кокс, Скр – скрап чугунный, А – агломерат, О – окатыши, Шо – обогащенный шлак

Таблица 4.7

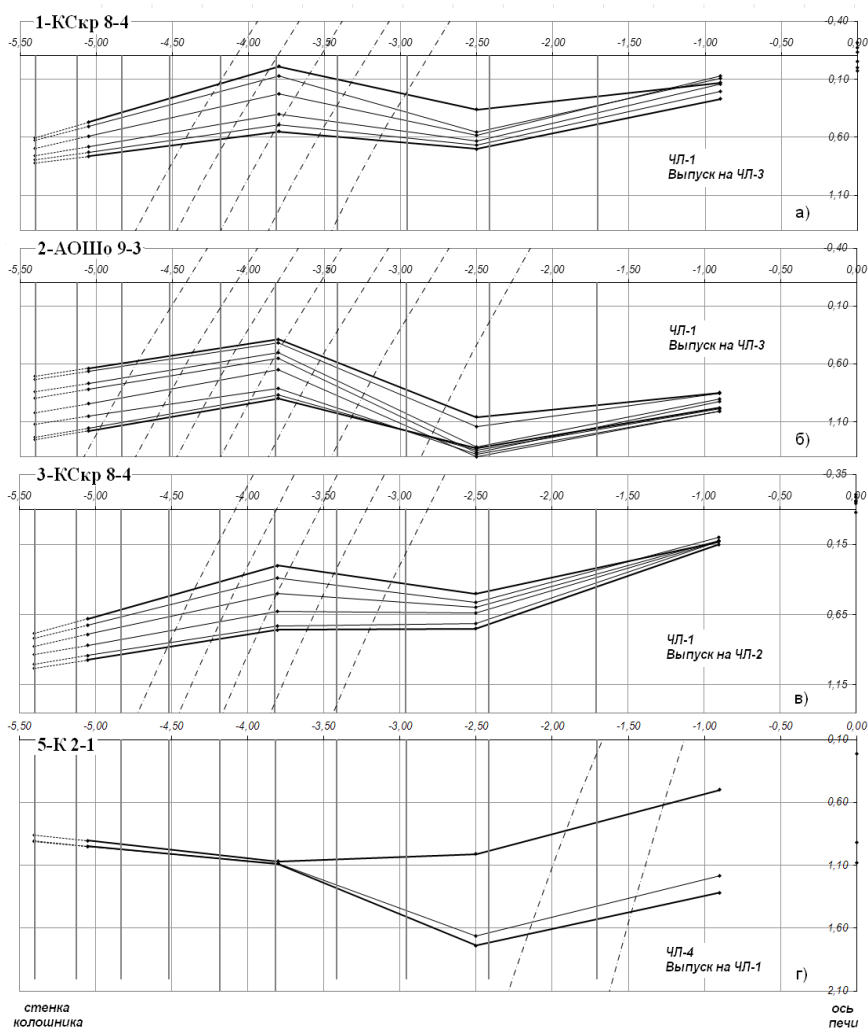
**Программа загрузки шихтовых материалов для исследуемого периода работы печи**

№ порции, вид материала	Распределение масс по угловым положениям лоткового распределителя, т									Σ
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1,6-КСкр 8-4		2,62	4,51	5,02	5,23	5,23				22,61
2,7-АОШо 9-3	19,82	27,65	19,18	11,81	10,48	18,61	4,34			111,90
3,8-КСкр 8-4		3,37	3,96	4,74	4,95	5,24				22,27
4,9-АОШо 9-3	19,46	29,01	18,76	11,58	10,20	18,36	2,44			109,81
5,10-К 2-1								3,28	11,59	14,87



штрихпунктирные линии – центры тяжести потоков шихтовых материалов, выгружаемых из угловых положений лоткового распределителя

**Рис. 4.9.** Динамика изменения профиля поверхности засыпи для исследуемого периода работы печи во время выгрузки порций 1 – КСкр 8-4, 2 – АОШо 9-3, 3 – КСкр 8-4 и 5 – К 2-1.



штрихпунктирные линии – центры тяжести потоков шихтовых материалов, выгружаемых из угловых положений лоткового распределителя

**Рис. 4.10.** Динамика изменения профиля поверхности засыпи для исследуемого периода работы печи во время выгрузки порций 1 – КСкр 8-4, 2 – АОШо 9-3, 3 – КСкр 8-4 и 5 – К 2-1

Как следует из рисунков, приращения слоев шихты, происходящие после выгрузки материалов из каждого углового положения лоткового распределителя, наблюдаются, в основном, на участках радиуса, соответствующих центрам потоков шихтовых материалов, представленных на графиках штрихпунктирными линиями.

Для порций КСкр 8-4 с воронкообразным исходным профилем поверхности засыпи для центральной и промежуточно-центральной зон радиуса колошника (0-2,5 м от оси печи) характерно расположение участка, образованного после выгрузки, ниже исходного профиля, что вызвано влиянием скорости опускания шихты в указанных зонах.

Следует также отметить, что в порциях КСкр 8-4 и АОШо 9-3, за исключением порции «осевого» кокса, визуально наблюдается нехватка объемов материалов после выгрузки материалов из крайних (8-е для порций кокса и 9-е – для железосодержащих материалов) угловых положений распределителя шихты. Указанная нехватка объемов, по нашему мнению, может являться следствием некорректного определения исходного профиля перед выгрузкой порции шихты на слой материалов, образованный после выгрузки предыдущей порции. Причиной этого является образование над поверхностью засыпи взвешенного слоя, что было установлено и ранее при проведении исследований особенностей поведения поверхности засыпи в доменной печи, и требует особого изучения.

Определение профиля поверхности засыпи во время выгрузки порций шихтовых материалов с помощью предложенной методики открывает возможность проведения дальнейших исследований, направленных на изучение процессов формирования поверхности шихтовых материалов в доменной печи и установление закономерностей ее изменения. Кроме того, информация о последовательном формировании слоев материалов в процессе выгрузки позволит уточнить алгоритмы математической модели радиального распределения шихты.

## ГЛАВА 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШАХТЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Процессы, протекающие в объеме печи, вызывают различное поведение шихтовых материалов в кольцевых зонах по радиусу колошника, результатом чего является опускание образованного после выгрузки профиля поверхности засыпи с различными скоростями в этих зонах. Выполненные ранее исследования [128] позволили определить фактические скорости опускания шихты в кольцевых сечениях колошника доменной печи №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» объемом 5000 м<sup>3</sup>. В то же время, скорости опускания поверхности засыпи шихтовых материалов на колошнике доменной печи не в полной мере отражают особенности перемещения столба сыпучих материалов в шахте печи, которые обуславливаются комплексом одновременно протекающих механических и физико-химических процессов. Одним из важных факторов, определяющих форму и положение элементов структуры столба шихты в доменной печи, является распределение скоростей опускания поверхности материалов по сечению шахты.

#### **5.1 Исследование изменения скоростей опускания поверхности шихтовых материалов по диаметрам печи от уровня колошника до верхнего горизонта шахты**

С помощью установленной на ДП №9 стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике выполнены исследования поведения поверхности засыпи шихтовых материалов при ее опускании в шахту доменной печи в режиме «догонка меры» после понижения уровня засыпи относительно заданной его величины при загрузке печи [147]. Исследования выполнены для периода работы печи 18.05.2008 г.

На рис. 5.1 приведен график изменения скоростей опускания шихты, приведенных к одному радиусу, усредненных за циклы загрузки печи на уровень засыпи 1,3 м и на упущенный, по сравнению с заданным, уровень до 2,6 м. Средняя скорость опускания шихтовых материалов в шахте печи составила 0,079 м/мин, что на 30% меньше скорости ее опускания на колошнике, составлявшей 0,113 м/мин. Основной причиной уменьшения скоростей опускания поверхности шихты в шахте

печи являются процессы растекания слоев (их выполаживание), что связано с увеличением площади поперечного сечения печи. Так, на уровне 2,6 м, по сравнению с уровнем 1,3 м, площадь поперечного сечения печи увеличивается на 0,5% (наклон образующей шахты к вертикальной оси -  $82,65^\circ$ ). При этом наблюдается тенденция выравнивания распределения скоростей по сечению печи, что иллюстрирует приведенный на рис. 5.2 график распределения относительных скоростей опускания поверхности шихтовых материалов при их выгрузке на заданный и упущенный уровни засыпи. Как следует из графика (рис. 5.2), при опускании шихты в шахте, относительные скорости опускания поверхности засыпи шихты по сечению печи практически одинаковые, и изменяются в пределах от 0,92 до 1,05 ед., а при опускании шихты на колошнике, относительные скорости в измеряемых сечениях изменялись от 0,82 ед. в первой промежуточной зоне до 1,21 ед. – в осевой зоне печи. Т.е. отмечается уменьшение в 2,6 раза величин отклонений вертикальной скорости опускания шихты в точках радиуса печи от средней по радиусу.

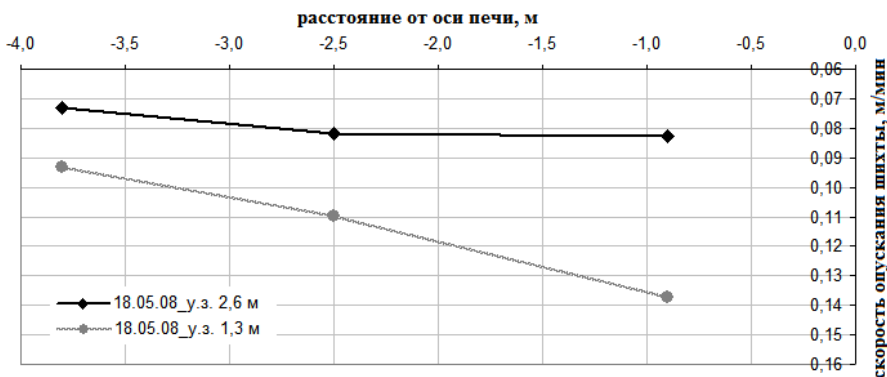
По мнению исследователей [81, 89], выравнивание скоростей по поперечному сечению шахты печи происходит под влиянием двух равнозначных факторов, вызывающих опускание шихтовых материалов в печи – расходование углерода на восстановительные процессы и плавление железосодержащих компонентов шихты. При используемой программе загрузки шихты на ДП №9, предусматривающей выгрузку большой массы кокса в осевую зону печи, выравнивание скоростей опускания шихты в шахте печи происходит в результате совокупного влияния сгорания кокса и плавления железосодержащих материалов, максимальное количество которых находится в промежуточной и в периферийной зонах печи.

Второй этап исследований поведения поверхности засыпи шихты в шахте доменной печи №9 был выполнен в период ее выдувки 07.11.2008 г. Во время выдувки опускание поверхности засыпи шихты контролировалось радиолокационными измерителями системы контроля профиля, за исключением вышедших из строя к этому времени измерителей, установленных в периферийной зоне сечения колошника.

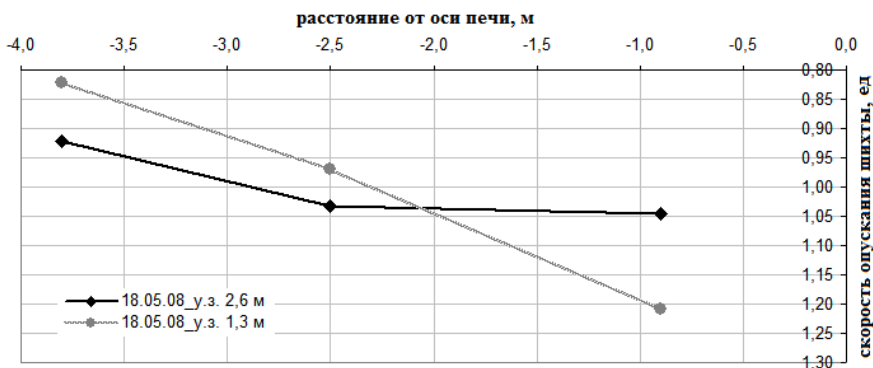
Профили поверхности засыпи, расположенные ниже 5 м от «технологического нуля» и зафиксированные в интервале времени 14:51–15:07, построены по данным, полученным с помощью всех работающих измерителей системы, установленных по диаметру ЭМЗ-1–ЭМЗ-3, приведены на рис. 5.3. Разница до 400 мм



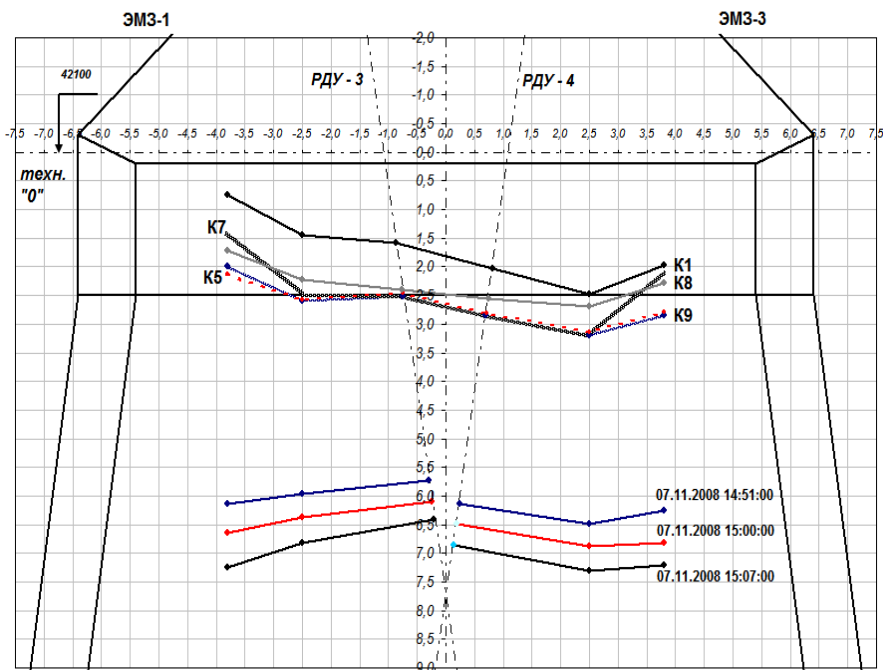
показаний РДУ-3 и РДУ-4, установленных под углами  $8^\circ$  относительно вертикальной оси (рис. 5.3) при измерении ими уровней засыпи, находящихя в одном горизонтальном сечении, может быть объяснена неровностью измеряемой поверхности, расстояние до которой измерители фиксируют по положению наиболее «яркой» точки поверхности по отношению к каждому из них.



**Рис. 5.1.** Распределение скоростей опускания поверхности шихтовых материалов, приведенных к одному радиусу печи, от уровня 1,3 м до 2,6 м



**Рис. 5.2.** Распределение относительных скоростей опускания поверхности шихтовых материалов, приведенных к одному радиусу печи, от уровня 1,3 м до 2,6 м

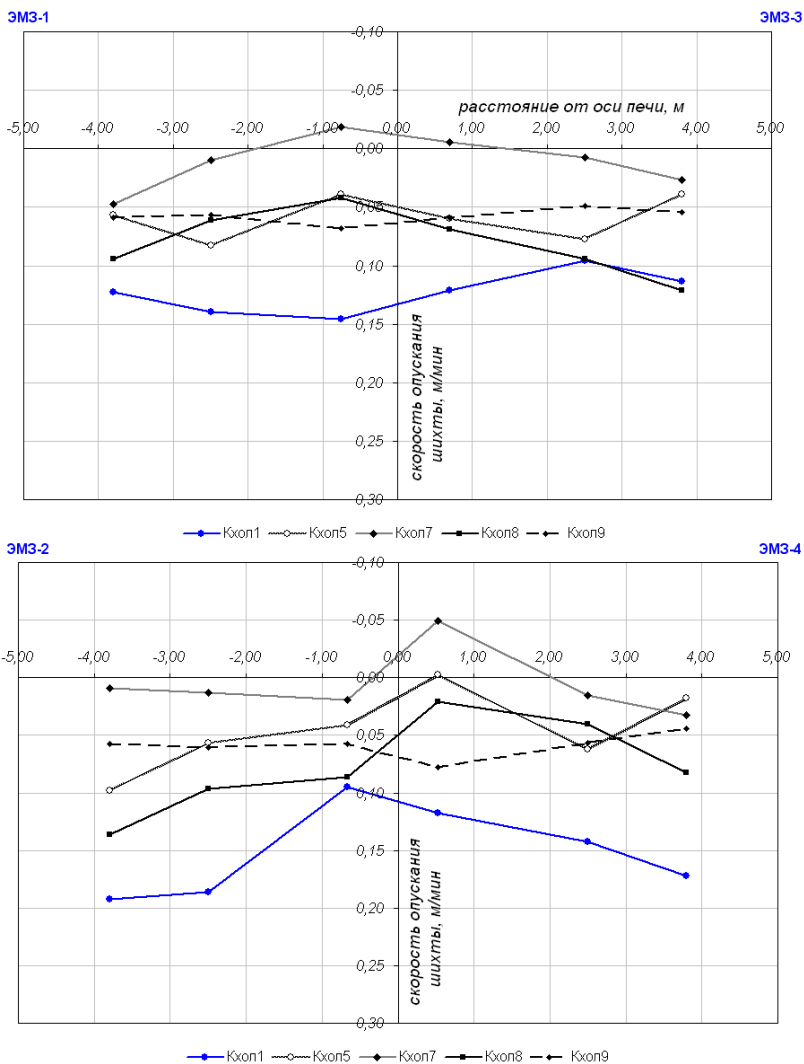


*K1...9 – профили поверхности засыпи, образованные после выгрузки порций «холостого» кокса*

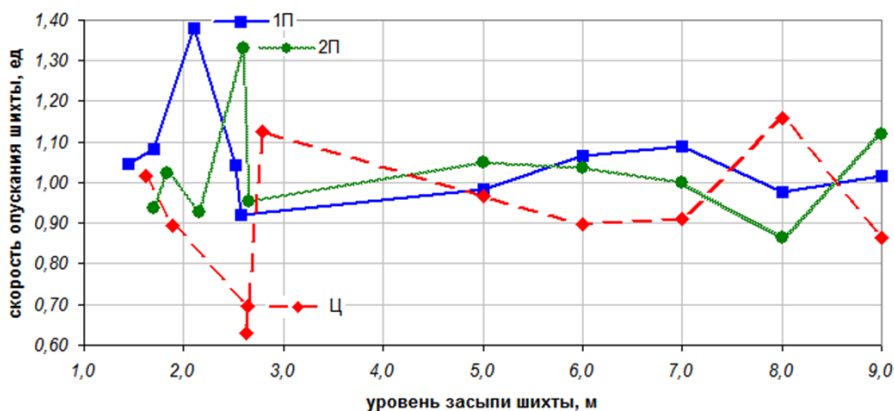
**Рис. 5.3.** Изменение профиля поверхности засыпи шихты по диаметру ЭМЗ-1–ЭМЗ-3 при выдувке ДП №9

Характер изменения скоростей опускания поверхности шихтовых материалов до уровня 9,0 м приведен на рис. 5.4 и 5.5, а изменения расхода дутья и уровня засыпи шихты в печи – на рис. 5.6.

На рис. 5.4. и 5.5 приведены графики изменения скоростей опускания поверхности засыпи, образованной в результате выгрузки порций «холостого» кокса на уровень засыпи 2,0 – 3,0 м, из анализа которых следует, что по мере выгрузки, с первой по девятую порции, скорости опускания уменьшаются и выравниваются по сечению печи, причиной чего может являться опускание столба шихты из колошника в шахту печи. Измерения поверхности засыпи с помощью всех измерителей системы осуществлялись до достижения поверхностью засыпи уровня 9,0 м. Приведенные на рис. 5.5 графики иллюстрируют изменения относительных скоростей опускания поверхности шихтовых



**Рис. 5.4.** Изменение скоростей опускания шихты по двум контролируемым диаметрам колошника после выгрузки порций «холостого» кокса



**Рис. 5.5.** Изменение средних относительных скоростей опускания шихты до и во время выдувки печи при различных уровнях засыпи

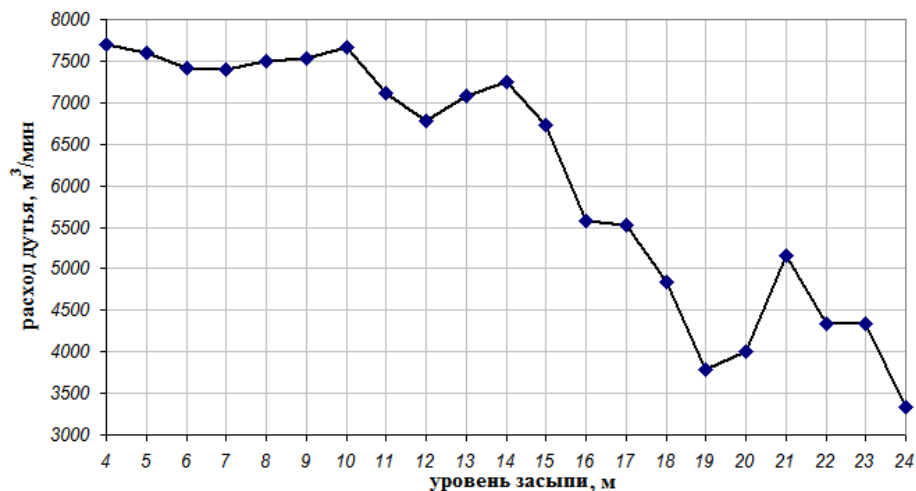
материалов до, в процессе и после начала выгрузки порций «холостого» кокса до достижения уровня засыпи 9,0 м при близких расходах подаваемого в печь дутья (рис. 5.6). Как следует из рисунка, амплитуда изменения относительных скоростей в шахте печи значительно уменьшается, до 13%, по сравнению с ее значениями, характерными для опускания поверхности засыпи на колошнике 30%.

Третий этап исследований поведения поверхности засыпи шихты в шахте ДП №9 был выполнен в период ее остановки с опусканием уровня засыпи до 6,0 м 29.05.10 г. Из приведенного на рис. 5.7 графика изменения скоростей опускания поверхности шихтовых материалов в трех контролируемых профилемером зонах сечения печи следует, что в шахте печи при практически постоянном расходе дутья (пределы изменения уровня засыпи – 2,0-4,0 м) (рис. 5.7) отклонение вертикальной скорости опускания шихты в точках радиуса печи от средней по радиусу уменьшается по сравнению с колошником, приблизительно, в 1,6 раза. При этом, перед остановкой, печь была загружена до технологического нуля и в пределах колошника шихта опускалась без загрузки порций шихтовых материалов.

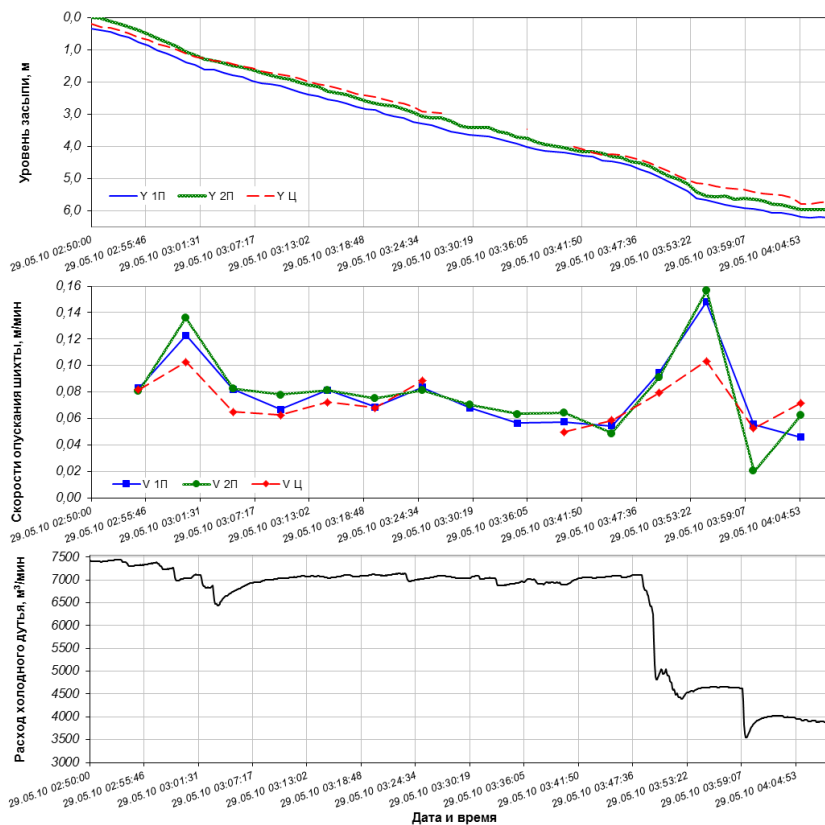
Полученные в результате анализа скоростей опускания поверхности засыпи шихты в режиме работы печи с «упущенным» уровнем засыпи и при ее выдувке данные об относительном их изменении в шахте печи позволяют заключить, что при постоянном

расходе дутья в поперечном сечении шахты печи поверхность шихтовых материалов опускается с практически одинаковыми относительными скоростями. При этом следует подчеркнуть, что в первом (рис. 5.1) и во втором (рис. 5.2) случаях режим загрузки шихтовых материалов в печь отличался от рабочего, а в третьем (рис. 5.3) – загрузка отсутствовала. В связи с отсутствием более достоверной информации о движении шихты в шахте доменной печи, считаем возможным принять для аналитических исследований процессов в печи с помощью математических моделей допущение о том, что скорости опускания шихты по диаметру печи одинаковые.

Выполненные с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи исследования позволили определить и сопоставить скорости опускания шихтовых материалов в шахте и на колошнике доменной печи. Установлено, что скорость опускания шихтовых материалов в шахте печи приблизительно на 30% меньше, чем на уровне колошника, кроме того, происходит выравнивание скоростей опускания шихты по сечению печи.



**Рис. 5.6.** Изменение расхода дутья и уровня засыпи шихты в процессе выдувки печи по показаниям измерителя РДУ-7

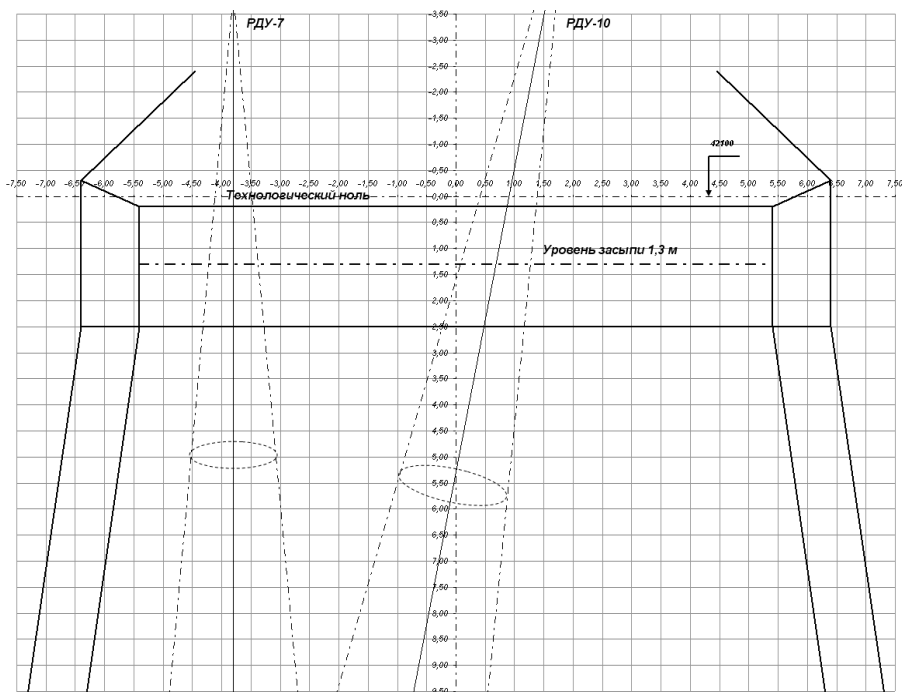


**Рис. 5.7.** Изменение уровней засыпи, скоростей опускания шихты и расхода дутья при остановке печи от уровня засыпи 0,53 м до 6,0 м

## 5.2 Исследование характера опускания шихтовых материалов в доменной печи от верхнего горизонта шахты до распара при ее выдувке

Контроль опускания поверхности засыпи шихтовых материалов при выдувке печи осуществлялся с помощью установленных на закладных РДУ-7 и РДУ-10 измерителей, позволяющих измерять уровень засыпи до отметки 30 м [134]. В связи с установкой на куполе печи РДУ-10 под углом  $9,75^\circ$  к вертикали, луч измерителя на расстоянии 5,25 м от технологического нуля пересекает ось печи, после этого фиксируется расстояние до поверхности шихты в зоне,

находящейся на противоположном от места его установки радиусе (рис. 5.8).

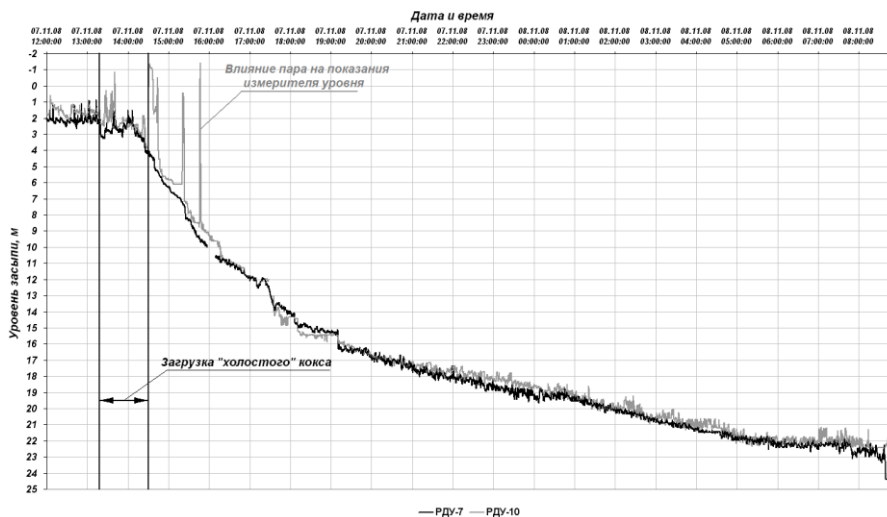


**Рис. 5.8.** Расположение радиолокационных измерителей, контролирующих уровень засыпи шихты в период выдувки печи

Изменение уровня засыпи в печи в процессе выдувки по данным двух измерителей приведены на рис. 5.9. На графиках, представленных на рис. 5.9, выделен интервал времени, в течение которого осуществлялась загрузка «холостых» порций кокса по программе: 1-К 8-4, 2-К 8-4, 3-К 7-4, 4-К 2-1, 5-К 7-4, 6-К 6-4, 7-К 6-4, 8-К 2-1, 9-К 6-4, 10-К 7-3, 11-К 6-4. Загрузка «холостого» кокса в печь была прекращена 7.11.08 г. в 14 ч 30 мин. В этот момент уровень засыпи в соответствии с показаниями измерителей, составил 4,0 м.

Зафиксированное с помощью РДУ-10 кратковременное значительное увеличение амплитуды изменения показаний измерителей в 14 ч 25 мин вызвано влиянием пара,

образовавшегося в результате подачи воды в печь и расположением форсунок в непосредственной близости от места установки измерителя. После 16 ч 00 мин расход воды был уменьшен и показания РДУ-10 стабилизировались (рис. 5.9). В процессе выдувки шихта опускалась в двух контролируемых сечениях с одинаковыми скоростями и при отсутствии перекоса поверхности по радиусу, что подтверждается показаниями измерителей, которые отличались не более, чем на 0,2 м, что находится в пределах точности измерений.



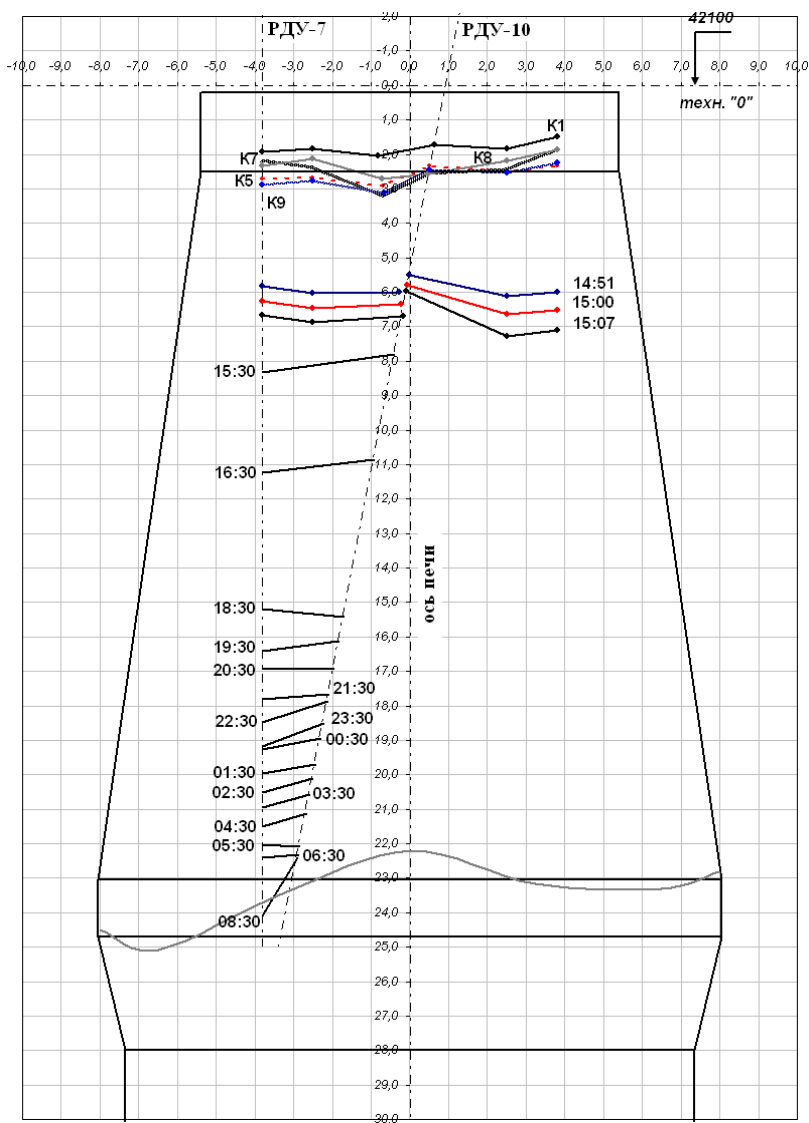
**Рис. 5.9.** Изменение уровня засыпи шихты в процессе выдувки печи по данным измерителей РДУ-7 и РДУ-10.

Ниже уровня 8 м измерения поверхности осуществлялись только с помощью РДУ-7 и РДУ-10, имеющих возможность контроля уровня засыпи до 30 м. На рис. 5.10 схематически отображено изменение профилей поверхности шихтовых материалов по мере их опускания в шахте печи по диаметру установки измерителей РДУ-7 и РДУ-10 – ЭМЗ 2–ЭМЗ 4. При этом профили, обозначенные на схеме К1...К9, характеризуют поверхность, образованную после выгрузки порций «холостого» кокса с 13:17 до 14:30. На момент окончания загрузки порций «холостого» кокса общий расход дутья составил  $7610 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

Выдувка печи по показаниям радиолокационных измерителей была закончена при достижении шихтой уровня

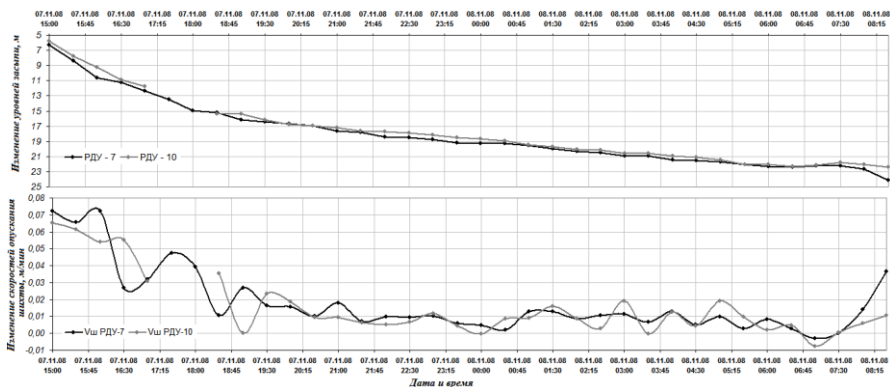


засыпи по показаниям РДУ-10 – 22 м и РДУ-7 – 23,4 м (уровень распара).



**Рис. 5.10.** Изменение профиля и уровней поверхности засыпи шихты при выдувке ДП №9

Представленные на рис. 5.10 изменения уровней поверхности засыпи, построенных по показаниям двух измерителей, по мере опускания шихты, свидетельствуют о близком к плоскопараллельному их движению в сечениях, находящихся между лучами измерителей. Подтверждает это и представленный на рис. 5.11 график изменения скоростей опускания в двух контролируемых сечениях печи, которые были рассчитаны на основе полученных с помощью РДУ-7 и РДУ-10 данных о положении поверхности засыпи шихты в шахте. Как следует из графика изменения скоростей (рис. 5.11), в среднем, участок поверхности шихты, расположенный между точками измерения, опускался по радиусу печи с близкими значениями скоростей. Так как аналогичные экспериментальные исследования характера опускания шихтовых материалов в шахте печи до настоящего времени не выполнялись, возможно допустить, что такой характер распределения скоростей опускания распространяется на всю поверхность засыпи шихтовых материалов.



**Рис. 5.11.** Изменение уровней засыпи и скоростей опускания поверхности шихты по данным РДУ-7 и РДУ-10

Увеличение скорости опускания поверхности шихтовых материалов при достижении ею уровней 8 м и 14 м вызвано увеличением расхода дутья – в первом случае от 7390 до 7500 м<sup>3</sup>/мин, во втором – от 7086 до 7248 м<sup>3</sup>/мин (рис. 5.12). Для оценки влияния изменения поперечного сечения шахты на значение скоростей опускания на рис. 5.13 приведен график изменения скоростей от их начального значения, в качестве которого принята средняя скорость опускания последней порции

холостого кокса К9, выгруженного на поверхность засыпи, находящуюся на уровне колошника печи.

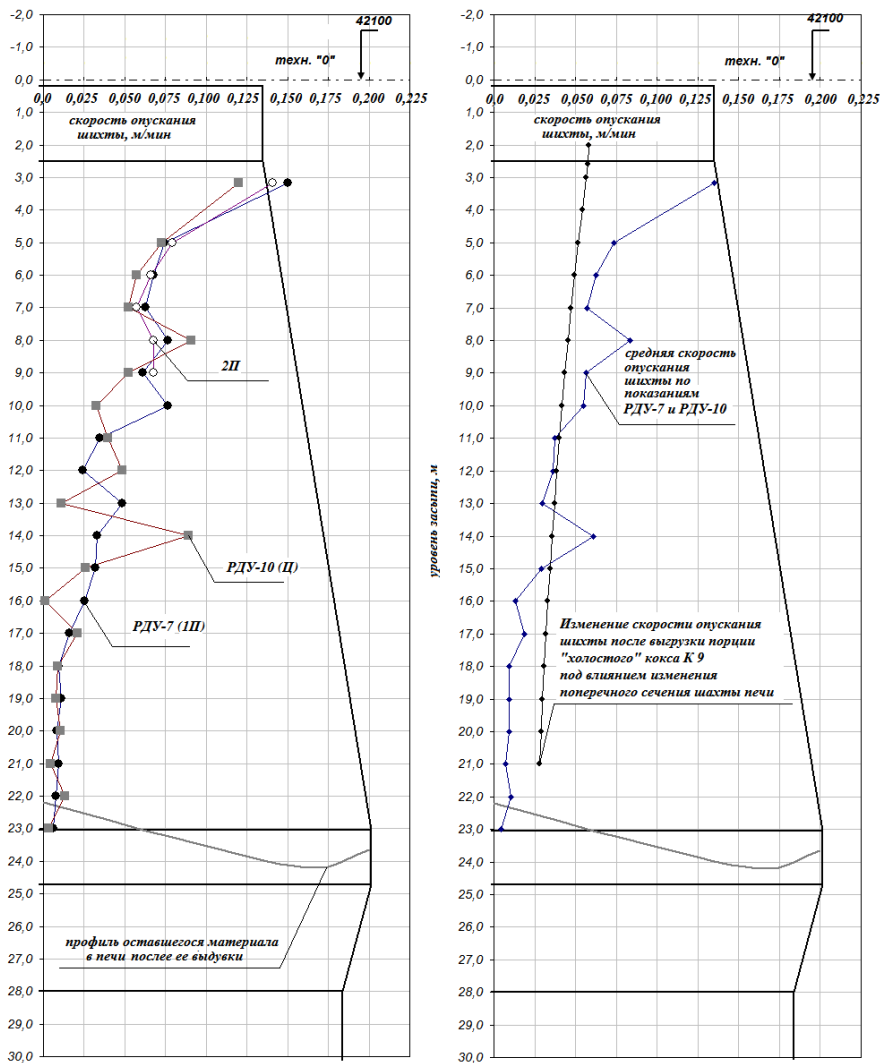
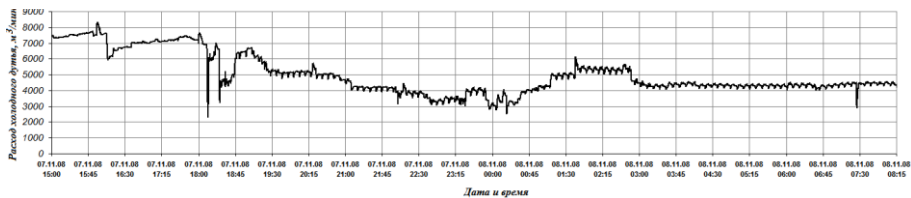


Рис. 5.13. Изменение скоростей опускания поверхности шихтовых материалов по высоте шахты печи

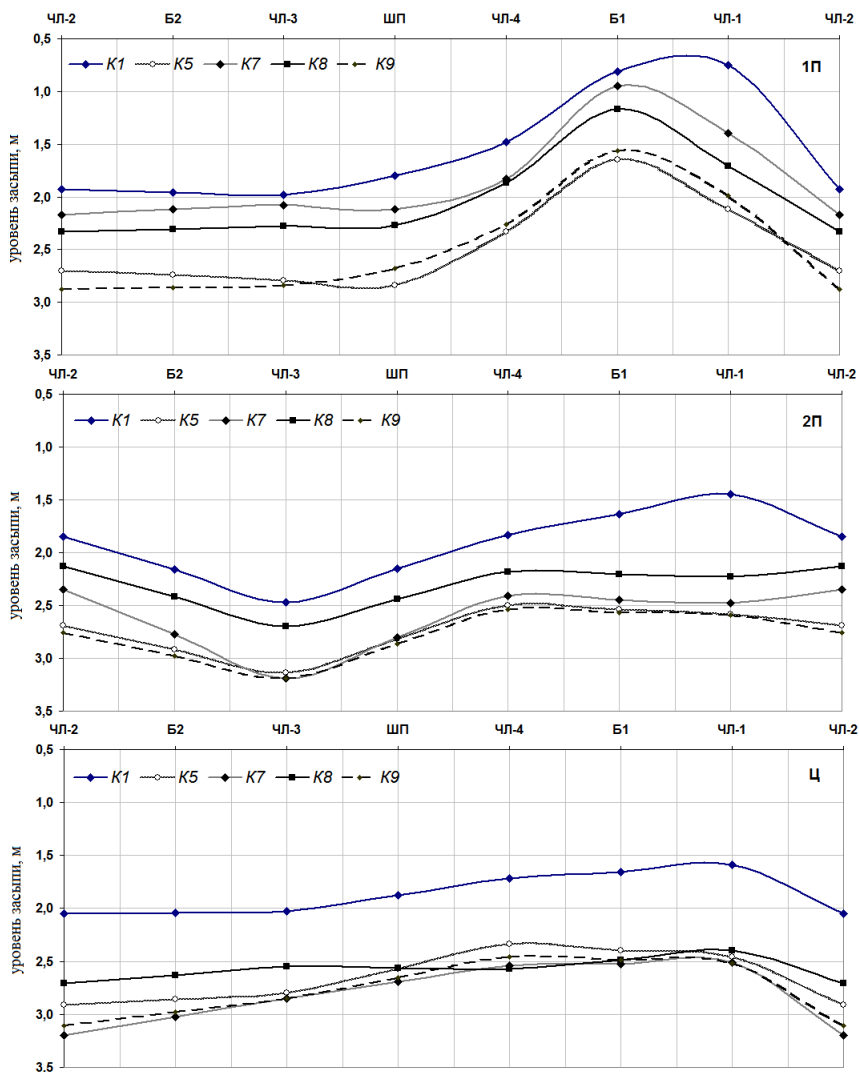


**Рис. 5.12.** Изменение расхода дутья в период выдувки ДП №9

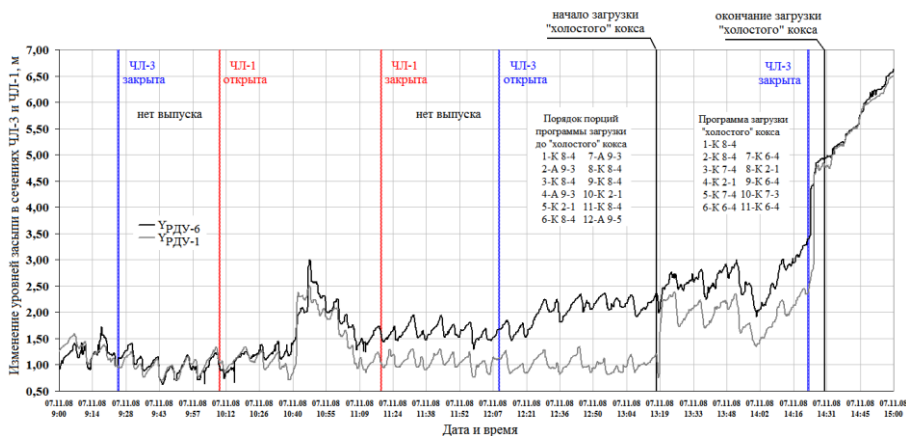
Уменьшение скорости опускания поверхности шихты отмечено при уменьшении расхода дутья от 5250 до 3130 м<sup>3</sup>/мин, график изменения которого приведен на рис. 5.12. Как следует из графика, в периоды времени, когда уменьшался расход дутья, уменьшалась и скорость опускания поверхности шихты в сечениях, контролируемых измерителями.

### **5.3 Исследование характера опускания шихтовых материалов по окружности печи на уровне колошника и верхнего горизонта шахты**

На рис. 5.14 приведены графики изменения уровней засыпи по окружности печи, измеренные после выгрузки порций «холостого» кокса. Из приведенных графиков следует, что максимальные значения уровней засыпи находятся: для зоны 1П – в секторе печи: ЧЛ №2–Б2–ЧЛ №3; для зоны 2П – в секторе Б2–ЧЛ №3– ШП; для Ц – в секторе печи ЧЛ №2–Б2–ЧЛ №3. Такой характер распределения уровней засыпи объясняется влиянием выпуска продуктов плавки через ЧЛ №3, начавшегося в 12:10 и закончившегося в 14:25. Как показано на рис. 5.15, значительное влияние выпуска на формирование поверхности в секторе ее действия, которое привело к возникновению перекоса профиля поверхности засыпи более 1 м, обусловлено тем, что в течение часа до начала выпуска печь работала в режиме накопления продуктов плавки. На рис. 5.16 приведены графики дальнейшего изменения уровней засыпи шихты по окружности печи, зафиксированные для трех временных интервалов – 14:51, 15:00 и 15:07 при работе печи без выпуска продуктов плавки. При этом, наибольшие значения уровней засыпи в зонах сечения печи для зоны 1П отмечались в секторе ЧЛ №3, ЧЛ №1; для зоны 2П: ЧЛ №3–ШП–ЧЛ №4; для зоны Ц: ЧЛ №2–Б2–ЧЛ №3.



**Рис. 5.14.** Изменение уровней засыпки по окружности в трех зонах сечения колошника после выгрузки порций «холостого» кокса (выпуск продуктов плавки через ЧЛ №3)

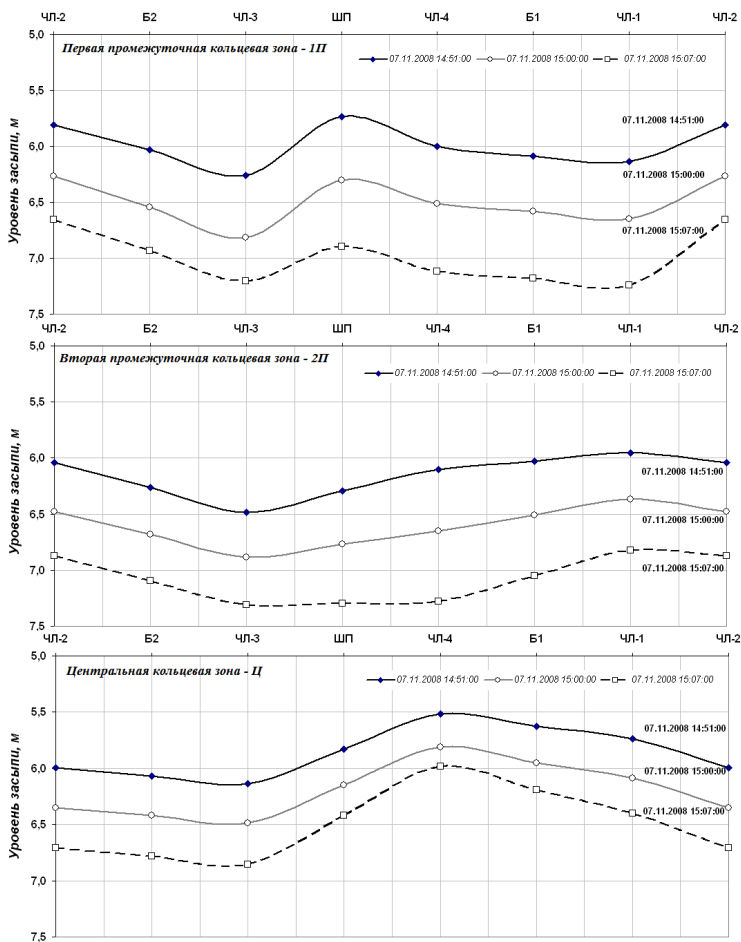


**Рис. 5.15.** Изменение уровней засыпи шихты в сечениях ЧЛ-3 и ЧЛ-1

Как следует из рис. 5.15, влияние выпуска продуктов плавки на опускание поверхности шихты проявляется и на уровне 23,5 м от технологического нуля (приблизительно на 500 мм ниже горизонта распара), о чем свидетельствует резкое изменение угла наклона линии профиля. Этого уровня поверхность шихты достигла в 7:00, а начиная с 6:10 был открыт выпуск на ЧЛ №2, в сторону сектора которой и произошло резкое изменение положения линии профиля. Резкое увеличение скорости опускания поверхности засыпи шихты (при неизменных значениях расхода дутья ~ 4400 м<sup>3</sup>/мин), начиная с 7:00, соответствовало достижению поверхностью шихтовых материалов уровня распара (ур. 24 м) и вызвано влиянием на их дальнейшее опускание выпуска продуктов плавки, что иллюстрирует приведенный на рис. 5.11 график изменения скоростей. Это подтверждают приведенные в литературных источниках результаты исследований, согласно которым в нижней части шахты печи опускание уже расплавившихся материалов ускоряется под влиянием горения кокса и выпуска продуктов плавки.

Выполненные при выдувке доменной печи экспериментальные исследования позволили, на основе непрерывного измерения положения поверхности засыпи шихты, установить, что в шахте скорость опускания шихты выравнивается по сечению печи. В верхней части шахты опускание шихты замедляется, а затем при достижении уровня распара ее движение

ускоряется под влиянием выпусков продуктов плавки. Полученные результаты близки к выводам, сделанным И. Г. Половченко [104] и др. в ходе исследований поведения шихты в шахте печи, оснащенной конусным загрузочным устройством, с использованием радиоактивных изотопов, а также Л. З Ходаком и Ю. И. Борисовым при физическом моделировании опускания поверхности шихтовых материалов [92].



**Рис. 5.16.** Изменение уровней засыпи по окружности в трех зонах сечения колошника по мере опускания шихты в процессе выдувки печи

На рис. 5.10 схематически представлено расположение конуса остаточного кокса, которое было зафиксировано после окончания выдувки инструментальными замерами, выполненными с помощью лазерного измерителя дальности и подвесного груза, опускаемого через монтажный люк. Как следует из рис. 5.10, оба радиолокационных измерителя позволили зафиксировать положение конуса кокса, что затем было подтверждено измерениями на остановленной печи.

Полученная впервые информация о характере опускания поверхности шихтовых материалов в шахте печи объемом  $5000 \text{ м}^3$ , несмотря на ограничения, связанные с тем, что исследования были выполнены в процессе выдувки печи при отсутствии ее непрерывной загрузки шихтой, а также уменьшенных расходах дутья содержит новые научные знания о поведении шихты в шахте доменной печи и может быть использована при аналитических исследованиях процессов доменной плавки.



## ГЛАВА 6

### МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗА ХОДА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ПРОФИЛЕМЕРА

Ранее выполненные исследования позволили установить, что формирование поверхности засыпи шихты зависит как от параметров режима загрузки, так и хода печи [87, 129]. Процессы, протекающие в объеме печи, вызывают различное поведение шихтовых материалов в кольцевых зонах по радиусу колошника, результатом чего является опускание образованного после выгрузки профиля поверхности засыпи с различными скоростями в этих зонах. Это позволяет предположить, что такой параметр, как скорость опускания поверхности шихты, может быть использован для косвенной оценки протекающих в объеме печи процессов, а также оценки положения элементов структуры столба шихты. В ходе экспериментальных исследований с помощью стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты, результаты которых приведены в главе 5, установлено распределение скоростей опускания поверхности материалов по сечению шахты печи, которые, как известно, определяют форму и положение элементов структуры столба шихты.

Взаимосвязь поверхности засыпи шихты, структуры столба шихты в печи и технологических параметров процесса плавки позволяет поставить задачу установления взаимосвязей параметров поверхности засыпи шихты с технологическими параметрами процесса и на их основе разработать методы контроля, прогноза и управления процессами.

#### **6.1 Установление взаимосвязи скоростей опускания шихты с содержанием кремния в чугуна. Разработка метода прогнозирования содержания кремния в чугуна**

Тепловое состояние доменной печи является одним из основных показателей доменной плавки, определяющих расход топлива на выплавку чугуна, производительность печи и химический состав чугуна [148]. Поэтому оценка изменения теплового состояния доменной печи является одной из основных задач экономичного ведения процесса плавки. Общеизвестным параметром оперативной оценки изменения теплового состояния печи является содержание кремния в чугуна на выпуске из доменной печи [149]. В связи с этим, возможность

прогнозирования содержания кремния в чугуне по ходу плавки является важным этапом регулирования теплового состояния доменной печи.

Общепринятые способы контроля теплового состояния горна доменной печи основаны на расчете материально-тепловых балансов доменной плавки и нижней зоны печи с учетом сдвига во времени между протеканием реакций косвенного и прямого восстановления в одном объеме шихтовых материалов [150, 151]. Балансовые уравнения для прогнозирования содержания кремния в чугуне включают те статьи теплового баланса, которые возможно рассчитать, используя непрерывно контролируемые параметры. Последнее связано с необходимостью непрерывного измерения большого комплекса параметров при высоких метрологических требованиях с последующим расчетным анализом и расшифровкой неоднозначной информации. Однако такие способы контроля теплового состояния печи описывают установившийся процесс при постоянстве количества и характеристик шихтовых материалов, параметров дутьевого режима, тепловых и физико-химических процессов в печи. Для процессов доменной плавки характерна нестационарность режимов, поэтому использование известных способов возможно только при усреднении статей прихода и расхода за определенный промежуток времени, как правило, составляющий несколько суток, причем этот промежуток времени тем более длителен, чем более инерционен процесс. По важнейшему каналу управления «рудная нагрузка – содержание Si в чугуне» инерционность процесса составляет величину в пределах 4–10 часов (по данным фирмы «Италсидер» даже 14 часов) [152].

К известным способам регулирования теплового состояния доменной печи может быть отнесен разработанный в ИЧМ способ прогнозирования содержания кремния в чугуне за 6–8 часов до выпуска его из печи путем измерения глубины осевой воронки профиля поверхности шихтовых материалов на колошнике, определение средних значений величин этой глубины за каждый час текущего времени и их отклонений от часа к часу за определенный период. Способ применим только на доменных печах, оборудованных конусными загрузочными устройствами, для которых характерна работа с профилем поверхности засыпи, имеющим после загрузки в печь каждой порции шихтовых материалов выраженную осевую воронку. В то же время на доменных печах, оборудованных бесконусными загрузочными устройствами, для интенсификации осевого потока газов используют специальные программы загрузки с выгрузкой порций

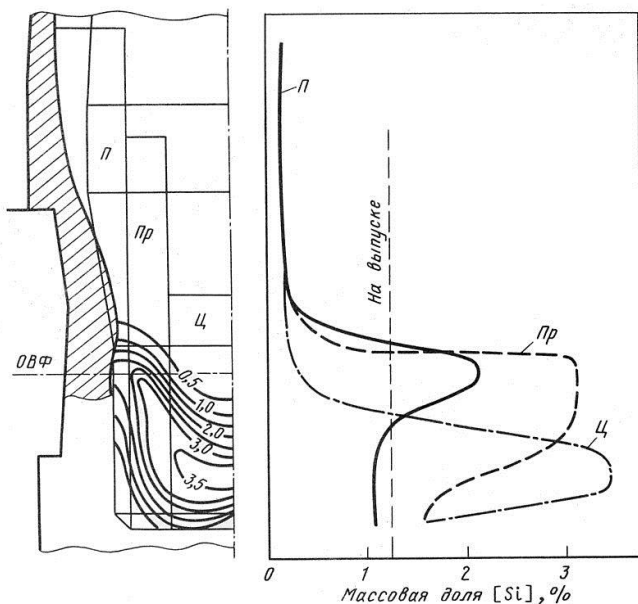
кокса в осевую зону печи. При использовании таких программ загрузки образуется профиль поверхности засыпи, имеющий часто либо горизонтальную форму, либо отрицательную осевую воронку (возвышение), что не позволяет установить взаимосвязи изменения величины осевой воронки с содержанием кремния в чугунае.

По мнению авторов работы [153], помимо расчета теплового баланса низа доменной печи, возможны и другие подходы к решению задачи, одним из которых является изыскание прямых показателей, отражающих разбаланс тепла в горне. В качестве такого показателя предложен теплосъем на фурмах, который зависит от количества тепла в газах фурменной зоны, температуры в очаге горения и канале фурмы, а также состояния гарнисажа, которое также связано с тепловым состоянием горна. Способ контроля теплового состояния горна по теплосъему на фурмах с последующим прогнозом содержания кремния на последующий выпуск чугуна реализован в системе контроля, работающей на ДП №8 «Криворожстали».

Установленная на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» радиолокационная система измерения профиля поверхности засыпи позволяет рассчитывать скорости опускания поверхности шихты по сечению колошника, которые формируются под воздействием распределения шихты и газового потока, в свою очередь, взаимосвязанного с тепловым состоянием горна доменной печи [128]. На основе экспериментальных исследований установлено, что изменение содержания кремния в чугунае от выпуска к выпуску тесно взаимосвязано с изменением средней скорости опускания шихты в осевой зоне печи за цикл загрузки. Это позволяет использовать изменение скорости опускания шихты в осевой зоне печи в качестве критерия, с помощью которого можно прогнозировать содержание кремния в чугунае.

Установленная связь обусловлена закономерностями формирования состава чугуна, полученными, в частности, при анализе материалов разборки охлажденной доменной печи Енакиевского метзавода [154]. Выполненные с помощью специальной методики исследования показали, что формирование содержания кремния в чугунае на выпуске является результатом смешивания чугуна, поступающего из областей с различным содержанием кремния. Схематически изменение среднего содержания элементарного Si в металле по высоте характерных зон печи приведено на рис. 6.1, из которого следует, что до середины заплечиков существенного восстановления Si в металле не происходит. Интенсивное восстановление Si в металле (от его

содержания 0,2%) начинается в периферийной и промежуточной зонах в нижней части заплечиков, а в центральной – лишь от горизонта воздушных фурм.

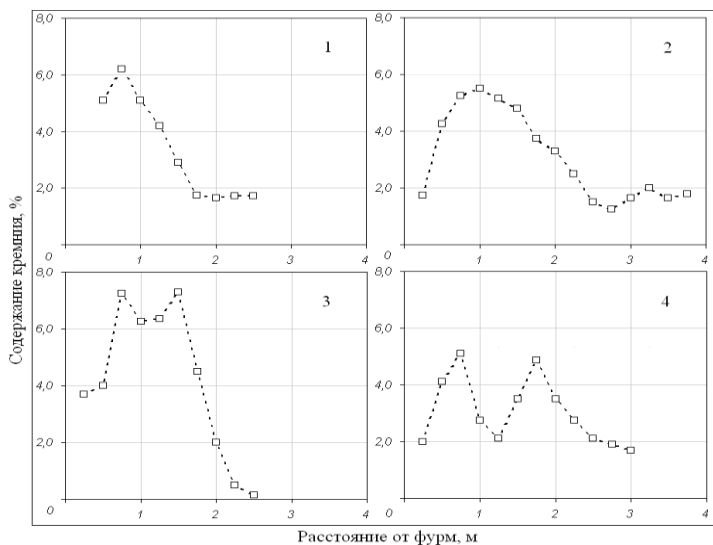


**Рис. 6.1.** Изменение содержания кремния в металлическом расплаве по высоте периферийной (П), промежуточной (Пр) и центральной (Ц) зон печи

Причем, в каждой из этих зон содержание Si достигает своего максимального значения на различных горизонтах: в периферийной и промежуточной зонах этот процесс происходит над воздушными фурмами (максимальное содержание кремния в периферийной зоне достигало 2,16% и в промежуточной – 3,12%), а в центральной зоне (3,45%) – несколько ниже оси шлаковой летки. Чугун периферийной и промежуточной зон окисляется на фурмах и поступает в подфурменное пространство с уменьшенным содержанием кремния, близким к конечному. Чугун центральной зоны поступает в эту область с максимальным содержанием кремния. Далее расплавы смешиваются, и происходят процессы вторичного окисления-восстановления. Поскольку в области смешения и вторичного окисления-восстановления содержание

кремния в чугуне центральной зоны в 2-3 раза превышает аналогичное содержание в чугуне из периферийной и промежуточной зон, роль его в формировании конечного состава чугуна более существенна. Эти представления о формировании конечного содержания кремния в чугуне объясняют установленную более тесную связь параметров центральной зоны с содержанием кремния в чугуне по сравнению со связью параметров других зон и дают основания для возможности прогнозирования содержания кремния в чугуне на выпусках на основе анализа изменения скоростей опускания шихты в осевой зоне печи.

Известны также исследования [121], выполненные с помощью вводимых через фурмы зондов и показавшие, что на участке вдоль радиуса печи, начиная от фурмы и до расстояния 0,75 м, содержание кремния быстро увеличивается, более чем до 5% (рис. 6.2). Затем, по мере приближения к оси печи, оно уменьшается. По мнению авторов, обоснованием меньшего содержания кремния в чугуне на выпуске, по сравнению с его значением в результате восстановления, является смешивание чугуна, попадающего из областей с пониженным содержанием кремния, например, из области между фурмами или из осевой зоны печи.



**Рис. 6.2.** Распределение содержания кремния в чугуне по радиусу печи: (1 – 4 – номера пробоотборных трубок)

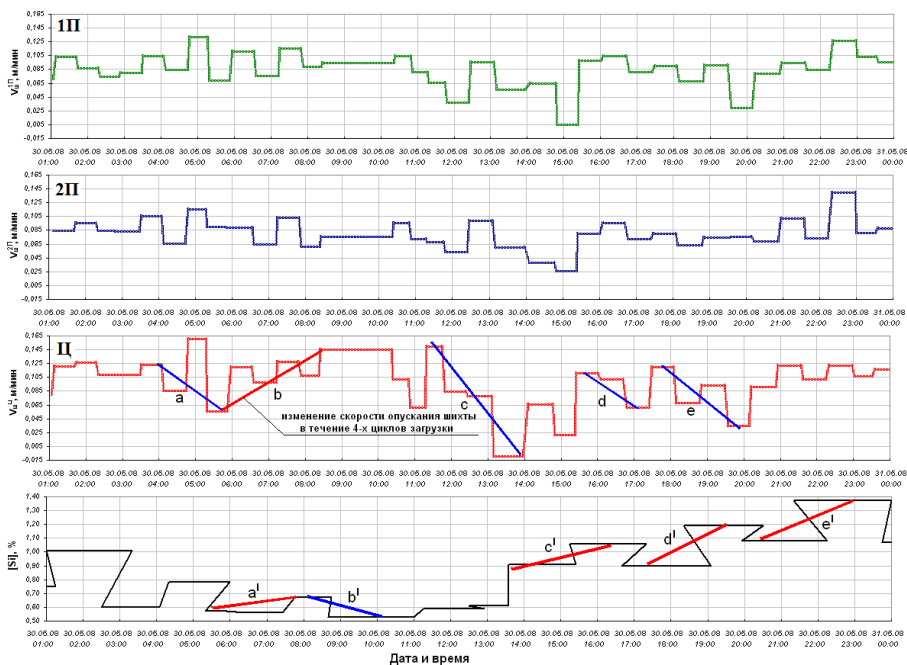
Эти представления о формировании конечного содержания кремния в чугуне объясняют установленную нами более тесную связь параметров центральной зоны с содержанием кремния в чугуне, по сравнению со связью параметров других зон, и дают основания для прогнозирования содержания кремния в чугуне на выпусках на основе анализа изменения скоростей опускания шихты в осевой зоне печи.

Исследования по установлению взаимосвязи содержания кремния в чугуне со скоростями опускания шихтовых материалов выполнены на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». В качестве примера, на рис. 6.3 приведено изменение скоростей опускания шихтовых материалов в период с 17.05.2008 г. по 31.05.2008 г. в трех зонах сечения колошника – двух промежуточных и осевой. Как следует из рис. 6.3, на графиках изменения скоростей опускания шихты в промежуточных зонах отсутствуют участки систематического изменения величин скоростей, которые могли бы являться основанием для прогноза содержания кремния в чугуне на выпуске. В то же время, изменение скоростей в осевой зоне печи характеризуется временными участками, имеющими явно выраженные направленные изменения в большую или меньшую сторону. Эти участки условно определены индексами «а» – «е». Из анализа графика изменения содержания кремния в чугуне на выпусках следует, что через 2–3 часа после определения среднечасовой скорости происходит адекватное изменению скорости изменение содержания кремния, причем, увеличению (уменьшению) скорости соответствует уменьшение (увеличение) содержания кремния на выпуске через 2–3 часа. На графике изменения содержания кремния участки, соответствующие изменению скоростей, обозначены индексами «а'»–«е'». Таким образом, выполненные исследования подтвердили тесную взаимосвязь изменения скоростей опускания шихтовых материалов в осевой зоне печи с содержанием кремния в чугуне.

На основании этого в Институте черной металлургии НАН Украины разработан способ прогнозирования содержания кремния в чугуне за 3 часа до выпуска его из печи, в основу которого положены взаимосвязи изменения скорости опускания шихты в осевой зоне с содержанием кремния в чугуне [15, 16].

Использование разработанного способа прогнозирования содержания кремния в чугуне в исследуемых периодах работы печи (табл. 6.1) показало невязку прогнозных и фактических значений, составившую, в среднем, 20%, что обусловило

необходимость усовершенствования способа. По нашему мнению, невязка, составившая 20%, является следствием влияния на прогнозную величину кремния ряда технологических показателей плавки, влияние которых не отразилось на изменении скорости опускания шихты.



**Рис. 6.3.** Изменение скоростей опускания шихты в трех зонах сечения колошника и содержание кремния в чугуне

Следующим этапом развития способа было выполнение регрессионного анализа изменения прогнозных величин содержания кремния в чугуна, которая является критериальной величиной, и технологических параметров плавки, используемых в качестве регрессоров анализа, для периода работы печи общей продолжительностью 380 ч. Регрессионный анализ показал, что на величину содержания кремния в чугуна за 3 часа до его выпуска, помимо среднечасовой скорости опускания шихты в осевой зоне колошника на момент прогнозирования ( $V_{ш II}$ ), оказывает влияние среднечасовая величина содержания кремния в чугуна на момент прогнозирования  $[Si_{тек}]$ , среднечасовая величина содержания кремния в чугуна за 3 часа до прогнозирования  $[Si_{тек-3ч}]$ ,

Таблица 6.1

### Технико-экономические показатели работы ДП №9 ( $V_{II}=5034 \text{ м}^3$ )

Параметры, показатели		Ед. изм.	Периоды, №№, дата							
			I (14–15.01.2008)	II (17–18.05.2008)	III (29–31.05.2008)	IV (01–03.03.2010)	V (08–10.03.2010)	VI (10–15.03.2010)	VII (21–25.03.2010)	VIII (01–06.04.2010)
Номинальное время работы		час	42,27	30,97	55,93	57,43	42,64	125,56	79,32	126,53
Пр-во чугуна (горячего)		т/сут	9283	9388	9157	7284	7634	7812	7654	8440
Расход кокса (в т.ч. коксового «ореха»)		кг/т	447,1	475,0	472,7	444,3	460,2	473,9	459,3	458,4
Расход антрацита		кг/т	30,34	37,76	27,16	41,96	45,00	38,10	44,12	50,42
Рудная нагрузка на кокс+антр		т/т кокса	3,66	3,41	3,50	3,49	3,33	3,35	3,57	3,46
Доля в ж.р. части шихты	агломерата (А)	%	80,21	81,76	84,10	100	100	100	100	100
	окатышей (О)	%	17,79	18,24	15,90	0	0	0	0	0
Дутье	расход ( $Q_{пр.д}$ )	м <sup>3</sup> /мин	7982,4	7787,8	7893,9	7322,8	7271,9	7496,4	7144,7	7493,5
	давление ( $P_d$ )	ати	3,63	3,42	3,02	3,21	3,05	3,07	3,23	3,46
	температура ( $T_d$ )	°С	1058	1031	1087	1088	1044	1041	1042	1099
	$Q_{дв.р}$	т/ч	1,40	0,00	0,00	1,64	1,23	2,55	2,92	2,27
	доля O <sub>2</sub> , (ωO <sub>2</sub> )	%	26,0	28,1	27,6	24,1	23,8	24,3	24,6	25,6
Расход природного газа, ( $Q_{пр.г}$ )		м <sup>3</sup> /мин	569,4	512,9	522,1	315,2	312,7	309,1	322,2	355,4
Теоретическая тем-ра горения	( $T_r$ )	°С	2084	2216	2224	2155	2108	2119	2118	2208
Выход колошникового газа на $1 \text{ м}^2 S_{кол}$ при $P_{кол}$		м <sup>3</sup> /мин м <sup>2</sup>	50,46	52,69	61,94	55,63	59,14	59,90	56,92	53,06
Колошниковый газ	давление (Рк)	ати	1,65	1,56	1,18	1,28	1,15	1,17	1,30	1,52
	температура (Тк)	°С	84	88	86	83	94	89	96	80
Химсостав колошникового газа (объемная доля)	CO <sub>2</sub>	%	19,19	19,43	19,81	19,52	19,23	18,84	19,48	19,81
	CO	%	25,42	27,81	26,78	27,29	27,25	27,52	29,24	28,50
	H <sub>2</sub>	%	6,84	7,00	6,67	5,36	5,67	5,42	6,18	6,21
	N <sub>2</sub>	%	48,55	45,76	46,74	47,83	47,85	48,22	45,1	45,48
Степень использования CO, ( $\eta_{CO}$ )		%	43,02	41,13	42,52	41,70	41,37	40,64	39,98	41,00
Доля (Si) в чугуне		%	0,82	1,19	0,94	0,80	1,01	1,01	1,01	0,93
Кол-во работающих в.фурм		шт	42	42	42	42	42	42	42	42
Диаметр в.фурм		мм	150	150	150	150	150	150	150	150
Скорость истечения дутья из в.фурм		м/с	194,4	192,0	221,4	195,8	195,4	199,5	184,9	191,2
Тем-ра периф. газов ( $T_{пф}^{cp}$ )		°С	326,7	274,0	254,0	424,9	393,8	401,8	407,6	310,5
Тем-ра кладки шахты ( $T_{кш}^{cp}$ )		°С	388	348	321	533	512	541	546	493
Отношение	$K_p = T_{пф}^{cp} / T_{кол}$	ед.	3,89	3,11	2,95	5,15	4,19	4,53	4,26	3,90
	$K_{пш} = T_{кш}^{cp} / T_{кол}$	ед.	4,62	3,95	3,73	6,45	5,45	6,10	5,71	6,19
	$K_d = P_d / \Delta P$	ед.	0,84	0,84	0,64	0,67	0,61	0,62	0,68	0,81
Перепад давления по высоте печи	верхний ( $\Delta P_v$ )	ати.	0,45	0,40	0,37	0,43	0,41	0,42	0,41	0,35
	нижний ( $\Delta P_n$ )	ати.	1,51	1,45	1,46	1,48	1,47	1,47	1,49	1,54
	общий ( $\Delta P_{\Sigma}$ )	ати.	1,96	1,86	1,84	1,91	1,89	1,89	1,91	1,89



Продолжение 1 таблицы 6.1

**Технико-экономические показатели работы  
ДП №9 (V<sub>II</sub>=5034 м<sup>3</sup>)**

Параметры, показатели		Ед. изм.	Периоды, №№, дата								
			I (14-15.01.2008)	II (17-18.05.2008)	III (29-31.05.2008)	IV (01-03.03.2010)	V (08-10.03.2010)	VI (10-15.03.2010)	VII (21-25.03.2010)	VIII (01-06.04.2010)	
Расход шихтовых материалов	аглом. ГОК-1	т/под. кг/т. чугу.	—	—	—	—	—	—	—	0,04	0,68
	аглом. ГОК-1 (склад)	т/под. кг/т. чугу.	—	7,60 130,43	10,43 164,29	8,15 145,84	—	6,87 135,90	11,55 213,71	12,64 236,32	—
	аглом. ГОК-2	т/под. кг/т. чугу.	79,46 1244,28	68,09 1168,93	68,73 1082,15	80,35 1438,28	85,48 1537,96	70,22 1388,37	76,55 1416,37	67,17 1255,91	—
	аглом. ГОК-2 (склад)	т/под. кг/т. чугу.	3,81 59,73	—	7,17 112,93	—	—	2,69 53,17	—	—	5,54 103,53
	окатыши СевГОК	т/под. кг/т. чугу.	20,48 320,71	17,52 300,81	16,45 258,96	—	—	—	—	—	—
	Итого рудная часть	т/под. кг/т. чугу.	103,8 1624,71	93,21 1600,17	102,78 1618,32	88,50 1584,12	85,48 1537,96	79,79 1577,45	88,23 1632,33	85,56 1599,71	—
Добавки	известняк	т/под. кг/т. чугу.	0,14 2,20	1,47 25,17	1,05 16,60	—	—	—	—	—	—
	скрап чугу.	т/под. кг/т. чугу.	4,61 72,26	4,46 76,55	4,32 68,03	2,63 47,10	2,20 39,65	2,41 47,72	3,48 64,35	3,36 62,86	—
	шлак обогатительный	т/под. кг/т. чугу.	3,10 48,49	2,72 46,76	2,95 46,51	2,07 37,05	3,17 57,04	2,69 53,17	2,93 54,17	2,99 55,96	—
	МОЖ	т/под. кг/т. чугу.	—	—	—	1,51 27,02	2,54 45,73	1,91 37,67	2,64 48,76	2,26 42,28	—
	брикеты	т/под. кг/т. чугу.	1,62 25,42	0,24 4,13	0,52 8,19	—	0,27 4,93	—	0,12 2,30	0,09 1,75	0,09 1,75
	блом отходы	т/под. кг/т. чугу.	—	—	—	—	—	—	0,12 2,24	0,18 3,28	—
	Кокс	т/под. кг/т. чугу.	7,95 124,51	13,38 229,63	10,83 170,54	12,38 221,61	12,24 220,29	10,07 199,19	13,34 246,90	16,84 314,77	—
КХП 1-2 батарея	т/под. кг/т. чугу.	6,22 97,36	—	—	—	—	—	—	—	—	
КХП 5-6 батарея	т/под. кг/т. чугу.	11,07 173,38	11,28 193,63	8,03 126,46	9,12 163,23	9,84 177,07	11,25 222,38	7,18 132,79	5,25 98,11	—	
Польский	т/под. кг/т. чугу.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Темиртау	т/под. кг/т. чугу.	—	—	8,81 138,72	—	—	—	—	0,78 14,38	—	
Египет	т/под. кг/т. чугу.	0,77 12,08	—	—	—	—	—	—	—	—	
Коксовый «орех»	т/под. кг/т. чугу.	2,54 39,82	3,01 51,73	2,35 36,99	3,32 59,46	3,49 62,83	2,65 52,31	3,53 65,25	2,43 45,52	—	
Антрацит	т/под. кг/т. чугу.	1,94 30,34	2,20 37,76	1,72 27,16	2,34 41,96	2,50 45,00	1,93 38,10	2,38 44,12	2,70 50,42	—	
Количество подач	ед.	256	208	336	312	244	808	468	832	—	
Количество подач в час	ед.	6,1	6,7	6,0	5,4	5,7	6,4	5,9	6,6	—	

среднечасовое содержание пара в дутье на момент прогнозирования Q<sub>пара</sub>– среднечасовая теоретическая температура горения на момент прогнозирования T<sub>г</sub>, среднечасовая рудная нагрузка за 3 часа до прогнозирования (PH<sub>тек-3ч</sub>), среднечасовая рудная нагрузка за 6 часов до прогнозирования (PH<sub>тек-6ч</sub>).

На основании выполненного регрессионного анализа содержание кремния в чугуне определяется в соответствии с выражением (6.1.1), а весовые коэффициенты каждого из регрессоров приведены в табл. 6.2.

$$[Si]_{\text{прогн}} = \mathbf{a} \cdot V^{\text{II}} + \mathbf{b} \cdot T_f + \mathbf{c} \cdot [Si_{\text{тек}}] + \mathbf{d} \cdot (V^{\text{II}})^2 + \mathbf{e} \cdot [Si_{\text{тек}}]^2 + \mathbf{f} \cdot (PH_{\text{тек-6ч}}) + \mathbf{g} \cdot (PH_{\text{тек-3ч}}) + \mathbf{h} \cdot Q_{\text{пара}} + \mathbf{i} \cdot ([Si_{\text{тек-3ч}}]) + \mathbf{j},$$

(r<sub>x,y</sub>=0,74) (6.1.1)

где  $[Si_{\text{прогн}}]$  – прогнозируемое содержание кремния в чугунае, %;  
 $V_{\text{ш}}$  – среднечасовая скорость опускания шихты в осевой зоне колошника на момент прогнозирования, м/мин;  
 $[Si_{\text{тек}}]$  – среднечасовая величина содержания кремния в чугунае на момент прогнозирования, %;  
 $[Si_{\text{тек-3ч}}]$  – среднечасовая величина содержания кремния в чугунае за 3 часа до прогнозирования, %;  
 $Q_{\text{пара}}$  – среднечасовое содержание пара в дутье на момент прогнозирования, т/ч;  
 $T_f$  – среднечасовая теоретическая температура горения на момент прогнозирования, °С;  
 $(PH_{\text{тек-3ч}})$  – среднечасовая рудная нагрузка за 3 часа до прогнозирования, т/т;  
 $(PH_{\text{тек-6ч}})$  – среднечасовая рудная нагрузка за 6 часов до прогнозирования, т/т;  
 $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$  – весовые коэффициенты, значения которых определяются в зависимости от технологических условий доменной плавки.

Теоретическая температура горения определяется согласно выражению:

$$T_f = \frac{0,9341 \cdot T_{20} + 82,08 \cdot \omega_{O_2} - 0,00124 \cdot \varphi_{\delta} \cdot (2402 - 1,2127 \cdot T_{20}) - 26,76 \cdot \delta + 94,74}{1 + 0,01 \cdot \omega_{O_2} + \frac{2 \cdot 22,4 \cdot \varphi_{\delta}}{18000} + 2,077 \cdot \frac{V_{ne}}{F_{\delta}}},$$

$$\text{где } \delta = \frac{100 \cdot V_{ne}}{V_{ne} + F_{\delta} \cdot (1 - 0,00124 \cdot \varphi_{\delta})}; \quad \varphi_{\delta} = 10 + \frac{V_n \cdot 10^6}{60 \cdot F_{\delta}};$$

$$F_{\delta} = V_{\delta} - \frac{12500}{\sqrt{630}} \cdot \sqrt{\Delta P_{\Sigma}} \cdot \sqrt{\frac{(P_{20} + 1,027) \cdot (160 + 273)}{(T_{20} + 273) \cdot (4,3 + 1,027)}};$$

$T_{гд}$  – температура горячего дутья, °С;

$\omega_{O_2}$  – содержание кислорода в дутье, %;

$\varphi_{\delta}$  – влажность дутья, г/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{шг}}$  – расход природного газа, м<sup>3</sup>/час;

$F_{\text{д}}$  – приведенный к нормальным условиям расход дутья, м<sup>3</sup>/час;

$V_{\text{п}}$  – расход пара на увлажнение дутья, т/час;

$V_{\text{л}}$  – расход холодного дутья, м<sup>3</sup>/час;

$\Delta P_{\Sigma}$  – суммарный перепад давления, атм;

$P_{\text{гд}}$  – давление горячего дутья, атм.

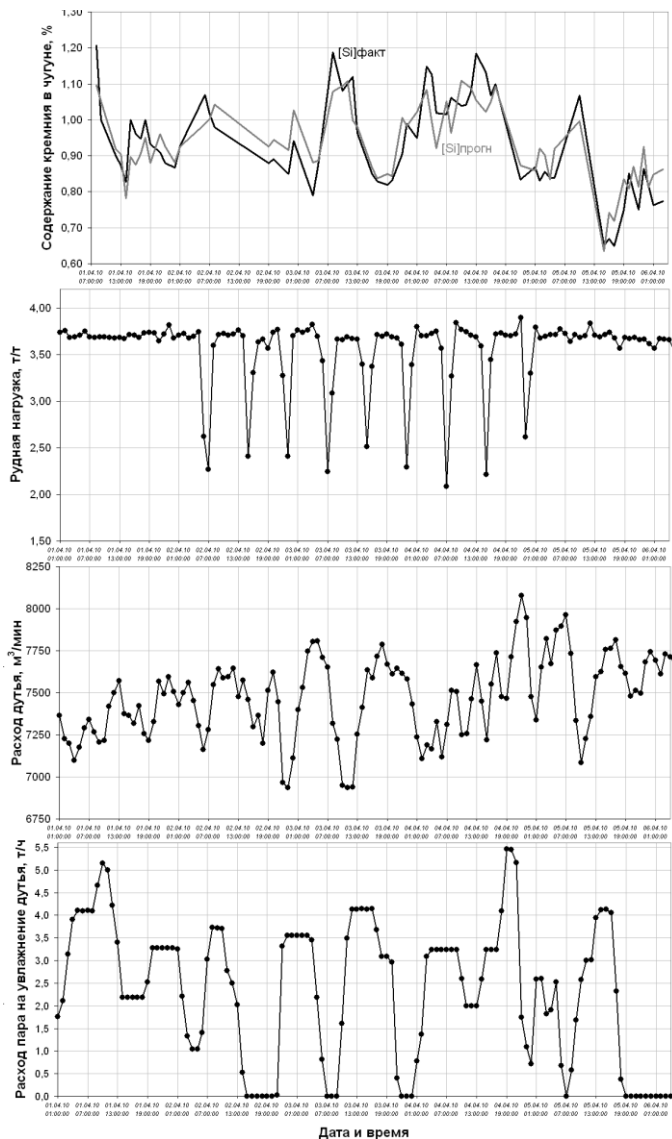
В качестве примера реализации способа на рис. 6.4 представлены графики изменения фактических и прогнозных значений содержания кремния в чугуна, а также рудной нагрузки, расхода дутья и количества пара, подаваемого на увлажнение дутья, для периода VIII работы печи при характерных для него дутьевых и шихтовых условий плавки, приведенных в табл. 6.1. График, приведенный на рис. 6.4, иллюстрирует изменение «невязки» прогнозируемого содержания кремния с фактическим его значением. Как следует из рис. 6.4, отклонение прогнозного значения содержания кремния отличается от фактических его значений, в среднем, на  $\pm 18,02\%$ .

Таблица 6.2

**Весовые коэффициенты уравнения регрессии, описывающего зависимость величины прогнозного содержания кремния в чугуна от технологических параметров плавки**

Весовой коэффициент	Соответствующий весовому коэффициенту регрессор	Размерность	Значения коэффициентов
<i>j</i>	константа	—/—	0,5386
<i>a</i>	$V^{II}$	м/мин	-11,9438
<i>b</i>	$T_f$	°С	0,0004
<i>c</i>	$[Si_{тек}]$	%	0,8309
<i>d</i>	$(V^{II})^2$	(м/мин) <sup>2</sup>	40,6219
<i>e</i>	$[Si_{тек}]^2$	% <sup>2</sup>	-0,1611
<i>f</i>	$(PH_{тек-6ч})$	т/т	-0,0302
<i>g</i>	$(PH_{тек-3ч})$	т/т	-0,0296
<i>h</i>	$Q_{пара}$	т/ч	-0,0294
<i>i</i>	$[Si_{тек-3ч}]$	%	0,0325

С целью увеличения достоверности прогнозирования содержания кремния в чугуна, выполнены исследования, направленные на учет инерционности теплового состояния печи. Исследования инерционности теплового состояния доменного процесса проведены на основе анализа взаимно корреляционных функций содержания кремния в чугуна на выпусках, скоростей опускания поверхности шихтовых материалов, рудных нагрузок и влажности дутья. Статистический анализ показал, что максимальная теснота корреляционной связи содержания кремния в чугуна с перечисленными параметрами имеет место при различном времени сдвига ( $t_{сдвиг}$ ). Время сдвига может быть определено по положению экстремума взаимно корреляционных функций (ВКНЦ-функций) и определяется интенсивностью ведения процесса.



**Рис. 6.4.** Изменение прогнозируемых и фактических значений содержания кремния в чугуне на выпусках, рудных нагрузок, расхода дутья и расхода пара, подаваемого на увлажнение дутья

На рис. 6.5 для семи исследуемых периодов работы печи продолжительностью – сутки представлены ВКНЦ-функции содержания кремния в чугуна и скорости опускания шихты в осевой зоне печи. Значение ординаты ВКНЦ-функции представляет коэффициент линейной корреляции между исследуемыми величинами, а абсцисса соответствует времени сдвига между ними. Как следует из представленных на рисунке графиков, величина  $t_{\text{сдвиг}}$ , характеризующаяся максимальным коэффициентом корреляции по абсолютной величине между содержанием кремния в чугуна и скоростью опускания шихты, изменяется от 2 до 8 часов, что вызвано различным временем пребывания шихты в печи.

Аналогичные исследования выполнены по определению величины времени между определением среднечасовых рудных нагрузок и среднечасовым содержанием кремния в чугуна на выпуске, а также между среднечасовой влажностью дутья и среднечасовым содержанием кремния в чугуна. На рис. 6.6 представлены ВКНЦ-функции содержания кремния в чугуна и среднечасовой рудной нагрузки, а на рис. 6.7 – ВКНЦ-функции содержания кремния в чугуна и среднечасовой влажности дутья для исследуемых периодов работы печи. Как следует из представленных на рисунке графиков, величина  $t_{\text{сдвиг}}$  изменяется от 4 до 8 часов для рудной нагрузки, что, как и для скорости опускания шихты, вызвано различным временем пребывания шихты в печи, и от 1 до 4 часов для влажности дутья, что объясняется большей, по сравнению с рудной нагрузкой, оперативностью воздействия на тепловое состояние низа печи изменением влажности дутья путем подачи пара для его увлажнения.

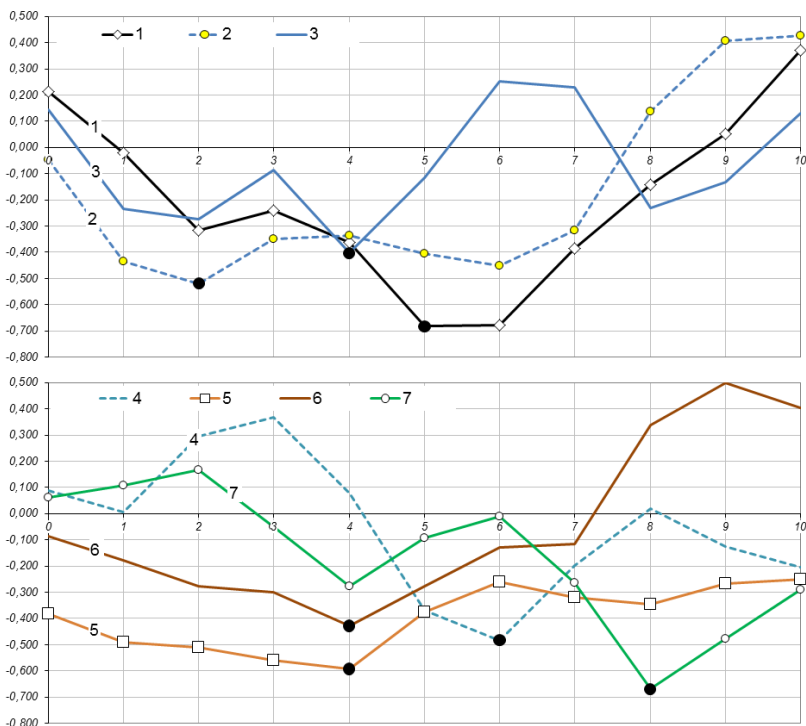
Установленные особенности учета инерционности доменного процесса явились основанием для дальнейшего усовершенствования способа прогнозирования содержания кремния в чугуна, что было реализовано включением в уравнение регрессии значений параметров со сдвигами во времени для каждого конкретного периода работы печи.

Прогнозируемое содержание кремния в чугуна может быть определено в соответствии с регрессионным выражением:

$$[\text{Si}]_{\text{прогн}} = a \cdot V_i^{\text{II}} + b \cdot T_f + c \cdot [\text{Si}]_{\text{тек}} + d \cdot (\text{PH}_j) + e \cdot Q_{\text{пк}} + f, (6.1.2)$$

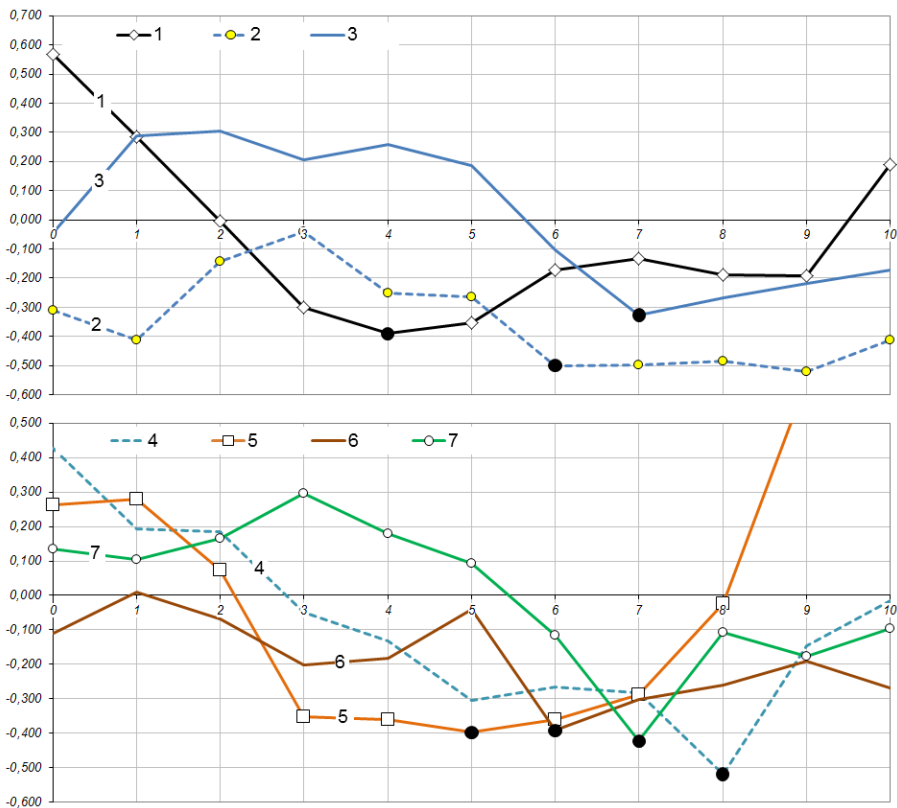
( $r_{x,y}=0,810$ ),

где  $a, b, c, d, e, f$  – весовые коэффициенты, значения которых определяются технологическими условиями плавки;

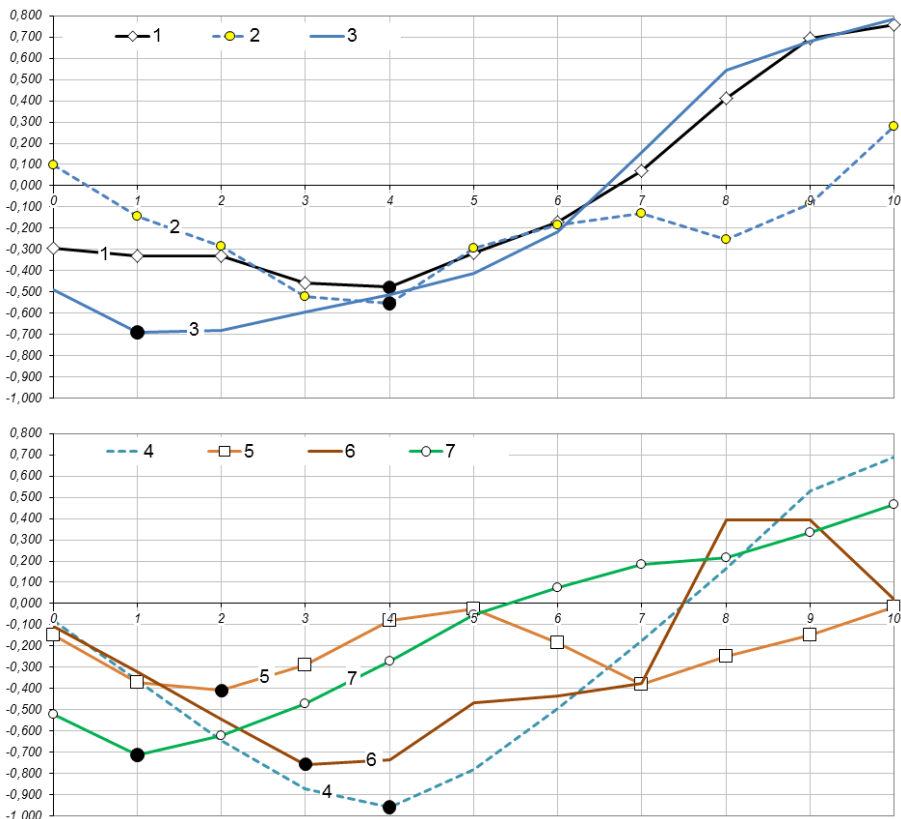


Период	$r_{sl,v}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$V_{ш}^L$ , м/мин	$V_{ш}^{CP}$ , м/мин
1		0,214	-0,020	-0,316	-0,241	-0,362	<b>-0,683</b>	-0,678	-0,385	-0,142	0,051	0,372	<b>0,087</b>	<b>0,041</b>
2		-0,048	-0,435	<b>-0,519</b>	-0,349	-0,335	-0,406	-0,450	-0,317	0,137	0,407	0,427	<b>0,082</b>	<b>0,042</b>
3		0,144	-0,234	-0,273	-0,086	<b>-0,402</b>	-0,115	0,252	0,228	-0,230	-0,132	0,131	<b>0,080</b>	<b>0,042</b>
4		0,087	0,007	0,296	0,367	0,079	-0,370	<b>-0,483</b>	-0,200	0,020	-0,127	-0,205	<b>0,103</b>	<b>0,059</b>
5		-0,381	-0,491	-0,512	-0,559	<b>-0,592</b>	-0,377	-0,260	-0,320	-0,344	-0,267	-0,251	<b>0,120</b>	<b>0,065</b>
6		-0,087	-0,177	-0,276	-0,301	<b>-0,428</b>	-0,278	-0,130	-0,114	0,340	0,499	0,405	<b>0,099</b>	<b>0,056</b>
7		0,062	0,107	0,167	-0,051	-0,275	-0,094	-0,010	-0,264	<b>-0,670</b>	-0,478	-0,290	<b>0,099</b>	<b>0,056</b>

Рис. 6.5. Взаимно корреляционные функции содержания кремния в чугуне и скорости опускания шихты в осевой зоне печи для семи периодов работы печи



**Рис. 6.6.** Взаимно корреляционные функции содержания кремния в чугуна и средней рудной нагрузке для семи периодов работы печи



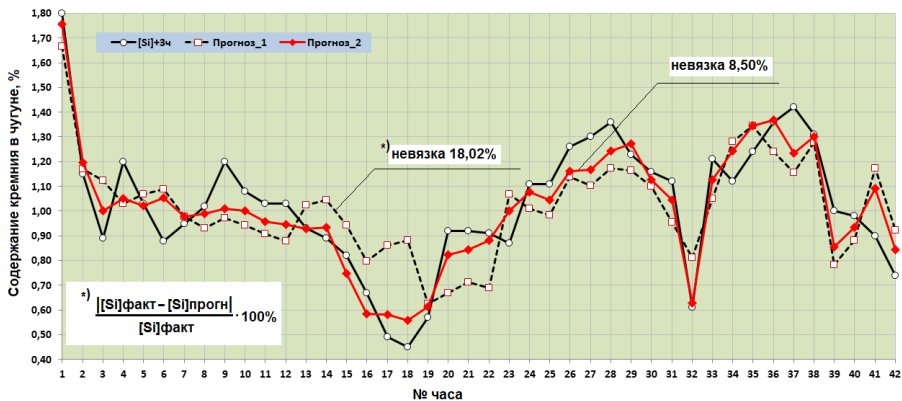
**Рис. 6.7.** Взаимно корреляционные функции содержания кремния в чугуна и влажности дутья для семи периодов работы печи

$V_i$ ,  $PH_j$ ,  $Q_{пк}$  – скорость опускания поверхности шихтовых материалов в осевой зоне колошника, средняя рудная нагрузка и содержание пара в дутье, значения которых соответствуют максимальным коэффициентам корреляции с текущим содержанием кремния в чугуна на основании построения взаимно корреляционных функций.

Временные сдвиги, соответствующие максимальным коэффициентам корреляции параметров  $V_i$ ,  $PH_j$ ,  $Q_{пк}$  с текущим содержанием кремния в чугуна, составляют – 3-8 часов, 4-8 часов и 0-4 часа для  $V_i$ ,  $PH_j$  и  $Q_{пк}$ , соответственно.



Как показали результаты регрессионного анализа, при использовании в качестве регрессоров технологических параметров согласно выражению 6.1.2, величина невязки прогнозной и фактической величин содержания кремния, определяемая по выражению  $\Delta = \frac{[Si]_{\text{факт}} - [Si]_{\text{прогн}}}{[Si]_{\text{факт}}} \cdot 100\%$ , составила 18,02%, при коэффициенте корреляции  $r_{x,y}=0,715$ . При использовании в качестве регрессоров технологических параметров с соответствующими значениями времени сдвига, согласно ВКНЦ-функциям рассматриваемых параметров, величина невязки составила 8,50%, коэффициент корреляции –  $r_{x,y}=0,810$ . График изменения фактического содержания кремния в чугуна (на рис. обозначен [Si]+3ч) и прогнозных его значений, полученных в соответствии с выражением 6.1.1 (на рис. обозначен Прогноз\_1) и выражением 6.1.2 (на рис. – Прогноз\_2), приведен на рис. 6.8. Довольно высокая степень связи между прогнозируемыми и фактическими значениями содержания кремния в чугуна позволяет использовать предложенное выражение (6.1.2) в качестве основы алгоритма прогнозирования содержания кремния в чугуна.



**Рис. 6.8.** Изменение фактического и прогнозных величин содержания кремния в чугуна

Прогноз содержания кремния в чугуна с помощью предложенного алгоритма осложняется изменчивостью связей как между содержанием кремния в чугуна и параметрами процесса, так и между отдельными параметрами процесса. Одной из основных причин этого является нестабильность качества и состава шихтовых материалов. Во избежание влияния этой нестабильности

на достоверность прогноза содержания кремния в чугуне с помощью предложенного регрессионного выражения (4.4) необходимой стадией является уточнение коэффициентов регрессоров на основе исходных данных более коротких реализаций, продолжительность которых определяется, например, колебаниями состава шихты. Рассчитанные таким образом коэффициенты регрессии могут быть названы «бегущими».

Таким образом, получил развитие способ прогнозирования содержания кремния в чугуне за 3 часа до его выпуска. Согласно усовершенствованному способу, прогноз содержания кремния в чугуне осуществляется с помощью регрессионного выражения, в котором, помимо теоретической температуры, в качестве регрессоров выступают скорость опускания поверхности шихтовых материалов в осевой зоне колошника, средняя рудная нагрузка и содержание пара в дутье, значения которых определяются с учетом времени сдвига этих параметров, определяемого по максимальному значению коэффициентов корреляции с текущим содержанием кремния, получаемых путем построения взаимно корреляционных функций.

На основе усовершенствованного способа прогнозирования содержания кремния в чугуне за 3 часа до его выпуска разработано программное обеспечение и алгоритм реализации в составе АСУ ДП №9, а также инструкция пользователя САК «Прогнозирование и регулирование содержания кремния в чугуне на выпусках». Видеокадры способа прогнозирования содержания кремния в чугуне представлены на рис.6.9 и 6.10.

## **6.2 Метод оценки газодинамического режима плавки с использованием информации радиолокационного профилемера**

### **6.2.1 Способ оценки стабильности опускания шихты на колошнике печи**

Высокие показатели доменной плавки могут быть обеспечены при рациональном распределении газового потока в столбе шихтовых материалов, способствующему равномерному опусканию материалов в шахте доменной печи. Ровный ход печи является признаком нормальной ее работы, главной составляющей которого является стабильное и устойчивое опускание шихты с неодинаковой, но постоянной (стабильной) скоростью в различных сечениях колошника [81, 97, 155, 156]. Постоянный контроль

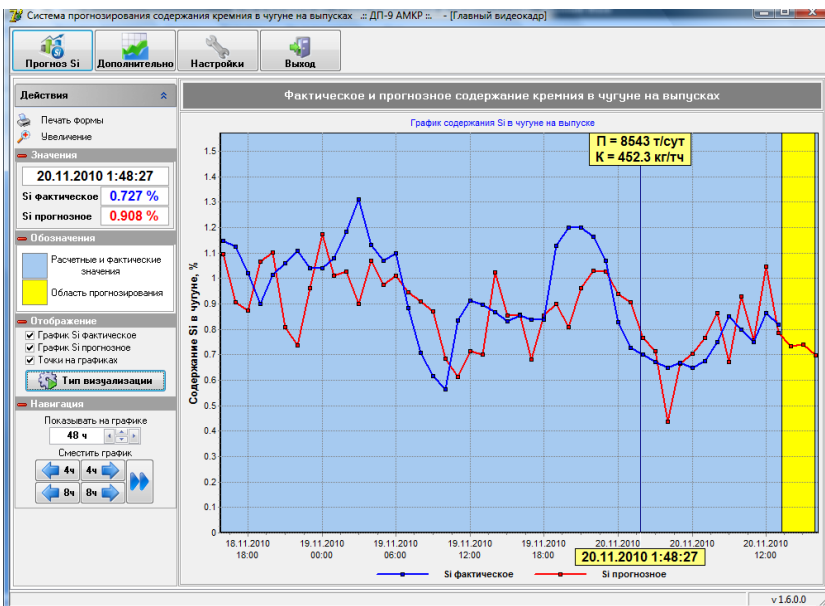


Рис. 6.9. Видеокادر «Фактическое и прогнозное содержание кремния в чугуне на выпусках»

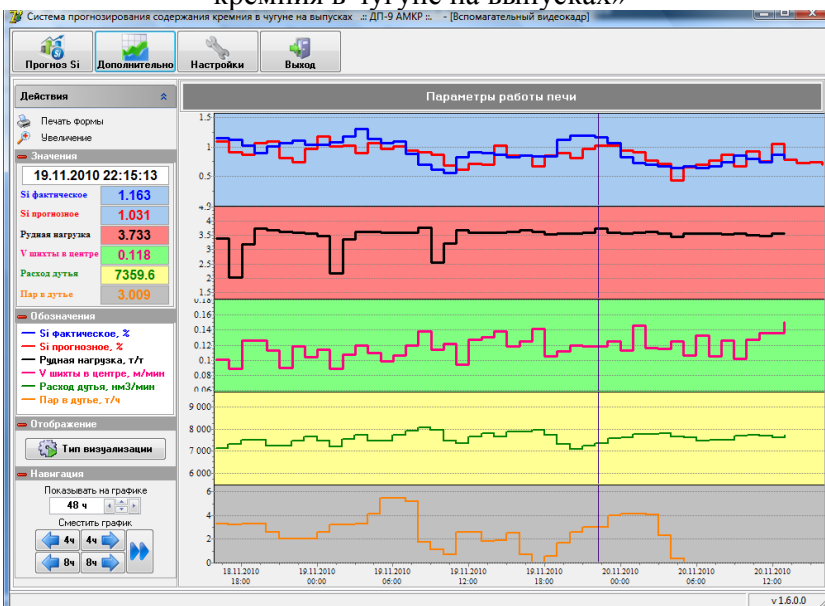


Рис. 6.10. Видеокادر «Параметры работы печи»

технологического персонала за сходом шихты в печи и своевременное принятие мер воздействия на него является действенным способом сохранения ровного хода работы печи с высокими технико-экономическими показателями плавки. Известно, что стабильность опускания шихты по сечению печи определяется различной степенью влияния следующих факторов: дутьевого режима, плавления шихты, связанного с химическими и физическими свойствами шихтовых материалов, распределения их и формирования газового потока по сечению печи, состояния профиля печи, выпуска продуктов плавки и т.д. Поэтому скорость опускания шихты в различных сечениях колошника и ее колеблемость во времени отражают суммарное воздействие всех вышеуказанных факторов на стабильность схода шихты по сечению печи и могут быть использованы для определения степени ровности хода печи, выраженной в виде коэффициентов нестабильности опускания шихты в отдельных зонах и по всему сечению колошника.

В ходе исследований, выполненных на доменной печи объемом 2002 м<sup>3</sup> АК «Тулачермет» в период освоения на ней радиоизотопного профилемера РИАП [67], разработан способ оценки ровности хода печи по «плавности» опускания шихты в отдельных кольцевых зонах и всему сечению колошника. При этом сечение колошника разбивалось на равновеликие кольцевые зоны, на границах которых по данным профилемера определялись скорости опускания шихты. Как было показано ранее [102], одним из недостатков сканирующих профиломеров является то, что измерение ими расстояния до поверхности засыпи шихты по радиусу колошника осуществляется не одновременно и, поэтому расчет скоростей опускания шихты с использованием их информации, является не вполне корректным. В отличие от сканирующих профиломеров, стационарно установленные датчики радиолокационной системы измерения профиля засыпи позволяют одновременно определять изменения уровней засыпи по сечениям колошника и рассчитывать значения скоростей опускания шихты в четырех кольцевых зонах сечения колошника, на основе которых может быть осуществлена оценка ровности хода печи.

Приведенный в работе [67] способ оценки «плавности» опускания шихты был усовершенствован и адаптирован к условиям использования на доменных печах стационарных систем измерения профиля поверхности засыпи шихты и особенностям измерения ими профиля поверхности засыпи шихты. Оценка изменения колеблемости скорости опускания шихты на колошнике

осуществляется по величине среднеквадратичного отклонения ( $\sigma_n$  – СКО) скоростей в различных зонах колошника и по всему его сечению после выгрузки каждой порции шихтовых материалов, образующих цикл загрузки. На основе рассчитанных средних за цикл в каждой кольцевой зоне значений –  $\sigma_m^{V_{ш.п.ф.л.п.п.ц}}$  и по сечению колошника –  $\sigma_m^{V_{ш.п.ф-ц}}$  определяются коэффициенты нестабильности опускания шихты на уровне колошника для каждой зоны из выражения:

$$K_{3m} = \left| 1 - \frac{\sigma_{cp}^{V_{3m}}}{\sigma_{cp}^{V_k}} \right| \quad (6.2.1)$$

и всего сечения колошника:

$$K_k = \frac{\sum^m K_{3m}}{m}, \quad (6.2.2)$$

где  $K_{3m}$  – коэффициент нестабильности опускания шихты в кольцевой зоне сечения колошника, ед.;

$K_k$  – коэффициент нестабильности опускания шихты по всему сечению колошника, ед.;

$m$  – количество зон колошника;

$\sigma_{cp}^{V_{3m}}$  – среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты в кольцевой зоне за цикл загрузки, м/мин;

$\sigma_{cp}^{V_k}$  – среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты по сечению колошника за цикл загрузки, м/мин.

Среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты в кольцевой зоне  $\sigma_{cp}^{V_{3m}}$  рассчитывается в соответствии с выражением:

$$\sigma_{cp}^{V_{3m}} = \frac{\sum^i \sigma_{3mi}}{i}, \quad (6.2.3)$$

$$\text{где } \sigma_{3m} = \sqrt{\frac{\sum (V_{3m} - V_{3m}^{cp})^2}{i-1}}; \quad (6.2.4)$$

$i$  – количество порций в цикле загрузки;

$V_{zm}$  – скорость опускания шихты в кольцевой зоне сечения колошника после выгрузки каждой порции цикла загрузки, м/мин;

$V_{zm}^{cp}$  – средняя скорость опускания шихты в кольцевой зоне сечения колошника за цикл загрузки, м/мин.

Среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты по сечению колошника  $\sigma_{cp}^{V_k}$  рассчитывается в соответствии с выражением:

$$\sigma_{cp}^{V_k} = \frac{\sum_{i=1}^i \sigma_{ki}}{i}, \quad (6.2.5)$$

$$\text{где } \sigma_{ki} = \sqrt{\frac{\sum (V_k - V_k^{cp})^2}{i-1}} \quad (6.2.6)$$

$V_k$  – скорость опускания шихты по сечению колошника после выгрузки каждой порции цикла загрузки, м/мин;

$V_k^{cp}$  – средняя скорость опускания шихты по сечению колошника за цикл загрузки, м/мин.

Уменьшение величины коэффициентов  $K_{zm}$ ,  $K_k$  и выполнение условия  $K_{zm}, K_k \rightarrow \min$  указывает на уменьшение степени нестабильности опускания шихты в отдельных зонах и по всему сечению колошника для конкретных условий плавки.

### 6.2.2 Оценка взаимосвязи газодинамического режима плавки и коэффициентов нестабильности опускания поверхности шихты на колошнике доменной печи

Для оценки газодинамического режима работы доменной печи использована величина выхода колошникового газа на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника ( $S_k$ ) при установленном давлении колошникового газа ( $P_k$ ) –  $V_{кг}^{SkPk}$ . Показатель  $V_{кг}^{SkPk}$  характеризует соотношение между расходом, составом комбинированного дутья и давлением газа под колошником. Выход колошникового газа вычисляется в соответствии с выражением [157]:

$$V_{кг} = \frac{Q \cdot (1 - \omega)}{N_2}, \quad (6.2.7)$$

где  $Q$  – расход дутья, нм<sup>3</sup>/мин;

$\omega$  – содержание кислорода в дутье, доли ед.;

$N_2$  – содержание азота в колошниковом газе, доли ед.

Показатель  $V_{кз}^{SkPk}$  определяется из выражения:

$$V_{кз}^{SkPk} = \frac{V_{кз}}{S_k \cdot (P_k + 1)}, \text{ нм}^3 / \text{мин} \cdot \text{м}^2, \quad (6.2.8)$$

где  $S_k$  – сечение колошника печи,  $\text{м}^2$ ;

$P_k$  – давление колошниковога газа, ата.

По опытным данным [157], оптимальные газодинамические условия в шахте доменной печи, при которых выравнивается газораспределение по сечению печи (увеличивается количество и восстановительная способность газа, проходящего через «гребень» рудных материалов), а также сохраняется устойчивость слоя шихты на колошнике (исключается переход шихты во взвешенное состояние) достигаются при скорости газа 0,8–0,9 м/с на полное сечение колошника и обеспечиваются фактическим расходом газа  $V_{кз}^{SkPk} = 48\text{--}55 \text{ нм}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника при установленном давлении колошниковога газа  $P_k$ .

Как показано в работе [157] при изменении параметров дутьевого режима плавки давление под колошником  $P_k$  необходимо устанавливать в соответствии с выражением:

$$P_k = \frac{q \cdot (1 - \omega)}{(48 - 50) \cdot N_2}, \quad (6.2.9)$$

где  $q$  – расход дутья на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника,  $\text{нм}^3/\text{мин} \cdot \text{м}^2$ ;

$P_k$  – давление колошниковога газа, ати;

48–50 – норма выхода (оптимальное количество) колошниковога газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника при установленном давлении колошниковога газа,  $\text{нм}^3/\text{мин}$ .

При этом, как следует из данных исследований, выполненных на ДП №9 и приведенных в работах [157–159], работа печи с оптимальным газодинамическим режимом в шахте характеризовалась улучшением технико-экономических показателей плавки, в частности, уменьшением расхода кокса на выплавку чугуна.

Задачей настоящих исследований являлось установление возможности использования для оценки газодинамического режима плавки коэффициентов неустойчивости опускания шихты в отдельных зонах и по всему сечению колошника. Для этого, изменение коэффициентов неустойчивости опускания шихты в печи, определенных по колеблемости скоростей опускания шихтовых материалов в различных сечениях колошника и рассчитанных на основе данных радиолокационного профилемера при изменяющихся параметрах работы печи, в частности, режима загрузки, и различных соотношениях расхода, состава

комбинированного дутья и давления колошникового газа, сопоставлялись с изменением регламентированного Технологической инструкцией ТИ 228-Д2-44-2001 по ведению доменной плавки на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» показателя газодинамического режима плавки.

Выполненные исследования были направлены также на уточнение величины нормы выхода колошникового газа. Ограниченная диапазоном  $48\text{--}50 \text{ м}^3/\text{мин}\cdot\text{м}^2$  рациональная величина нормы выхода колошникового газа [157] была установлена и предложена для существовавших ранее сырьевых условий и технологических параметров доменной плавки и не сопоставлялась с изменением состояния поверхности засыпи шихты на колошнике и ровностью ее опускания в ходе плавки при различных режимах загрузки.

Оценка хода печи с использованием коэффициентов нестабильности опускания шихты на колошнике, рассчитанных в соответствии со способом оценки ровности хода печи, адаптированной к условиям контроля профиля поверхности засыпи шихты с помощью стационарных систем измерения, была выполнена для двух периодов работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» – I-й период характеризовал работу печи в течение 14 и 15.01.2008 г.; II-ой – 17, 18, 23–25, 27–31.05.2008 г. Причем, в I-ом и II-ом периодах печь работала с близкими программами загрузки (табл. 6.3 и 6.4). Величина средней рудной нагрузки за цикл подач в указанные периоды изменялась от 3,09 до 3,65 т/т кокса при массе рудной части подачи – 102,4–106,7 т.

В исследуемые периоды ДП №9 работала с основными параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки, изменяющимися в следующих пределах: расход дутья 7510–8463  $\text{м}^3/\text{мин}$ ; температура дутья 1023–1119 °С; давление дутья 2,99–3,68 ати; доля кислорода в дутье 26,0–28,3 %; расход природного газа 494–573  $\text{м}^3/\text{мин}$ . Давление колошникового газа 1,14–1,70 ати, при верхнем и нижнем перепадах, соответственно, 0,32–0,45 ати и 1,39–1,52 ати. Теоретическая температура горения изменялась в пределах 2091–2274 °С.

Для этих периодов в трех кольцевых зонах сечения колошника (1П–периферийно-промежуточная, 2П–промежуточно-центральная, Ц – центральная) были рассчитаны скорости опускания шихты и определены коэффициенты нестабильности опускания шихты в этих зонах –  $K_3$  и по всему сечению колошника –  $K_k$ , а также параметры газодинамического режима работы печи.



Таблица 6.3

**Программа загрузки и распределение шихтовых материалов по позициям лотка БЗУ ДП №9 в I-ом периоде**

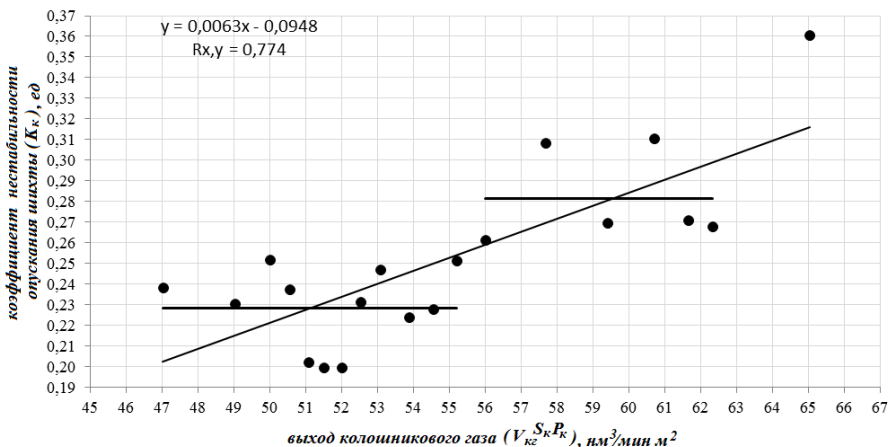
№ порции	Наименование порции	Распределение масс по позициям лотка БЗУ, %								Масса порции, т	
		9	8	7	6	5	4	3	2		1
1, 11	КСкр 8-4		12	20	22	23	23				21,78
2, 12	АО 9-3	18	25	17	11	9	17	4			105,94
3, 13	КСкр 8-4		15	18	21	22	23				21,58
4, 14	АО 9-3	18	27	17	11	9	17	2			104,75
5, 15	К 2-1								22	78	13,77
6, 16	КСкр 8-4		11	20	21	22	27				22,59
7, 17	АО 9-3	18	25	17	10	9	18	4			104,14
8, 18	КСкр 8-4		14	19	21	22	24				21,56
9, 19	АО 9-3	18	27	17	12	9	15	2			105,02
10, 20	К 2-1								22	78	13,47

Таблица 6.4

**Программа загрузки и распределение шихтовых материалов по позициям лотка БЗУ ДП №9 во II-м периоде**

№ порции	Наименование порции	Распределение масс по позициям лотка БЗУ, %								Масса порции, т	
		9	8	7	6	5	4	3	2		1
1	КСкр 8-4		13	22	23	23	19				24,35
2	АО 9-3	16	27	16	11	10	17	2			106,29
3	КСкр 8-4		14	22	22	23	19				24,05
4	АО 9-3	15	28	16	11	10	18	3			106,66
5	КСкр 8-4		13	22	23	23	19				24,44
6	КБр 2-1								22	78	15,44
7	АО 9-3	16	27	17	10	10	18	2			104,38
8	КСкр 8-4		14	22	21	23	20				24,23
9	АО 9-3	15	27	17	12	10	16	3			105,21
10	К 2-1								22	78	12,20
11	КСкр 8-4		13	23	23	23	19				24,27
12	АО 9-3	16	28	16	11	10	17	2			106,08
13	КСкр 8-4		14	22	22	23	19				24,44
14	АО 9-3	15	27	16	11	10	18	3			105,99
15	КБр 2-1								22	78	15,69
16	КСкр 8-4		12	23	22	23	20				24,12
17	АО 9-3	16	27	16	10	10	18	2			102,36
18	КСкр 8-4		14	23	21	23	20				24,47
19	АО 9-3	15	28	16	12	10	16	3			106,58
20	К 2-1								23	77	12,73

На основе полученных данных установлены взаимосвязи коэффициентов неустойчивости опускания шихтовых материалов по сечению колошника –  $K_k$ , а также в кольцевых зонах ( $K_{1П}$ ,  $K_{2П}$  и  $K_{Ц}$ ) его сечения и величины выхода колошниковога газа на единицу площади колошника –  $V_{кг}^{SkPk}$  в диапазонах ее изменения 53–60 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup>, что иллюстрируют приведенный на рис. 6.11 график. Из анализа графика следует, что для I и II периодов работы печи со средними значениями параметров состояния поверхности засыпи, радиального распределения материалов и газового потока, приведенными в табл. 6.5, наиболее плавное опускание шихтовых материалов с коэффициентом неустойчивости  $K_k$ , изменяющимся в пределах 0,20–0,25 ед. (рис. 6.11), соответствует изменению величины выхода колошниковога газа на единицу площади колошника в пределах от 47 до 55 м<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>2</sup>. Уменьшение плавности опускания шихты по всему сечению колошника в ходе плавки, характеризуемое увеличением коэффициента неустойчивости  $K_k$  от 0,20–0,25 ед. до 0,27–0,31 ед., отмечалось при увеличении выхода колошниковога газа на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника до 62 нм<sup>3</sup>/мин, что согласно данным [157], связано с неустойчивостью слоя шихты при переходе его во взвешенное состояние.



**Рис. 6.11.** Изменение коэффициентов неустойчивости опускания поверхности шихтовых материалов на колошнике ( $K_k$ ) в зависимости от величины выхода колошниковога газа на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника ( $V_{кг}^{SkPk}$ ) при установленном давлении под колошником для ДП №9

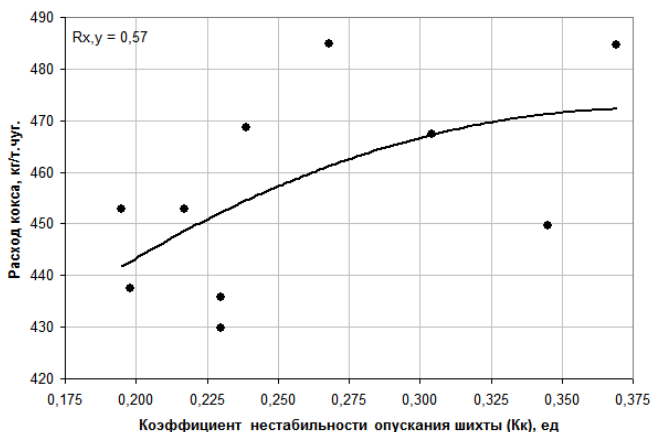
Таблица 6.5

**Параметры и показатели состояния поверхности засыпи шихты на колошнике и радиального распределения шихты и газового потока в ДП №9 для периодов ее работы 14-15.01.2008 и 17-31.05.2008**

№№ п.п.	Параметры, показатели	Зоны сечения колошника				Примеч.
		1П	2П	Ц	Средн. (1П-Ц)	
1.	Показания радиолокационного профилера: Уровень засыпи перед выгрузкой порций ( $H_{\text{вск}}$ ), знаменатель-среднее значение за цикл загрузки, м	0,95 (0,77)	1,19 (0,96)	1,57 (1,27)	1,24 (1,0)	-
2.	Скорость опускания поверхности засыпи шихты на колошнике, знаменатель - средние значения за цикл загрузки ( $U_{\text{ш}}$ ), м/мин.	0,083 (0,93)	0,088 (0,99)	0,095 (1,08)	0,089 (1,0)	-
3.	Результаты моделирования: Рудная нагрузка ( $M_{\text{жсв}}/M_r$ ), т/т, знаменатель – доля от $\text{PH}_{\text{общ}}^{\text{ср}}$	3,63 (1,02)	3,43 (0,97)	1,69 (0,47)	-	$\text{PH}_{\text{общ}}^{\text{ср}} = 3,56 \text{ т/т}$
4.	Результаты отбора проб радиального газа: Доля $\text{CO}_2$ в газе, %, знаменатель – доля от $\text{CO}_2^{\text{ср}}$	21,5 (1,09)	20,8 (1,05)	7,2 (0,36)	-	$\text{CO}_2^{\text{ср}} = 19,8\%$
5.	Степень использования CO ( $\eta_{\text{CO}}$ ), %, знаменатель – доля от $\eta_{\text{CO}_p}^{\text{ср}}$	43,8 (1,08)	42,2 (1,04)	14,3 (0,35)	-	$\eta_{\text{CO}_p}^{\text{ср}} = 40,4\%$

*1П, 2П и Ц – периферийно-промежуточная (1,6-2,9 м от стенки колошника), промежуточно-центральная (2,9-4,5 м) и центральная (4,5-5,4 м) зоны сечения колошника.*

Влияние стабильности опускания шихтовых материалов по сечению колошника на технико-экономические показатели работы печи в исследуемые периоды может быть оценено по изменению величины расхода кокса на тонну выплавленного чугуна. Анализ приведенного на рис. 6.13 графика изменения расхода кокса и коэффициентов нестабильности опускания шихтовых материалов показал, что улучшение стабильности опускания шихтовых материалов в доменной печи, характеризуемое уменьшением величины коэффициентов нестабильности, сопровождается уменьшением расхода кокса на выплавку чугуна. Возможность оперативной оценки нестабильности опускания поверхности шихтовых материалов с помощью профилера позволяет более полно раскрыть механизм образования экстремумов, характерных для известной и изучаемой длительное время на доменных печах связи «интенсивность – производительность – расход кокса» [160–163]. Оперативное выявление этой связи с помощью профилера позволяет повысить эффективность управляющих воздействий.



**Рис. 6.13.** Изменение удельного расхода кокса в зависимости от коэффициентов неустойчивости опускания шихтовых материалов ( $K_k$ )

Оценка взаимосвязи коэффициентов неустойчивости опускания шихтовых материалов в различных зонах сечения колошника, показала, что с помощью предложенного метода могут быть определены значения нормы выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника, обеспечивающие рациональный газодинамический режим плавки и максимальную стабильность опускания шихты по сечению печи. Это позволит уточнить и внести изменения в технологическую инструкцию ведения плавки на ДП №9, в которой величина нормы выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника зафиксирована в диапазоне 48–50  $\text{м}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$  [157] и не предусматривает оценки взаимосвязи газодинамического режима плавки и изменений распределения шихтовых материалов по сечению колошника при используемых программах загрузки печи.

По данным выполненных исследований, разработан метод оценки газодинамического режима работы печи с использованием информации радиолокационного профилемера [18, 164], включающий:

1. Определение коэффициентов неустойчивости опускания шихты на уровне колошника для каждой зоны и всего сечения колошника для выбранного интервала времени работы печи при постоянных сырьевых условиях и программах загрузки шихты в

соответствии с выражениями (6.2.1) и (6.2.2).

2. Установление нормы выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника для условий плавки, при которых достигается наиболее стабильный сход шихты, характеризующийся минимальными значениями коэффициентов нестабильности ее опускания в каждой зоне сечения колошника.

3. По изменению коэффициентов нестабильности опускания шихты в сторону их уменьшения или увеличения при выбранных технологических параметрах дутьевого режима и сопоставлению с величиной выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника, ограниченной установленным диапазоном допустимых ее значений, производится оценка отклонения ровности хода печи от нормального (характеризующегося стабильным опусканием шихтовых материалов с минимальными значениями коэффициентов нестабильности) с последующей корректировкой соотношения расхода, состава комбинированного дутья и давления газа под колошником с учетом изменений в распределении шихтовых материалов по сечению печи.

Предложенный метод оценки газодинамического режима плавки опробован в условиях работы ДП №9 и может быть реализован в составе АСУ доменных печей, оснащенных стационарными системами измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике.

### **6.3 Выбор метода оперативной оценки распределения материалов в зонах сечения колошника на основе данных профилемера**

Основным показателем, характеризующим распределение шихтовых материалов и газового потока по радиусу сечения колошника, является величина рудной нагрузки в равновеликих кольцевых зонах радиуса [1]. Значение рудной нагрузки определяется отношением масс железосодержащих компонентов и кокса. Масса выгруженных за цикл загрузки железосодержащих материалов и кокса определена программой загрузки, а распределение высот слоев зависит как от объема образованных слоев, так и насыпного веса выгружаемых материалов. Если первая составляющая масс – высота слоя материала может быть определена с помощью установленного на печи профилемера, т.к. объем выгруженного материала может быть выражен произведением  $h_i \cdot S_i$  ( $h_i$  – высота слоя,  $S_i$  – площадь зоны сечения колошника), то вторая – насыпной вес является неизвестной

величиной в связи с тем, что при выгрузке шихты распределителем загрузочного устройства шихта уплотняется и ее насыпной вес изменяется, кроме того, в зависимости от угла наклона лотка и профиля засыпи шихты.

Для оценки распределения материалов в зонах сечения колошника на основе данных, полученных с помощью профилемера, были опробованы несколько способов. Для оценки их достоверности, получаемые данные сопоставлялись с распределением доли  $\text{CO}_2$  в радиальном газе, которое является одним из основных технологических параметров, контролируемых в ходе плавки и характеризующих изменение радиального распределения шихты и газового потока в печи. По нему, в основном, осуществляется контроль и адаптация методов расчета и моделей оценки показателей радиального распределения шихтовых материалов.

Первый способ включает оценку распределения шихтовых материалов по сечению колошника на основе показателя, определяемого соотношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса, образованных за цикл загрузки. Основанием для этого явился анализ результатов исследований, выполненных на зарубежных доменных печах с использованием измерений профилемерами различных конструкций [122, 123]. В работе [123] с использованием данных о профиле поверхности засыпи шихты, рассчитывается толщина слоев, на основе которой определяется отношение высот слоев руда/кокс, являющееся характеристикой распределения материалов в цикле загрузки.

Результаты исследований использования отношения толщин слоев железосодержащих материалов и кокса в качестве показателя распределения по радиусу колошника печи, выполненных для трех периодов работы ДП №9 I – 14.01.2008 г., II – 15.01.2008 г. и III – 30.05.2008 г. (параметры и показатели работы печи приведены в табл. 6.6 и 6.7 и рис. 6.14) показали следующее. Коэффициенты корреляции функциональной взаимосвязи ( $Y=A+BX$ ) показателей распределения, рассчитанных по отношению высот слоев, определенных по показаниям профилемера и радиальным распределением  $\text{CO}_2$  в печи составили: для периода I – 0,947, II – 0,973 и III – -0,110.

Таблица 6.6

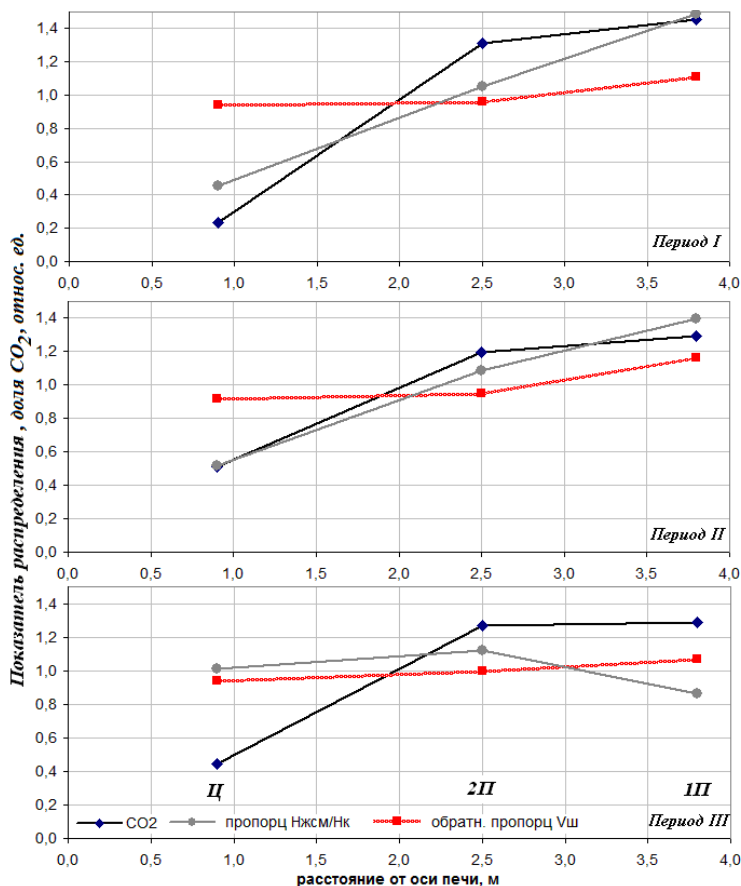
**Показатели дутьевого и газодинамического режимов работы ДП №9 для трех исследуемых периодов**

Параметры, показатели		I – 14.01.2008	II – 15.01.2008	III – 30.05.2008
Приведенный расход дутья	$F_{пр}, \text{м}^3/\text{мин}$	7912	8143	8337
Расход природного газа	$Q_{шт}, \text{м}^3/\text{мин}$	573	559	530
Содержание $O_2$ в холодном дутье	$[O_2], \%$	26,3	26,0	27,3
Температура горячего дутья	$T_{Гд}, ^\circ\text{C}$	1078	1042	1107
Давление горячего дутья	$P_{Гд}, \text{ати}$	3,60	3,68	2,99
Скорость дутья	$V_{д}, \text{м/с}$	197,2	193,2	228,4
Расход дутья на $1 \text{ м}^2$ колошника	$q, \text{м}^3/\text{мин}/\text{м}^2$	86,4	88,9	91,0
Выход колошниковога газа	$V_{кг} \text{ Им}^2 \text{ С}_к \text{ при } P_к$	50,52	50,40	62,39
Давление под колошником	$P_к, \text{ати}$	1,61	1,70	1,14
Перепад давления общий	$\Delta P_{общ}, \text{ати}$	1,96	1,95	1,83
Перепад давления верхний	$\Delta P_{в}, \text{ати}$	0,45	0,43	0,36
Перепад давления нижний	$\Delta P_{н}, \text{ати}$	1,51	1,52	1,47
Теоретическая температура	$T_f, ^\circ\text{C}$	2091	2092	2224
$V_{кг} S_{кPк}/PH_{общ}$	$\frac{\text{нм}^2 \cdot \text{мин}/\text{м}^2}{\text{т/т}}$	13,8	14,4	18,1

Таблица 6.7

**Показатели радиального распределения шихты и газового потока для трех исследуемых периодов работы ДП №9**

Параметры, показатели	Период работы печи											
	I – 14.01.2008			II – 15.01.2008			III – 30.05.2008					
Расстояние от оси печи, м	3,80	2,50	0,90	сп	3,80	2,50	0,90	сп	3,80	2,50	0,90	сп
Общая средняя рудная нагрузка, т/т	3,655				3,505				3,444			
Отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса, $N_{жк}/N_к$ , ед	0,986 1,490	0,692 1,055	0,302 0,455	<b>0,662</b> <b>1,000</b>	0,935 1,395	0,730 1,089	0,346 0,516	<b>0,670</b> <b>1,000</b>	0,78 0,866	1,01 1,122	0,91 1,013	<b>0,897</b> <b>1,000</b>
Рудные нагрузки, рассчитанные пропорционально $N_{жк}/N_к$ , т/т	5,444 1,490	3,856 1,055	1,665 0,455	<b>3,655</b> <b>1,000</b>	4,888 1,395	3,818 1,089	1,809 0,516	<b>3,505</b> <b>1,000</b>	2,981 0,866	3,863 1,122	3,488 1,013	<b>3,444</b> <b>1,000</b>
Скорости опускания шихты $V_{шт}$ , м/мин	0,080	0,092	0,094	<b>0,089</b>	0,053	0,065	0,067	<b>0,062</b>	0,084	0,090	0,096	<b>0,090</b>
Рудные нагрузки, рассчитанные обратно пропорционально $V_{шт}$ , т/т	4,051 1,108	3,522 0,964	3,447 0,943	<b>3,673</b> <b>1,005</b>	4,078 1,164	3,325 0,949	3,226 0,920	<b>3,543</b> <b>1,011</b>	3,690 1,071	3,444 1,000	3,229 0,938	<b>3,454</b> <b>1,003</b>
Объемная доля $CO_2$ в радиальном газе, %	20,34 1,453	18,37 1,312	3,29 0,235	<b>13,998</b> <b>1,000</b>	21,32 1,293	19,69 1,194	8,46 0,513	<b>16,491</b> <b>1,000</b>	21,63 1,289	21,23 1,266	7,47 0,445	<b>16,776</b> <b>1,000</b>
Рудные нагрузки, рассчитанные на модели РРП (ИЧМ), т/т	3,239 1,065	3,857 1,268	2,027 0,666	<b>3,041</b> <b>1,000</b>	3,045 1,044	3,561 1,221	2,142 0,735	<b>2,916</b> <b>1,000</b>	3,613 1,245	3,404 1,173	1,690 0,582	<b>2,902</b> <b>1,000</b>



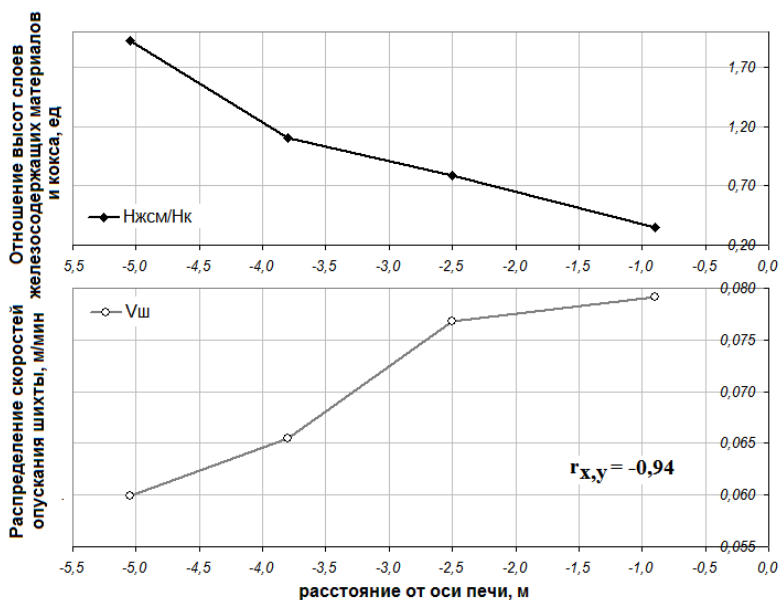
**Рис. 6.14.** Распределение показателей распределения и доли CO<sub>2</sub> в газе по радиусу колошника для трех исследуемых периодов работы ДП №9

Следует отметить, что отсутствие взаимосвязи показателей распределения, рассчитанных по отношению высот слоев, определенных по показаниям профилемера и радиальным распределением CO<sub>2</sub> в печи в третьем исследуемом периоде вызвано увеличением до 62,4 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup> величины выхода колошникового газа ( $V_{кр}^{SkPk}$ ) на 1 м<sup>2</sup> площади колошника ( $S_k$ ) при установленном давлении колошникового газа  $P_k$  и выходом ее за допустимый диапазон – 48–55 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup>, при котором достигается наиболее стабильный сход шихты. Таким образом, показано, что



этот способ оценки изменения показателей распределения по радиусу колошника применим при работе печи с указанной нормой выхода колошникового газа на единицу площади колошника при установленном  $P_k$ .

Во втором способе, обоснованием возможности расчета показателя радиального распределения материалов по изменению скоростей опускания шихтовых материалов в зонах, явилась установленная обратная связь отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса и скорости опускания шихты. Указанная зависимость ( $Y=A+Bx$ ), для которой коэффициент корреляции составил  $r_{x,y} = -0,94$ , была получена в результате анализа параметров состояния поверхности засыпи шихты на колошнике ДП №9 в течение двух суток при постоянной программе загрузки и близких параметрах дутьевого режима плавки (периоды I и II). При этом, величины отношений высот слоев и скоростей опускания шихты определялись в среднем за цикл загрузки печи (рис. 6.15).



**Рис. 6.15.** Изменение отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса и скоростей опускания шихты по радиусу колошника ДП №9

Таким образом, показатели распределения в каждой измеряемой зоне сечения колошника могут быть рассчитаны как величины, обратно пропорциональные скоростям опускания поверхности шихты.

Результаты расчета радиального распределения материалов по скоростям опускания поверхности шихты представлены в табл. 6.7 и на рис. 6.14. Коэффициенты корреляции функциональной взаимосвязи показателей распределения, рассчитанных по скоростям опускания поверхности шихты с распределением объемной доли  $\text{CO}_2$  в радиальном газе составили: для периода I – 0,677, II – 0,679 и III – 0,859.

Сопоставление коэффициентов корреляции взаимосвязи показателей распределения, рассчитанных двумя способами, с долей  $\text{CO}_2$  в радиальном газе показывает, что наибольшие их значения характерны для первого предлагаемого способа.

Оценка согласованности результатов расчета показателей распределения с помощью предложенных способов с результатами математического моделирования с использованием разработанной в ИЧМ модели радиального распределения шихты (табл. 6.7 и рис. 6.14) показала, что наибольшие значения коэффициентов корреляции характерны для взаимосвязи рудных нагрузок, рассчитанных с помощью математической модели, с отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса.

Так, для периода I, коэффициент корреляции составил: 0,903; для периода II – 0,885 и для периода III – 0,997. Взаимосвязь отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса с показателями распределения, рассчитанными обратно пропорционально изменению значений скоростей опускания шихты в зонах сечения колошника, характеризуется следующими коэффициентами корреляции: период I – 0,877; период II – 0,830; период III – -0,604.

Обычно, программа загрузки определяется расчетным путем [1] с помощью математической модели, а затем ее уточняют эмпирически. Как показали исследования, рассчитанные с помощью модели рудные нагрузки, лишь частично соответствуют реальному их распределению. Таким образом, измерение профиля засыпи шихты и установление параметров, расчет которых с помощью информации профилемера позволит приблизить определение показателей распределения шихты на колошнике печи к реальным их значениям, представляется необходимым. Установленная взаимосвязь отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса, рассчитываемых на основе

информации профилемера и полученных с помощью модели рудных нагрузок, позволяет использовать отношение высот для уточнения расчета рудных нагрузок в зонах сечения колошника и последующего регулирования распределения шихтовых материалов. Для этого может быть введено понятие показателя объемного фактора рудной нагрузки в зоне сечения колошника – отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса [165]. С учетом предложенного показателя может быть развито предложенное сотрудниками ИЧМ [1] выражение определения средних рудных нагрузок в цикле загрузки:

$$R = \frac{\rho \sum \frac{R_i \delta_i}{\rho + R_i}}{1 - \sum \frac{R_i \delta_i}{\rho + R_i}}, \quad (6.3.1)$$

где  $R_i$  – рудная нагрузка в кольцевой зоне колошника, т/т;  $\rho$  – отношение насыпных масс железосодержащих материалов и кокса, ед;  $\delta_i$  – доля объема материала от общего объема, загруженного за цикл в равновеликой кольцевой зоне колошника, ед.

Если площадь колошника  $S_{\text{кол}} = n \cdot S_i$ ,

где  $n$  – число равновеликих кольцевых зон;  $S_i$  – площадь кольцевой зоны;  $S_{\text{кол}}$  – площадь колошника

доля объема материала от общего объема ( $V$ ), загруженного за цикл в равновеликой кольцевой зоне колошника  $\delta_i = \frac{V_i}{V}$ ,

где  $V_i = V_{\text{ж.с.}i} + V_{\text{к}i} = h_{\text{ж.с.}} \cdot S_i + h_{\text{к}} \cdot S_i$ ;  $V = h_{\text{ср}} \cdot S_{\text{кол}} = h_{\text{ср}} \cdot n \cdot S_i$

при  $V_{\text{ж.с.}i} = h_{\text{ж.с.}i} \cdot S_i$ ;  $V_{\text{к}i} = h_{\text{к}i} \cdot S_i$ :

$$\frac{h_{\text{ж.с.}i}}{h_{\text{к}i}} = \frac{V_{\text{ж.с.}i}}{V_{\text{к}i}}; \quad \delta_i = \frac{h_{\text{ж.с.}i} + h_{\text{к}i}}{h_{\text{ср}} \cdot n},$$

то формула (6.3.1) может быть выражена через высоты слоев железосодержащих материалов ( $h_{\text{ж.с.}}$ ) и кокса ( $h_{\text{к}}$ ) следующим образом:

$$R = \frac{\rho \sum \frac{R_i \cdot (h_{\text{ж.с.}i} + h_{\text{к}i})}{(\rho + R_i) h_{\text{ср}} \cdot n_i}}{1 - \sum \frac{R_i \cdot (h_{\text{ж.с.}i} + h_{\text{к}i})}{(\rho + R_i) h_{\text{ср}} \cdot n_i}}. \quad (6.3.2)$$

Таким образом, на основе информации профилемера о высотах слоев шихтовых материалов расчет рудных нагрузок может быть уточнен по фактически измеренной скорости опускания шихты по радиусу колошника [165].

Уточнение выражения для расчета средних за цикл загрузки рудных нагрузок на основе полученных профилемером данных о высотах слоев в зонах сечения колошника, позволит учесть различный характер опускания шихтовых материалов по радиусу колошника и, таким образом, исключить одно из допущений, принятое при расчете с помощью математических моделей рудных нагрузок – задаваемую относительную скорость опускания шихтовых материалов по радиусу печи, выраженную в аналитической зависимости (6.3.2) через объемы материала в зонах

$$(\delta_i = \frac{V_i}{V}).$$

#### **6.4 Оценка возможностей управления ходом доменной печи с использованием информации профилемера**

Анализ литературных источников, результаты которого приведены в главе 1, показал отсутствие в них сведений об использовании информации профилемеров для оперативного, а, тем более, автоматизированного управления доменной плавкой. Задачей выполненных исследований явилась оценка возможностей управления ходом доменной печи с использованием информации профилемера.

В результате исследований (раздел 6.2) определены показатели ровности опускания шихтовых материалов в доменной печи, выраженные в виде коэффициентов неустойчивости опускания шихты в отдельных зонах ( $K_i$ ) и по всему сечению колошника ( $K_r$ ), с использованием которых определены диапазоны изменения величины параметра газодинамического режима плавки – выхода колошникового газа на единицу площади колошника (регламентируемый «Технологической инструкцией по ведению доменной плавки на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» показатель газодинамического режима плавки), обеспечивающие максимальную стабильность схода шихты и ровный ход печи. Установлено, что для условий доменной плавки на ДП №9, при характерных для нее сырьевых условиях, норма выхода колошникового газа на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника, при которой достигается наиболее стабильный сход шихты, составляет 48–

$55 \text{ м}^3/\text{мин} \cdot \text{м}^2$ . Выполненная оценка влияния стабильности опускания шихтовых материалов по сечению колошника на изменение величины удельного расхода кокса, как одного из основных технико-экономических показателей работы печи, показала (рис. 6.13), что улучшение стабильности опускания шихтовых материалов в доменной печи, характеризуемое уменьшением величины коэффициентов нестабильности, сопровождается уменьшением расхода кокса на выплавку чугуна. Это позволяет предположить, что показатель ровности хода печи, выраженный коэффициентами нестабильности, может быть использован для оценки эффективности установленного режима работы печи, для чего необходимо определить его количественные взаимосвязи с технологическими параметрами.

По результатам исследований (раздел 6.3) предложен способ оценки изменения показателей распределения шихты по радиусу колошника, рассчитанных в долях от средней рудной нагрузки ( $R$ ), пропорционально изменению отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса ( $H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}}$ ), определяемых на основе информации профилемера. Показано, что метод применим при работе печи с указанной нормой выхода колошникового газа на единицу площади колошника при установленном давлении газа под колошником  $P_{\text{к}}$ .

Результаты исследований показали, что на основе рассчитанных по данным профилемера коэффициентов нестабильности может быть выполнена оперативная оценка целесообразности изменения режима работы печи, а с помощью показателя распределения – отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса, определены возможные пути достижения заданного распределения шихтовых материалов. Оба положения требуют проведения статистических исследований с целью получения количественных взаимосвязей рассчитываемых параметров с технологическими показателями плавки.

Целью настоящих исследований являлось определение возможности использования коэффициентов нестабильности опускания шихты и показателя распределения – отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса, для установления целесообразности изменения программы загрузки печи с целью корректировки радиального распределения шихтовых материалов по радиусу колошника печи.

Предпосылкой этому явилась оценка влияния режима загрузки на стабильность опускания поверхности засыпи шихты в печи. Для исследований были выбраны периоды работы ДП №9 –

I-й период характеризовал работу печи 14 и 15.01.2008 г.; II-й – 17, 23–25, 27, 29.05.2008 г.; III-й – 18, 28.05.2008 г. и IV-й – 30-31.05.2008 г. Параметры режима плавки, показатели состояния поверхности засыпи шихты, радиального распределения шихты и газового потока в печи в эти периоды приведены в табл. 6.8 и 6.9. Отличительной особенностью программы загрузки шихты в печь во II, III и IV исследуемых периодах работы печи (программа Б), по сравнению с I-м периодом (программа А), было изменение последовательности выгрузки порций в цикле загрузки. По сравнению с программой А, выгрузка 6-ой порции К 2-1, а затем К 8-4 (порция №7) и АОШо 9-3 (порция №8) в программе Б была изменена на К 8-4 (порция №6), затем К 2-1 (порция №7) и АОШо 9-3 (порция №8). Кроме того, было изменено распределение масс шихтовых материалов по позициям лотка БЗУ в программе А, по сравнению с программой Б (табл. 6.10 и 6.11).

Указанные в табл. 6.10 изменения распределения шихтовых материалов свидетельствует об уменьшении рудной нагрузки в периферийной зоне и увеличении ее в центральной зоне печи при использовании программы Б, по сравнению с программой А. Кроме того, для II, III и IV периодов работы печи, в сравнении с I-м периодом, характерно уменьшение средней рудной нагрузки от 3,58 т/т до 3,41–3,51 т/т.

На основе данных, полученных с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи шихты, выполнена оценка влияния изменения указанных программ загрузки на показатель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике – отношения высот железосодержащих материалов ( $H_{жс}$ ) и кокса ( $H_{к}$ ) за цикл загрузки ( $H_{жс}/H_{к}$ ). Как следует из рис. 6.17, изменение распределения масс шихты по позициям лотка БЗУ и последовательности выгрузки порций в программе Б, по сравнению с программой А, согласуется с изменением соотношения  $H_{жс}/H_{к}$  в сторону его увеличения в осевой (Ц) и промежуточно-центральной (2П) зонах и уменьшения в периферийной (ПФ) и промежуточно-периферийной зоне (1П).

Взаимосвязь изменения значений коэффициентов нестабильности опускания шихтовых материалов по сечению колошника печи ( $K_{к}$ ) в исследуемые периоды при использовании программ А и Б и величины выхода колошникового газа в оптимальном диапазоне его изменения 48–55  $\text{нм}^3/\text{мин}$  на 1  $\text{м}^2$  площади колошника, иллюстрируют графики, приведенные на рис. 6.18, из которых следует, что при использовании программы А, по

Таблица 6.8

Параметры работы ДШ №9 в исследуемые периоды

Параметры, показатели	Период работы печи															
	Период I			Период II					Период III			Период IV				
	14.01	15.01	CP	17.05	23.05	24.05	25.05	27.05	29.05	CP	18.05	28.05	CP	30.05	31.05	CP
Приведенный расход дутья	7912	8143	<b>8028</b>	7868	7940	7855	7841	7762	7922	<b>7865</b>	7761	7513	7637	8337	8463	<b>8400</b>
Расход природного газа	573	559	<b>566</b>	508	525	518	525	543	494	<b>519</b>	515	517	<b>516</b>	530	525	<b>527,5</b>
Содержание O <sub>2</sub> в холодном дутье	26,3	26,0	<b>26,1</b>	27,8	28,2	27,9	28,3	27,3	26,8	<b>27,7</b>	28,3	27,8	<b>28,0</b>	27,3	28,2	<b>27,7</b>
Температура горячего дутья	1078	1042	<b>1060</b>	1023	1117	1119	1115	1119	1061	<b>1092</b>	1033	1029	<b>1031</b>	1107	1078	<b>1093</b>
Давление горячего дутья	3,60	3,68	<b>3,64</b>	3,40	3,23	3,27	3,29	3,22	2,98	<b>3,23</b>	3,45	3,22	<b>3,33</b>	2,99	3,12	<b>3,06</b>
Скорость дутья	1972	1932	<b>1952</b>	1942	2174	2135	2115	2145	2099	<b>2102</b>	1912	1946	<b>1929</b>	2284	2188	<b>2236</b>
Расход дутья на 1 м <sup>3</sup> колوشника	86,4	88,9	<b>87,6</b>	85,9	86,7	85,7	85,6	84,7	86,5	<b>85,8</b>	84,7	82,1	<b>83,4</b>	91,0	92,4	<b>91,7</b>
Выход колوشникового газа	50,52	50,40	<b>50,46</b>	53,78	56,75	55,61	55,23	56,02	58,66	<b>56,01</b>	51,60	52,98	<b>52,29</b>	62,39	61,48	<b>61,94</b>
Отношение V <sub>кв</sub> к средней рудной нагрузке	13,8	14,4	<b>14,1</b>	15,9	16,4	15,9	15,9	18,2	16,4	<b>16,4</b>	15,3	15,0	<b>15,1</b>	18,1	17,2	<b>17,7</b>
Давление под колوشником	1,61	1,70	<b>1,66</b>	1,50	1,38	1,40	1,40	1,30	1,13	<b>1,35</b>	1,58	1,37	<b>1,48</b>	1,14	1,24	<b>1,19</b>
Перепад давления общий	1,96	1,95	<b>1,96</b>	1,88	1,83	1,85	1,87	1,90	1,83	<b>1,86</b>	1,85	1,83	<b>1,84</b>	1,83	1,86	<b>1,85</b>
Перепад давления верхний	0,45	0,43	<b>0,44</b>	0,43	0,35	0,35	0,32	0,45	0,38	<b>0,38</b>	0,39	0,44	<b>0,413</b>	0,36	0,39	<b>0,375</b>
Перепад давления нижний	1,51	1,52	<b>1,52</b>	1,45	1,47	1,49	1,54	1,45	1,45	<b>1,48</b>	1,45	1,39	<b>1,42</b>	1,47	1,46	<b>1,47</b>
Теоретическая температура	2091	2092	<b>2092</b>	2202	2274	2262	2271	2219	2190	<b>2236</b>	2221	2187	<b>2204</b>	2224	2235	<b>2230</b>
Производство чугуна	9350	9087	<b>9219</b>	8488	9110	9101	9131	9228	9083	<b>9024</b>	9610	8863	<b>9237</b>	9113	8763	<b>8938</b>
Расход кокса	4064	4038	<b>4051</b>	4529	4848	4673	4686	4374	4358	<b>4578</b>	4298	4529	<b>4414</b>	4498	4846	<b>4672</b>
антрацита	30,6	32,8	<b>31,7</b>	35,8	27,4	27,0	26,9	27,9	26,8	<b>28,6</b>	35,6	29,5	<b>32,6</b>	24,9	28,3	<b>26,6</b>
кокса+антрацита	437,0	436,6	<b>436,8</b>	488,7	512,2	494,3	495,5	465,3	462,6	<b>486,4</b>	465,4	482,4	<b>474</b>	474,7	512,9	<b>493,8</b>

Таблица 6.9  
 Параметры режима загрузки, состояния поверхности засыпи шихты и радиального распределения шихтовых материалов и газового потока в ДШ №9 в исследуемые периоды ее работы

Параметры, показатели	Зоны сечения колошника	Период работы печи															
		Период I			Период II			Период III			Период IV						
		14.01	15.01	CP	17.05	23.05	24.05	25.05	27.05	29.05	CP	18.05	28.05	CP	30.05	31.05	CP
Железо-солефер-высота шихты (Н <sub>железо</sub> )	ПФ	1.91	1.73	1.82	1.65	1.97	1.96	1.88	2.15	2.31	2.02	2.06	2.28	2.17	2.22	2.23	2.23
	П	1.44	1.29	1.37	1.20	1.08	1.06	1.10	1.15	1.34	1.16	1.16	1.13	1.15	1.39	1.24	1.32
	Ш	0.95	0.92	0.94	1.10	1.30	1.24	1.25	1.07	1.71	1.25	1.11	1.00	1.06	1.57	1.33	1.45
	Ц	0.76	0.73	0.75	1.32	1.58	1.58	1.57	1.14	1.77	1.49	1.28	1.20	1.24	1.89	1.80	1.85
	CP	1.27	1.17	1.22	1.32	1.48	1.46	1.45	1.38	1.78	1.48	1.40	1.40	1.40	1.77	1.65	1.71
	ПФ	0.95	0.96	0.96	0.77	1.19	1.08	1.17	1.38	1.62	1.20	1.11	1.31	1.21	1.59	1.56	1.58
	П	1.46	1.38	1.42	1.14	1.54	1.40	1.63	1.57	1.76	1.51	1.24	1.60	1.42	1.79	1.78	1.79
	Ш	1.36	1.26	1.31	1.08	1.35	1.19	1.50	1.29	1.42	1.31	1.28	1.37	1.33	1.56	1.41	1.49
	Ц	2.32	2.11	2.32	1.54	1.92	1.84	2.02	1.61	1.93	1.76	1.79	1.94	1.87	2.08	1.96	2.02
	CP	1.57	1.43	1.50	1.13	1.50	1.30	1.58	1.46	1.68	1.44	1.36	1.56	1.46	1.76	1.68	1.72
Н <sub>железо</sub> /Н <sub>к</sub>	ПФ	2.01	1.80	1.91	2.14	1.66	1.81	1.61	1.56	1.55	1.68	1.86	1.74	1.79	1.40	1.43	1.41
	П	0.90	0.93	0.96	1.05	0.70	0.76	0.67	0.73	0.76	0.77	0.94	0.71	0.81	0.78	0.70	0.74
	Ш	0.70	0.73	0.71	1.02	0.96	1.04	0.83	1.06	0.95	0.87	0.73	0.80	1.01	0.94	0.98	0.98
	Ц	0.30	0.35	0.32	0.80	0.82	1.05	0.78	0.71	0.82	0.85	0.72	0.62	0.66	0.91	0.92	0.91
	CP	0.80	0.82	0.81	1.16	1.09	1.12	0.92	0.94	1.06	1.02	1.04	0.90	0.96	1.01	0.98	1.00
	ПФ	0.067	0.054	0.061	0.064	0.057	0.058	0.062	0.051	0.032	0.051	0.051	0.038	0.061	0.042	0.074	0.058
	П	0.080	0.053	0.067	0.081	0.080	0.071	0.090	0.071	0.094	0.081	0.086	0.081	0.084	0.084	0.096	0.090
	Ш	0.092	0.065	0.079	0.072	0.097	0.075	0.094	0.067	0.095	0.083	0.088	0.089	0.089	0.090	0.098	0.094
	Ц	0.094	0.067	0.081	0.084	0.107	0.092	0.102	0.079	0.102	0.094	0.095	0.088	0.092	0.096	0.108	0.102
	CP	0.083	0.060	0.072	0.075	0.085	0.074	0.087	0.062	0.081	0.077	0.088	0.074	0.081	0.078	0.094	0.086
Взаимосвязь Н <sub>железо</sub> /Н <sub>к</sub> и V <sub>газ</sub>	ПФ	-0.971	-0.768	-0.922	-0.864	-0.758	-0.615	-0.926	-0.990	-0.921	-0.931	-0.725	-0.988	-0.988	-0.976	-0.96	-0.852
	П	22.16	21.10	21.63	н.д.	20.62	н.д.	н.д.	20.83	24.59	22.01	н.д.	22.85	22.85	20.56	н.д.	20.56
	Ш	20.34	21.32	20.83	н.д.	23.30	н.д.	н.д.	20.32	24.88	22.83	н.д.	23.70	23.70	21.63	н.д.	21.63
	Ц	18.37	19.69	19.03	н.д.	23.35	н.д.	н.д.	19.87	22.98	22.07	н.д.	21.83	21.83	21.23	н.д.	21.23
	CP	3.29	8.46	5.87	н.д.	9.91	н.д.	н.д.	8.03	6.91	8.28	н.д.	6.27	6.27	7.47	н.д.	7.47
	ПФ	18.60	19.54	19.07	н.д.	21.24	н.д.	н.д.	19.05	22.38	20.89	н.д.	21.24	21.24	19.86	н.д.	19.86
	П	0.50	0.47	0.49	н.д.	0.42	н.д.	н.д.	0.43	0.51	0.45	н.д.	0.48	0.48	0.41	н.д.	0.41
	Ш	0.45	0.48	0.46	н.д.	0.47	н.д.	н.д.	0.42	0.51	0.47	н.д.	0.49	0.49	0.43	н.д.	0.43
	Ц	0.41	0.45	0.43	н.д.	0.47	н.д.	н.д.	0.42	0.46	0.45	н.д.	0.45	0.45	0.42	н.д.	0.42
	CP	0.08	0.21	0.14	н.д.	0.19	н.д.	н.д.	0.18	0.13	0.17	н.д.	0.13	0.13	0.15	н.д.	0.15
Коэффициенты неравномерности опускания поверхности шихты на колошнике (К <sub>с</sub> ), млнн	ПФ	0.237	0.211	0.224	0.159	0.206	0.340	0.248	0.193	0.227	0.219	0.203	0.189	0.196	0.319	0.369	0.344
	П	0.269	0.225	0.247	0.262	0.175	0.314	0.181	0.147	0.151	0.205	0.188	0.134	0.161	0.182	0.247	0.215
	Ш	0.262	0.241	0.252	0.229	0.388	0.301	0.287	0.314	0.354	0.312	0.300	0.254	0.277	0.354	0.491	0.513
	Ц	0.256	0.226	0.241	0.217	0.256	0.318	0.239	0.198	0.244	0.245	0.230	0.192	0.211	0.345	0.369	0.357
	CP	3.655	3.505	3.580	3.388	3.471	3.494	3.473	3.086	3.569	3.414	3.377	3.543	3.460	3.444	3.567	3.506
	ПФ	0.88	0.87	0.88	1.05	0.91	1.08	1.06	0.87	0.99	0.99	1.27	0.89	1.08	1.08	0.97	1.03
	П	0.84	0.80	0.82	1.06	0.91	1.11	1.05	0.92	0.98	1.01	1.35	0.93	1.14	1.04	0.92	0.98
	Ш	0.77	0.79	0.78	1.17	1.24	1.43	1.39	1.08	1.23	1.25	1.49	1.13	1.31	1.34	1.22	1.28
	Ц	0.92	0.96	0.94	1.38	1.70	1.88	1.82	1.31	1.56	1.61	1.77	1.44	1.61	1.74	1.67	1.71
	CP	0.85	0.86	0.85	1.07	1.19	1.37	1.33	1.05	1.18	1.21	1.47	1.10	1.28	1.30	1.20	1.25
Масса в поддоне Отношения: V <sub>г</sub> /P <sub>г</sub> ; M <sub>железо</sub> /V <sub>г</sub>	г	110	112	111	102	111	110	109	110	110	109	105	111	111	111	111	111
	(нм <sup>2</sup> ·мин/т <sup>2</sup> )/(г/т)	14.4	13.8	14.1	15.9	16.4	15.9	16.1	16.1	16.1	16.1	15.3	14.9	15.1	18.1	17.2	17.7
	г/(млн <sup>2</sup> ·мин)·г	2.18	2.22	2.20	1.90	1.95	1.98	1.98	1.96	1.92	1.95	1.96	2.06	2.01	1.78	1.80	1.79



Таблица 6.10

**Распределение шихтовых материалов по позициям лотка БЗУ для первой исследуемой программы (А) загрузки печи**

14-15.01.08		Распределение материалов по угловым положениям лотка, %								Масса порции. т	
		9	8	7	6	5	4	3	2		1
1	К 8-4		12	20	22	23	23				20,76
2	АО 9-3	18	25	17	10	10	17	3			99,11
3	К 8-4		15	18	21	22	23				20,81
4	АО 9-3	18	27	17	10	9	18	2			99,52
5	К 2-1								22	78	13,79
6	К 8-4		10	21	21	22	27				23,57
7	АО 9-3	18	25	17	10	9	18	4			99,91
8	К 8-4		15	19	21	22	23				20,95
9	АО 9-3	18	27	17	12	9	16	2			99,18
10	К 2-1								21	79	14,48

Таблица 6.11

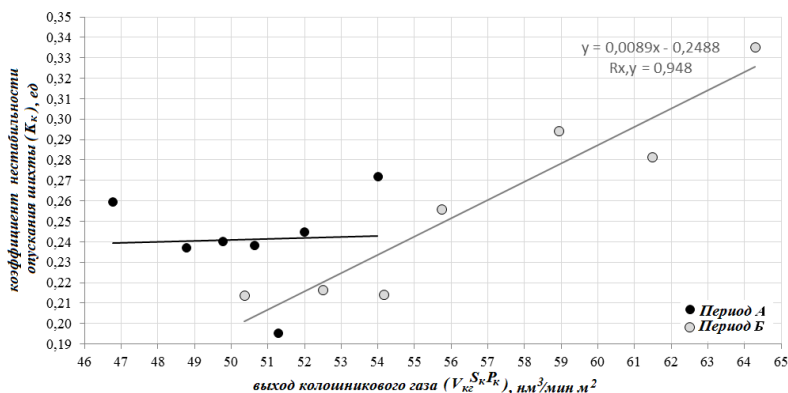
**Распределение шихтовых материалов по позициям лотка БЗУ для второй (Б) исследуемой программы загрузки печи**

17,23,24,25, 27,29,18,28, 30,31.05.08		Распределение материалов по угловым положениям лотка, %								Масса порции. т	
		9	8	7	6	5	4	3	2		1
1	К 8-4		13	23	23	23	19				22,78
2	АО 9-3	15	27	17	11	10	17	2			100,99
3	К 8-4		14	22	22	23	20				22,83
4	АО 9-3	15	28	16	11	10	17	3			100,75
5	К 8-4		13	23	23	23	19				22,84
6	КО 2-1								22	78	15,37
7	АО 9-3	15	27	17	10	10	18	2			101,41
8	К 8-4		14	22	22	23	20				23,13
9	АО 9-3	15	28	16	12	10	16	3			101,47
10	К 2-1								22	78	13,00
11	К 8-4		13	22	23	23	19				22,69
12	АО 9-3	16	27	17	11	10	17	2			101,37
13	К 8-4		14	22	22	23	20				23,06
14	АО 9-3	15	27	16	11	10	17	3			100,50
15	КО 2-1								22	78	15,22
16	К 8-4		12	21	21	21	18				24,52
17	АО 9-3	15	27	17	10	10	18	2			101,52
18	К 8-4		14	22	21	23	20				23,12
19	АО 9-3	15	28	16	12	10	16	3			101,61
20	К 2-1								23	78	12,89

сравнению с использованием программы загрузки Б, обеспечивающей подгрузку рудными материалами периферийной и разгрузку осевой зоны печи при увеличении общей рудной нагрузки от 3,41–3,51 т/т до 3,58 т/т, работа печи характеризовалась уменьшением нестабильности опускания шихтовых материалов. При использовании программы А, коэффициент нестабильности опускания шихты  $K_K$  изменялся от 0,15 ед. до 0,20 ед., а при использовании программы Б – от 0,20 до 0,35 ед.



**Рис. 6.17.** Радиальное распределение средней величины отношения высот слоев железосодержащих материалов ( $H_{жс}$ ) и кокса ( $H_K$ ) за цикл при использовании программ загрузки А и Б в периодах I–IV



**Рис. 6.18.** График изменения коэффициентов нестабильности опускания поверхности шихтовых материалов на колошнике ( $K_K$ ) в зависимости от изменения величины удельного выхода колошникового газа на  $1 м^2$  сечения колошника ( $V_{кр}^{SrPk}$ ) в диапазоне 48-55  $м^3/мин$ . при загрузке ДП №9 по программам А и Б

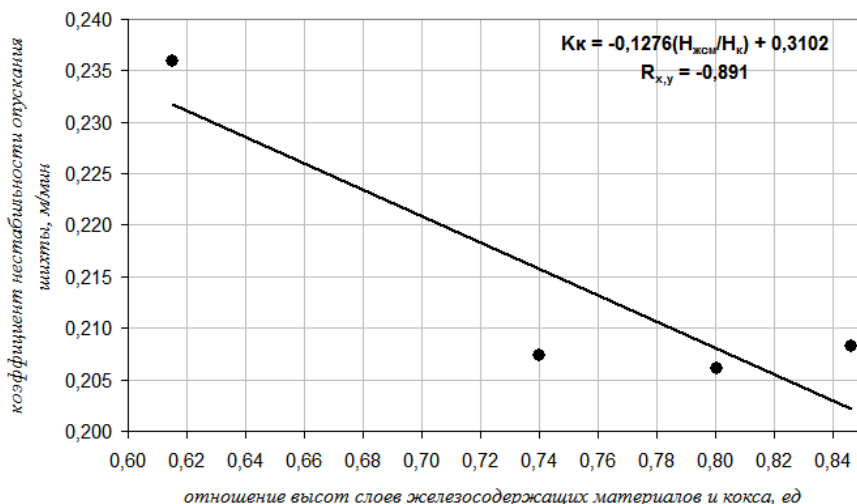
Для обеих программ загрузки минимальному значению коэффициента нестабильности опускания шихты  $K_k$ , составляющему, в среднем, 0,20 ед., соответствовал удельный выход колошникового газа 50–52  $\text{нм}^3/\text{мин}$  на 1  $\text{м}^2$  сечения колошника. При этом, в диапазоне изменения выхода колошникового газа 48–50  $\text{нм}^3/\text{мин}\cdot\text{м}^2$ , нестабильность опускания шихты при использовании программы загрузки А была меньше, чем при программе Б, коэффициент нестабильности  $K_k$  составил 0,15–0,20 ед., против 0,20–0,25 ед. В диапазоне удельного выхода колошникового газа 52–55  $\text{нм}^3/\text{мин}$  коэффициент нестабильности для программы А составлял 0,25 ед., а для программы Б увеличивался до 0,25–0,35 ед. Подтверждением уменьшения коэффициентов нестабильности опускания шихты при увеличении общей рудной нагрузки, является сопоставление двух суток работы печи 18 и 28.05.2008 г. с близкими значениями величины выхода колошникового газа, соответственно, составившими 51,60 и 52,98  $\text{нм}^3/\text{мин}$ . Как следует из табл. 6.9, при увеличении 28.05 общей рудной нагрузки до 3,543 т/т кокса, по сравнению с 18.05, когда рудная нагрузка составляла 3,377, коэффициент нестабильности опускания шихты уменьшился от 0,23 до 0,19 ед.

Кроме того, установлено, что значения коэффициентов нестабильности определяются и качеством железосодержащих материалов, которое, в том числе, зависит от содержания мелочи агломерата в подаче. Так, в I-ом периоде количество выгружаемой в подачу мелочи составило 6,4 т/подаче, во II-ом – 7,67 т/подаче, а в III-м – 17,81 т/подаче. Ухудшение качества шихтовых материалов, связанное, в частности, с увеличением содержания в них мелочи, способствовало увеличению нестабильности опускания шихты и величины выхода колошникового газа от 50,46  $\text{нм}^3/\text{мин}\cdot\text{м}^2$  в I-ом периоде до 61,94  $\text{нм}^3/\text{мин}\cdot\text{м}^2$  в III-м периоде. Это еще раз подтвердило результаты исследований, приведенные в параграфе 6.2.2, что рациональная величина нормы выхода колошникового газа определяется качеством шихтовых материалов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменения нестабильности опускания шихты в исследуемых периодах обусловлены изменениями общей рудной нагрузки и ее радиальным распределением в зависимости от используемой программы загрузки шихты на печи, а также определяются качеством шихтовых материалов.

Установлена связь отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $H_{\text{жсМ}}/H_k$  (как показателя

распределения шихтовых материалов на колошнике) с коэффициентами неустойчивости опускания шихты в зонах сечения колошника (рис. 6.19), что позволяет использовать эти коэффициенты для обоснования необходимости изменения режима работы печи.



**Рис. 6.19.** Зависимость коэффициентов неустойчивости опускания поверхности шихтовых материалов на колошнике ( $K_k$ ) от отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса ( $H_{жсм}/H_k$ )

Для обоснования возможности управления радиальным распределением шихтовых материалов на колошнике доменной печи с помощью данных, характеризующих стабильность опускания поверхности засыпи шихтовых материалов, выполнен анализ параметров загрузки, состояния поверхности засыпи шихты, радиального распределения шихтовых материалов и газового потока в ДП №9 (табл. 6.9, 6.10) с учетом технологических параметров (табл. 6.8) в исследуемые I–IV периоды ее работы.

Установление взаимосвязей коэффициентов неустойчивости опускания шихтовых материалов в зонах сечения колошника ( $K_i$ ) с параметрами загрузки выполнялось для исследуемых периодов работы печи I–IV. Распределение шихтовых материалов по радиусу колошника оценивалось по отношению высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $H_{жсм}/H_k$ , образованных за

цикл загрузки и усредненных за каждые исследуемые сутки работы печи. Установлено, что взаимосвязь отношения высот  $H_{жсм}/H_k$  со скоростями опускания шихтовых материалов, рассчитанных на основе информации профилемера, может также являться показателем согласованности газодинамического режима плавки. Так, для двух суток работы печи 30 и 31.05.2008 г. (период IV) с величиной выхода колошниковога газа, значительно превышающей его норму и изменяющейся в диапазоне 61,5–62,4 м<sup>3</sup>/мин м<sup>2</sup>, значение коэффициента корреляции отношения высот  $H_{жсм}/H_k$  со скоростями опускания шихтовых материалов, по сравнению с работой печи 14 и 15.01.2008 г. (период I), уменьшилось с 0,971 до 0,852. Причиной этого является, по-видимому, образование взвешенного слоя над поверхностью засыпи, вызванное несогласованностью расхода дутья с давлением колошниковога газа.

Для обеих программ загрузки установлена взаимосвязь рудных нагрузок по позициям лоткового распределителя с показателем распределения – отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса для установленной нормы выхода колошниковога газа и соответствующими для нее коэффициентами нестабильности опускания шихты. При этом рудные нагрузки по используемым позициям лоткового распределителя, соответствующих центрам тяжести потока материалов при выгрузке порции в равновеликие кольцевые зоны радиуса колошника, приведены к четырем кольцевым зонам радиуса, в которых осуществляется измерение уровней поверхности засыпи: ПФ, 1П, 2П и Ц. В периферийную зону – ПФ выгружается материал из 9-ой, 8-ой и 7-ой позиций, в промежуточно-периферийную – 1П – из 6-ой, 5-ой и 4-ой позиций, в промежуточно-центральную – 2П – из 3-й и 2-ой позиций и в центральную – Ц – из 1-ой позиции лоткового распределителя.

Для установления взаимосвязи рудных нагрузок по позициям лоткового распределителя с отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса были определены средние рудные нагрузки в четырех группах позиций лотка, соответствующих кольцевым зонам радиуса колошника, в которых осуществляется измерение уровней поверхности засыпи. В результате исследований установлено, что для периодов работы печи, характеризующихся величиной выхода колошниковога газа, находящейся в диапазоне  $V_{кр}^{SkPk} = 48–55$  м<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника, значения коэффициентов корреляции рудных нагрузок, рассчитанных на основе массы выгружаемых лотковым

распределителем материалов, с отношением высот образованных слоев железосодержащих компонентов шихты и кокса, имеют максимальные значения ( $r_{xy}$ ) в III-ем и I-ом периодах, соответственно, 0,954 и 0,981 (табл. 6.11). Для периодов II и IV с величиной выхода колошникового газа, превышающей допустимый диапазон, значения коэффициентов корреляции рудных нагрузок, рассчитанных на основе массы выгружаемых лотковым распределителем материалов, с отношением высот образованных слоев железосодержащих компонентов шихты и кокса, уменьшаются, и например, как следует из табл. 6.11, для IV-го периода составляют 0,813. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для периодов работы печи с рациональной напряженностью газодинамического режима плавки существует тесная взаимосвязь рудных нагрузок, рассчитанных на основе массы выгружаемых лотковым распределителем материалов в циклах загрузки, с отношением высот образованных слоев железосодержащих материалов и кокса.

Приведенный на рис. 6.20 график иллюстрирует тесную взаимосвязь рудных нагрузок, рассчитанных на основе массы выгружаемых лотковым распределителем материалов в циклах загрузки, с отношением высот образованных слоев железосодержащих материалов и кокса для периодов работы печи, характеризующихся рациональной величиной выхода колошникового газа, находящейся в диапазоне  $V_{кр}^{SkPk} = 48 - 55 \text{ м}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника. Достаточно узкий диапазон изменения взаимосвязанных величин позволяет использовать эту взаимосвязь в качестве одного из условий при расчете программ загрузки с точки зрения обеспечения стабильного опускания шихтовых материалов. В отличие от этого, при работе печи с газодинамическим режимом, при котором величина выхода колошникового газа превышает рациональный диапазон, взаимосвязь рудных нагрузок, рассчитанных на основе массы выгружаемых лотковым распределителем материалов в циклах загрузки, с отношением высот образованных слоев железосодержащих материалов и кокса характеризуется широким диапазоном изменения и не может использоваться при расчете программ загрузки (рис. 6.21).

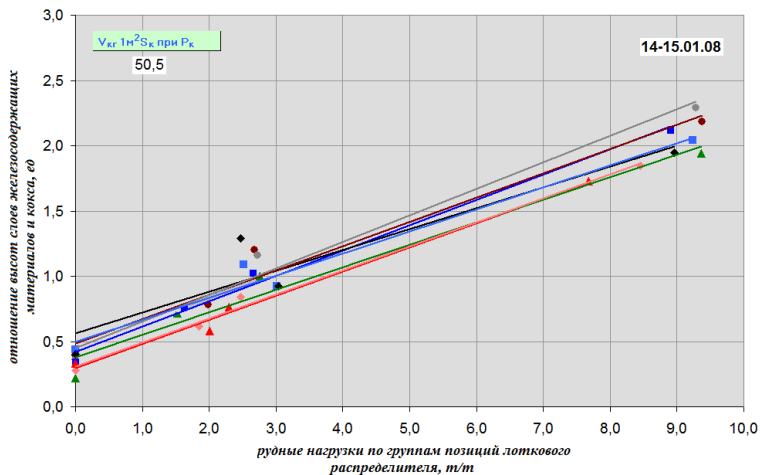
Для оценки радиального распределения шихтовых материалов по отношению высот железосодержащих материалов и кокса и величине коэффициентов неустойчивости опускания шихты по сечению колошника, при расчете программ загрузки, были выбраны периоды работы печи с рациональной

напряженностью газодинамического режима плавки, характеризуемой изменением величины выхода колошникового газа в диапазоне  $V_{\text{кг}}^{S_{\text{кРк}}} = 48\text{--}55 \text{ м}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника, что соответствует установленной его норме (раздел 6.2). Как следует из табл. 6.8 и 6.9, этому требованию соответствуют следующие периоды: 14 и 15.01.2008 г. (период I), 17.05.2008 г. (период II), 18 и 28.05.2008 г. (период III).

Таблица 6.11

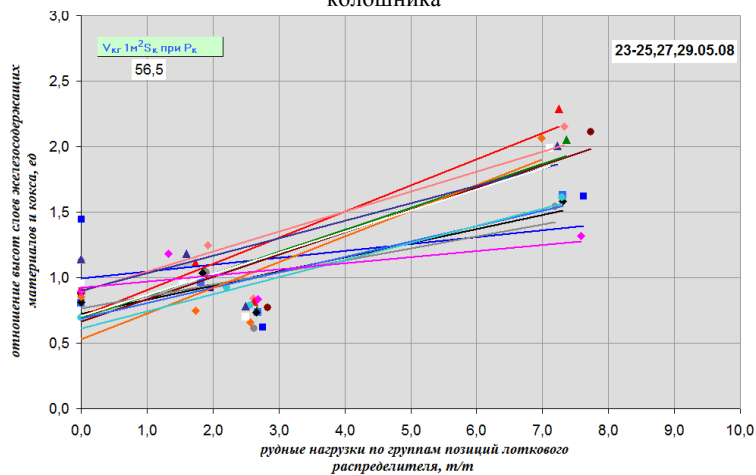
**Взаимосвязь рудных нагрузок, рассчитанных по массе выгружаемых с лоткового распределителя материалов, с соотношением высот слоев в зонах сечения колошника**

Период №, дата		$R_{\text{ПФ}}$	$R_{\text{II}}$	$R_{\text{2П}}$
I	14-15.01.2008	8,639	2,522	0,880
II	17, 23-25, 27, 29.05.2008	7,279	2,621	0,906
III	18, 28.05.2008	7,437	2,645	0,850
IV	30-31.05.2008	7,344	2,616	0,758
Период №, дата		$R_{\text{Ц}}$	$R_{\text{Рлотка, Нжсм/Нк}}$	$H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}}^{\text{ПФ}}$
I	14-15.01.2008	0,000	0,981	1,906
II	17, 23-25, 27, 29.05.2008	0,000	0,892	1,721
III	18, 28.05.2008	0,000	0,954	1,798
IV	30-31.05.2008	0,000	0,813	1,428
Период №, дата		$H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}}^{\text{II}}$	$H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}}^{\text{2II}}$	$H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}}^{\text{Ц}}$
I	14-15.01.2008	0,961	0,714	0,324
II	17, 23-25, 27, 29.05.2008	0,780	0,958	0,851
III	18, 28.05.2008	0,821	0,799	0,667
IV	30-31.05.2008	0,734	0,963	0,885
Период №, дата		$V_{\text{кг}} 1\text{м}^2 S_{\text{к}} \text{ при } P_{\text{к}}, N_2$	$R_{\text{R/Рлот-зоны, (Нжсм/Нк)/(Нжсм/Нк)-зоны}}$	$K_{\text{ср, ед}}$
I	14-15.01.2008	50,46	0,962	0,241
II	17, 23-25, 27, 29.05.2008	56,01	0,426	0,245
III	18, 28.05.2008	52,29	0,538	0,211
IV	30-31.05.2008	61,94	0,222	0,357
Период №, дата		$\frac{R_{\text{ПФ}}}{R_{\text{II}}}$	$\frac{R_{\text{II}}}{R_{\text{2П}}}$	$\frac{R_{\text{2П}}}{R_{\text{Ц}}}$
I	14-15.01.2008	3,425	2,867	0,000
II	17, 23-25, 27, 29.05.2008	2,777	2,893	0,000
III	18, 28.05.2008	2,811	3,113	0,000
IV	30-31.05.2008	2,807	3,452	0,000
Период №, дата		$\frac{(H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}})_{\text{2ПФ}}}{(H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}})_{\text{2II}}}$	$\frac{(H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}})_{\text{2II}}}{(H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}})_{\text{2П}}}$	$\frac{(H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}})_{\text{2П}}}{(H_{\text{жсм}}/H_{\text{к}})_{\text{Ц}}}$
I	14-15.01.2008	1,985	1,345	0,453
II	17, 23-25, 27, 29.05.2008	2,207	0,814	0,888
III	18, 28.05.2008	2,191	1,028	0,835
IV	30-31.05.2008	1,947	0,762	0,920



Каждая линия тренда – результат усреднения 8 циклов загрузки для 8 последовательных периодов.

**Рис. 6.20.** Взаимосвязь рудных нагрузок по группам позиций лоткового распределителя с отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса для периодов работы печи, характеризующихся рациональной величиной выхода колошниковога газа, находящейся в диапазоне  $V_{\text{кт}}^{\text{SkPк}} = 48\text{--}55 \text{ нм}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника



Каждая линия тренда – результат усреднения 8 циклов загрузки для 13 последовательных периодов.

**Рис. 6.21.** Взаимосвязь рудных нагрузок по группам позиций лоткового распределителя с отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса для периодов работы печи, характеризующихся величиной выхода колошниковога газа, превышающей рациональный диапазон  $V_{\text{кт}}^{\text{SkPк}} = 48\text{--}55 \text{ нм}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника



Для удобства сопоставления показателей распределения шихты, рассчитанных на основе отношения высот слоев, и рудных нагрузок по позициям лоткового распределителя, предложено использовать относительные их величины в граничащих друг с другом зонах. Установление соотношений высот слоев железосодержащих материалов и кокса, при которых достигается ровный ход печи, может явиться дополнительным условием, ограничивающим количество возможных решений по выбору либо корректировке программ загрузки, осуществляемыми специальными расчетными методами.

Анализ табл. 6.9 показал, что в зонах сечения колошника отношения высот  $H_{жсм}/H_k$  и коэффициенты нестабильности опускания шихты обратно пропорциональны, при установленной норме выхода колошникового газа, и взаимосвязаны друг с другом с коэффициентом корреляции для 14.01.2008:  $-0,68$ , для 15.01.2008:  $-0,99$ . Наличие достаточно тесной связи позволяет предположить, что для обеспечения ровного опускания шихтовых материалов отношения высот слоев в зонах сечения колошника при использовании программы А должны соотноситься друг с другом таким образом, чтобы обеспечить наиболее стабильное опускание шихтовых материалов, что было характерно для периода работы печи 15.01.2008 г. Для этих суток характерным было следующее

соотношение  $H_{жсм}/H_k$  в зонах –  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{1П}}{(H_{жсм}/H_k)_{ПФ}} = 0,519$ ;  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{2П}}{(H_{жсм}/H_k)_{1П}} = 0,781$ ;  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{Ц}}{(H_{жсм}/H_k)_{2П}} = 0,474$ . Для сравнения – в период 14.01.08 эти

соотношения составили –  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{1П}}{(H_{жсм}/H_k)_{ПФ}} = 0,491$ ;  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{2П}}{(H_{жсм}/H_k)_{1П}} = 0,708$ ;

$\frac{(H_{жсм}/H_k)_{Ц}}{(H_{жсм}/H_k)_{2П}} = 0,432$ . Вероятно, это послужило причиной при

прочих равных технологических параметрах незначительного (на 13%) увеличения коэффициента нестабильности опускания шихты от 0,226 (15.01.2008) до 0,256 ед. (14.01.2008). Характерным для этих суток было практически одинаковое распределение коэффициентов нестабильности опускания шихты в зонах сечения колошника.

Для периода 18.05.2008 соотношения составили:  
 $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{1П}}{(H_{жсм}/H_k)_{ПФ}} = 0,504$ ;  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{2П}}{(H_{жсм}/H_k)_{1П}} = 0,927$ ;  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{Ц}}{(H_{жсм}/H_k)_{2П}} = 0,825$ . Для  
 28.01.08 –  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{1П}}{(H_{жсм}/H_k)_{ПФ}} = 0,406$ ;  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{2П}}{(H_{жсм}/H_k)_{1П}} = 1,034$ ;  $\frac{(H_{жсм}/H_k)_{Ц}}{(H_{жсм}/H_k)_{2П}} = 0,847$ . При этом коэффициенты корреляции взаимосвязи ( $Y=A+BX$ ) изменения отношения высот  $H_{жсм}/H_k$  и коэффициентов нестабильности опускания шихты, соответственно, составили: – 0,91 и –0,96. Для этих двух суток работы печи распределение коэффициентов нестабильности опускания шихты в зонах было различным, при этом наибольшее его значение наблюдалось в центральной зоне печи.

Таким образом, при согласованном газодинамическом режиме и режиме загрузки, т.е. с работой печи при установленной норме выхода колошникового газа и со значениями коэффициентов нестабильности опускания шихты, не превышающими 0,3 (значение принято условно, исходя из конкретной статистической выборки, и требует уточнения в ходе дальнейших исследований), существует определенное (рациональное) соотношение рудных нагрузок соседних групп позиций лоткового распределителя, соблюдение которого является одним из факторов, необходимых при расчете программ загрузки. Для исследуемого периода I эти

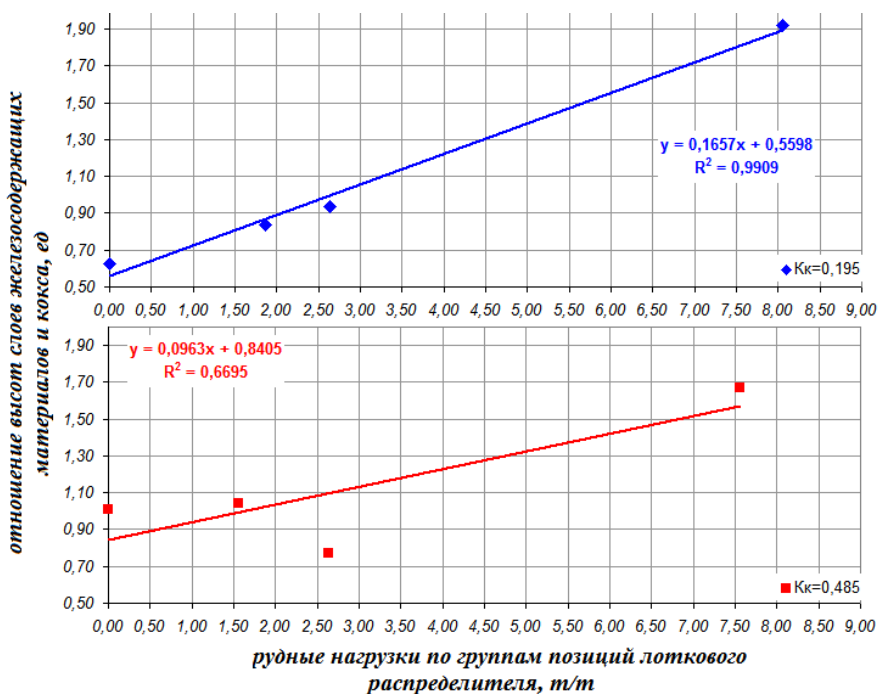
соотношения составляют:  $\frac{R_{2П}}{R_{1П}} = 0,247$  и  $\frac{R_{1П}}{R_{ПФ}} = 0,289$ , а для

периода II:  $\frac{R_{2П}}{R_{1П}} = 0,153$  и  $\frac{R_{1П}}{R_{ПФ}} = 0,352$ . На основе дальнейших

исследований могут быть установлены зависимости изменения соотношений рудных нагрузок соседних групп позиций лоткового распределителя от соотношений высот слоев в граничащих друг с другом зонах, рассчитанных по информации профилемера.

При выполнении исследований также установлено, что для работы печи, характеризующейся коэффициентами нестабильности, не превышающими 0,3, существует тесная взаимосвязь отношения высот железосодержащих материалов и кокса с рудными нагрузками по позициям лоткового распределителя (коэффициент корреляции 0,995, рис. 6.22). Для условий работы печи с коэффициентами нестабильности более 0,3 – теснота связи значительно уменьшается, при этом коэффициент корреляции отношения высот железосодержащих материалов и

кокса с рудными нагрузками по позициям лоткового распределителя составляет 0,818. Таким образом, полученные результаты в первом приближении позволяют использовать взаимосвязь отношения высот железосодержащих материалов и кокса с рудными нагрузками по позициям лоткового распределителя в качестве одного из условий, которое должно быть использовано при расчете программ загрузки с точки зрения обеспечения стабильного опускания шихтовых материалов.



**Рис. 6.22.** Взаимосвязь отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса от рудных нагрузок по группам позиций лоткового распределителя

Рекомендации по выбору программ загрузки, в соответствии с основными требованиями, могут быть дополнены следующими условиями, направленными на обеспечение стабильного опускания шихты:

1) наличие тесной взаимосвязи отношения высот железосодержащих материалов и кокса с рудными нагрузками по позициям лоткового распределителя;

2) обеспечение требуемых соотношений величин показателей распределения шихты в граничащих друг с другом зонах, рассчитанных на основе высот слоев и рудных нагрузок по позициям лоткового распределителя.

Правомочность использования коэффициентов нестабильности опускания шихты в зонах сечения колошника для обоснования выбора рационального радиального распределения шихтовых материалов подтверждается также высокой теснотой связи отношения высот железосодержащих материалов и кокса  $N_{жсм}/N_k$  со степенью использования газа в зонах сечения колошника. Например, для периодов 14.01.2008 г. и 15.01.2008 г. при использовании программы А, значения коэффициентов корреляции отношения высот и степени использования газа  $\eta_{CO}$  составили, соответственно, 0,74 и 0,66. Коэффициент корреляции отношения высот и степени использования газа  $\eta_{CO}$  для суток работы печи 30.05 с величиной выхода колошникового газа 62,39  $nm^3/min$  на 1  $m^2$  сечения колошника, значительно превышающей установленный допустимый диапазон ее изменения, составил 0,20.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при работе печи с рациональным газодинамическим режимом плавки, т.е. при согласованном соотношении количества и состава комбинированного дутья с давлением колошникового газа, обеспечивается устойчивое опускание шихтовых материалов, характеризуемое минимальными (не превышающими 0,3 для конкретной статистической выборки и требующими уточнения в дальнейших исследованиях) значениями коэффициентов нестабильности опускания шихты. Для таких условий взаимосвязь рудных нагрузок по позициям лоткового распределителя с показателем распределения шихтовых материалов – отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса максимальная, что позволяет использовать эту взаимосвязь для определения соотношения рудных нагрузок по группам позиций лотка в граничащих друг с другом зонах. Целесообразность изменения программы загрузки во времени может быть установлена после дополнительных исследований, в результате которых должны быть определены количественные взаимосвязи коэффициентов нестабильности опускания шихты, отношений высот железосодержащих материалов и кокса с технологическими

параметрами плавки. Получение таких зависимостей позволит оперативно оценивать необходимость принятия мер по управлению ходом плавки с использованием коэффициентов неустойчивости опускания шихты.

На основе выполненных исследований могут быть предложены следующие подходы к управлению ходом печи с использованием информации профилемера:

1. Для конкретного объекта – доменной печи на основании параметров газодинамического режима плавки и с помощью профилемера (на основе рассчитываемых коэффициентов неустойчивости опускания шихты в отдельных зонах ( $K_i$ ) и по всему сечению колошника ( $K_k$ )), устанавливается норма выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника, при которой достигается наиболее стабильный сход шихты. Верхняя граница рационального диапазона изменения нормы выхода колошникового газа, по нашему мнению, может характеризовать предел регулирования режима работы печи воздействием на доменную плавку «снизу», т.е. изменением расхода дутья и его согласованием с давлением газа под колошником.

2. При сохранении (либо увеличении) неустойчивости опускания шихтовых материалов, оцениваемой по коэффициентам неустойчивости, для работы печи в условиях рациональной величины выхода колошникового газа, управление ходом плавки может осуществляться изменением средней рудной нагрузки или программы загрузки. Для определения допустимых значений коэффициентов неустойчивости, обеспечивающих заданные технологические параметры плавки, необходимо проведение исследований, которые позволили бы установить их количественные взаимосвязи. Превышение установленных рациональных значений коэффициентов неустойчивости опускания шихты явится одним из факторов, свидетельствующих о необходимости корректировки режима загрузки печи. В этом случае изменение режима работы печи может быть выполнено изменением распределения рудных нагрузок.

Полученные результаты являются предварительной оценкой возможности управления ходом доменной печи с использованием информации профилемера и позволили обосновать необходимость и определить основные направления дальнейших исследований.

## **6.5 Использование информации профилемера для эффективной загрузки дополнительного кокса при регулировании теплового состояния горна доменной печи**

Известно, что степень теплотребления горна доменной печи зависит от величины рудной нагрузки. Возможные колебания нагрева горна, возникающие в результате изменений состава, качества шихты и других факторов, регулируют, в основном, переменной влажностью дутья (регулирование «снизу») и величиной рудной нагрузки (регулирование «сверху»). Наиболее экономичное регулирование теплового состояния доменной печи «сверху» можно обеспечить только при изменении рудной нагрузки и ее распределения по радиусу печи изменением программы загрузки. Возможность обоснованного изменения рудной нагрузки, а, следовательно, и программы загрузки, возникла в результате установки на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» системы контроля поверхности засыпи шихты. В 2005 г. для условий этой доменной печи сотрудниками ИЧМ была разработана основная программа загрузки, в которой заложен принцип универсальности (табл. 6.12) [1]. Цикл загрузки (10 порций) условно может быть представлен двумя полуциклами, отличающимися особенностями загрузки кокса в осевую зону колошника. В первом полуцикле (порции 1...5) в осевую зону колошника может выгружаться, например, кокс местного производства, а во втором (порции 6...10) – кокс улучшенного качества (Алтайский КХЗ, Польский, Темиртау, Египетский) или наоборот. Также в первом или втором полуциклах ранее использовалась загрузка в осевую зону колошника смеси кокса с окатышами, кокса с брикетами и кокса со скрапом. Полуциклы программы загрузки включают две порции железосодержащих материалов и три порции кокса. При этом, железосодержащие материалы разгружаются из угловых положений лотка 9-3 (семь угловых положений), а кокс – положения 8-4 (пять угловых положений) и 3-1 (три угловых положения) (табл. 6.12). В программе загрузки использован принцип неравномерного распределения массы порции по угловым положениям распределителя в соответствии с необходимым для текущих условий хода печи распределением рудных нагрузок и объемов шихтовых материалов по радиусу колошника. Неравномерное распределение также позволяет без изменения структуры программы загрузки оперативно изменять рудные нагрузки и (или)

объемы материалов в зонах, где ход доменной печи требует такого изменения [1].

Для регулирования и стабилизации теплового состояния низа печи на ДП №9 осуществляется загрузка дополнительных коксовых порций вне цикла загрузки, которая производится в соответствии с приведенным в табл. 6.13 распределением масс по угловым положениям лотка БЗУ. Чаще всего технологи используют порции дополнительного кокса, выгружаемые из угловых положений лотка БЗУ: 8-4 и 7-4. При этом, в настоящее время, выбор варианта распределения по угловым положениям лотка БЗУ порций дополнительного кокса осуществляется технологами-доменщиками, порой интуитивно.

Таблица 6.12

**Распределение материалов по угловым положениям лотка БЗУ для полуцикла программы загрузки ДП №9**

№ порции, вид материала, угловые положения лотка БЗУ	Распределение материалов по угловым положениям лотка БЗУ, %								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1-К 8-4		11	22	23	22	22			
2-ЖСМ 9-3	16	22	19	13	13	11	6		
3-К 8-4		11	22	23	22	22			
4-ЖСМ 9-3	16	22	19	13	13	11	6		
5-К 3-1							30	30	40

К – кокс, ЖСМ – железосодержащие материалы

Таблица 6.13

**Распределение материалов по угловым положениям лотка БЗУ для дополнительных порций кокса вне цикла загрузки ДП №9**

Порция	Распределение материалов по угловым положениям лотка БЗУ, %									
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
К 8-4 <sup>*)</sup>				20	20	20	20	20		
К 7-4 <sup>*)</sup>					25	25	25	25		
К 8-7				50	50					
К 11-7	20	20	20	20	20					
К 5-3							33	33	34	
К 4-2								33	33	34

<sup>\*)</sup> – наиболее распространенное распределение материалов по угловым положениям лотка БЗУ

Целью представленных исследований является установление взаимосвязей показателей поверхности засыпи шихты и технико-экономических показателей доменной плавки для обоснованного выбора способов загрузки дополнительного кокса.

Возможность проведения исследований, результаты которых приведены ниже, связана с установкой на ДП №9 радиолокационной системы контроля поверхности засыпи и реализацией в АСУ этой печи, сотрудниками ИЧМ совместно с представителями комбината, информационной системы отображения информации о форме поверхности засыпи и ее изменении во времени [133]. Одним из важных параметров, характеризующих состояние поверхности засыпи и определяемых с помощью системы контроля поверхности, является информация об образованных за цикл загрузки слоях шихтовых материалов – форме и их высоте. Каждый слой материала ограничен измеренным скорректированным исходным профилем перед выгрузкой порции, и профилем, сформированным после выгрузки порции материала [133]. В точках измерения по радиусам установки измерителей и в кольцевых зонах измерения поверхности засыпи определяются высоты слоев шихтовых материалов, образованных после выгрузки железосодержащих компонентов шихты ( $H_{жсм}$ ) и кокса ( $H_{кокс}$ ) в цикле загрузки печи. Отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса ( $H_{жсм}/H_{кокс}$ ) является показателем распределения шихты на колошнике, с помощью которого возможно осуществлять оперативную оценку распределения шихтовых материалов на колошнике [166].

Анализ изменения соотношений показателя  $H_{жсм}/H_{кокс}$  в зонах, в которых осуществляется измерение поверхности засыпи, позволил установить диапазоны изменения соотношений показателя  $H_{жсм}/H_{кокс}$ , характерные для периодов работы доменной печи с минимальным и максимальным расходом твердого топлива (кокс+антрацит+орех). Анализ выполнен для шести периодов работы ДП №9 продолжительностью 63 часа каждый, с технологическими параметрами, представленными в табл. 6.14.

Установлено, что в периоды работы ДП с минимальным расходом твердого топлива (в среднем – 442 кг/т чугуна), соотношения значений показателя  $H_{жсм}/H_{кокс}$  в центральной (Ц, расстояние 0,9 м от оси печи) и периферийно-промежуточной (П, расстояние 3,8 м от оси печи) зонах находятся в диапазоне 1,40–1,60 ед., а периоды, где значения этих соотношений находились в диапазоне 1,20–1,35 ед. соответствовали работе ДП с увеличенным

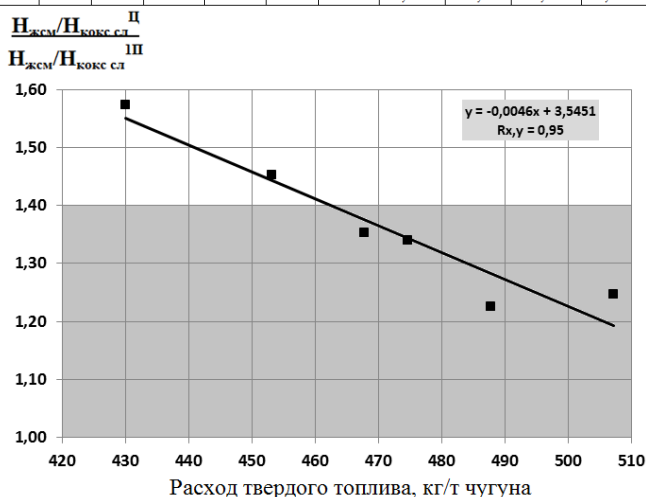


расходом твердого топлива на уровне 485 кг/т чугуна (рис. 6.23). Эти результаты могут быть интерпретированы с точки зрения обоснования величины коксовой отдушины в центральной зоне печи. В связи с обоснованием способов загрузки порций дополнительного кокса, определяющую роль в соотношении значений показателя  $N_{ЖСМ}/N_{КОКС}$  в Ц и ІІ зонах играет отношение высот слоев кокса в Ц зоне к ІІ зоне.

Таблица 6.14

**Технологические параметры работы ДП №9 в анализируемых периодах**

№ периода	Расход твердого топлива, кг/т	Производство чугуна, т/сут	Температура газа на периферии, °С	Температура колошникового газа, °С	Расход дутья, м³/мин	Температура горячего дутья, °С	Расход природного газа, м³/мин	Теоретическая температура горения, °С	Рудная нагрузка, т/т	Степень использования газов, %	Химический состав чугуна			
											[Si]	[Mn]	[S]	[P]
1	430	6949	416	113	6966	1062	207	2066	3,427	42,98	0,96	0,220	0,019	0,067
2	453	7287	395	114	6883	1054	183	2081	3,413	42,86	0,92	0,185	0,018	0,063
3	468	6942	405	110	6939	1068	186	2105	3,446	41,43	0,97	0,228	0,016	0,064
4	475	6673	403	115	6889	1054	182	2083	3,376	42,61	1,02	0,192	0,014	0,063
5	488	6779	381	92	6732	1056	168	2095	3,167	42,15	0,87	0,185	0,017	0,060
6	507	6281	431	126	6718	1045	176	2078	3,236	40,89	1,03	0,227	0,016	0,069



**Рис. 6.23.** Зависимость соотношения показателя  $N_{ЖСМ}/N_{КОКС}$  в центральной и периферийно-промежуточной зонах колошника от расхода твердого топлива

Возможность использования диапазонов изменения соотношений показателя  $N_{жсм}/N_{кокс}$  для обоснования размера коксовой отдушины в центральной зоне печи подтверждается установленной прямой связью соотношения значений показателя  $N_{жсм}/N_{кокс}$  в Ц и 1П зонах колошника со степенью использования восстановительной способности газов ( $\eta_{CO}$ ) с коэффициентом достоверности аппроксимации  $r_{x,y}=0,7$  (рис. 6.24).

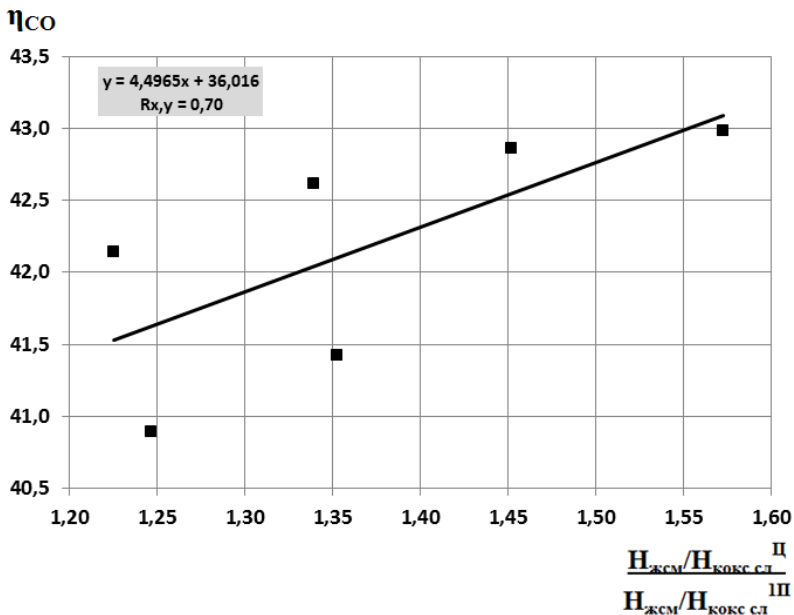
Выполненные исследования позволили сформулировать следующие рекомендации. Для эффективной загрузки порций дополнительного кокса необходимо контролировать соотношения значений показателя  $N_{жсм}/N_{кокс}$  в центральной и периферийно-промежуточной зонах. В случае нахождения этого показателя в диапазоне 0–1,35 ед., дополнительный кокс следует выгружать из угловых положений лотка БЗУ 3-1, что позволит подгрузить осевую зону печи дополнительным коксом, а при нахождении показателя в диапазоне 1,40–1,60 ед. – из угловых положений 8-4, что позволит равномерно распределить кокс по радиусу колошника и избежать чрезмерного развития осевого газового потока, сопровождающегося перерасходом твердого топлива (табл. 6.15).

Таблица 6.15

**Рекомендуемые варианты распределения дополнительных порций кокса по угловым положениям лотка БЗУ**

$\frac{(N_{жсм}/N_{кокс})_{Ц}}{(N_{жсм}/N_{кокс})_{1П}}$	Порция	Распределение материалов по угловым положениям лотка БЗУ, %							
		8	7	6	5	4	3	2	1
1,40–1,60	К 8-4	20	20	20	20	20			
0–1,35	К 3-1						33	33	34

Информация об изменении соотношений значений показателя  $N_{жсм}/N_{кокс}$  в центральной и периферийно-промежуточной зонах позволяет принимать обоснованные решения по выбору вариантов распределения дополнительных коксовых порций, которые, помимо своей основной функции – регулирования теплового состояния горна доменной печи, позволят обеспечить рациональное распределение газового потока, способствующее экономичному ходу доменной печи [167].



**Рис. 6.24.** Зависимость степени использования восстановительной способности газов ( $\eta_{CO}$ ) от соотношения показателя  $\frac{H_{ЖСМ}}{H_{КОКС\ сл}}$  в центральной и периферийно-промежуточной зонах колошника

## ГЛАВА 7

### УПРАВЛЕНИЕ ОКРУЖНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КОЛОШНИКЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОФИЛЕМЕРА

#### 7.1 Способы управления окружным распределением шихтовых материалов в доменных печах

Равномерный ход доменной плавки по окружности печи позволяет обеспечить высокие показатели по степени использования восстановительной способности газов и уменьшить расход энергоносителей [1, 168–170]. Нарушение работы печи по окружности приводит к уменьшению степени использования газов на 3–5% и увеличению расхода кокса на 5–15 кг/т чугуна, а стабильный перекоп поверхности засыпи более, чем на 0,5 м – к нарушению радиального распределения шихты. Изучению неравномерности окружного распределения шихты и газов в доменных печах посвящено большое количество исследований и разработок [1, 132, 171–182]. С учетом полученных в них результатов в обобщенном представлении, в работе [1] сформулированы основные положения управления окружным распределением шихты на колошнике доменных печей, оборудованных загрузочными устройствами с вращающимися распределителями шихты.

На доменных печах, в зависимости от их конструктивных особенностей и типа применяемого загрузочного устройства, могут возникать различные причины неравномерного распределения шихты и газов по окружности. В работе [183] неравномерность распределения материалов по окружности печи классифицирована как объемная, количественная и качественная. Под объемной неравномерностью понималась неравномерность распределения объемов материалов по окружности печи, под количественной – неравномерность масс материалов, а под качественной неравномерностью – соотношение различных фракций материалов по окружности печи [183]. Установлению критериев оценки окружного распределения шихты и исследованиям влияния распределения гранулометрического состава шихты по окружности на работу доменных печей, оснащенных конусными загрузочными устройствами, посвящены работы [177, 184]. На доменных печах, оснащенных скиповыми подъемниками и конусными загрузочными устройствами, одними из основных причин

возникновения окружной неравномерности являются особенности распределения шихты на малом конусе [169, 170, 173]. Поскольку окружная неравномерность, сформированная на малом конусе, сохраняется по всей высоте печи [169, 170], достаточно эффективным способом управления окружным распределением шихты на печах, оборудованных конусными загрузочными устройствами, является работа вращающегося распределителя шихты (ВРШ).

Применение роторных загрузочных устройств [175, 179], которые включают расположенный над поверхностью засыпи пятилопастный вращающийся распределитель, позволило более эффективно управлять сформированной на нижнем конусе [179] количественной неравномерностью окружного распределения шихты. Однако, при возникновении неисправностей в работе ВРШ данного загрузочного устройства, невозможно обеспечить изменение положения зоны сосредоточения мелких фракций шихты и, тем самым, создать направленную неравномерность окружного распределения для подавления локального увеличения интенсивности газового потока.

Распределители БЗУ обладают широкими возможностями управления как радиальным, так и окружным распределением шихты. На печах, оснащенных БЗУ, применение секторного и точечного режимов загрузки для выравнивания окружного распределения шихты малоэффективно, а иногда и нежелательно, поскольку реализация таких режимов возможна лишь в полуавтоматическом режиме, что вызывает сбои в используемых программах загрузки и приводит к нарушению радиального распределения шихты. В ИЧМ разработан ряд способов управления окружным распределением шихты и газов, широко применяемых на печах большого объема, оснащенных БЗУ [168, 172].

На доменных печах, оборудованных БЗУ, используют следующие способы управления окружным распределением шихтовых материалов:

- смена вида материала в бункерах загрузочного устройства;
- изменение направления вращения лоткового распределителя шихты;
- попарное смещение по окружности колошника начала открывания шихтовых затворов бункеров БЗУ при загрузке в печь каждые двух порций (подачи): железосодержащих и кокса, для сокращения названное «попарным перешагиванием» [168].

Для эффективного управления окружным распределением шихты и газов в доменной печи, распределитель шихты загрузочного устройства должен осуществлять как равномерное качественное и количественное распределение шихты по окружности, так и направленное неравномерное распределение, осуществляемое выгрузкой увеличенных или уменьшенных объемов порций шихты и мелких фракций в заданные секторы колошника. Для осуществления регулирующих воздействий на порядок загрузки шихтовых материалов необходимо контролировать форму профиля засыпи шихты на колошнике с помощью измерительных устройств – профиломеров, информация которых позволит расширить возможности управления распределением шихты [1]. Для использования информации профиломера при управлении окружным распределением, контроль поверхности засыпи шихты по окружности печи необходимо осуществлять непрерывно, как минимум в четырех секторах по окружности в периферийной зоне сечения колошника. Разрабатываемые на основе информации о распределении уровней засыпи и скоростей опускания шихты по окружности колошника, полученной с помощью стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты, способы управления окружным распределением должны препятствовать возникновению стабильных (системных) перекосов по окружности печи. Для обеспечения эффективного управления окружным распределением шихты и газов в доменной печи загрузочное устройство должно обеспечивать возможность реализации двух режимов – равномерного распределения шихты по окружности и направленного неравномерного с подачей увеличенных или уменьшенных объемов компонентов шихты в заданные секторы колошника.

Выполненный анализ показал, что для каждой конкретной доменной печи характерно индивидуальное соотношение влияния различных факторов, создающих окружную неравномерность. Обоснование выбора способа эффективного управления окружным распределением шихты и газов в доменной печи с помощью равномерного или направленного неравномерного качественного и количественного распределения шихты по окружности печи может быть выполнено на основе информации о состоянии поверхности засыпи шихты, получаемой профиломером.

## 7.2 Оценка окружного распределения шихтовых материалов в доменной печи радиолокационным профилемером.

С помощью установленной на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты выполнены исследования по оценке влияния используемых на печи способов управления на окружное распределение шихты.

Исследования и оценка влияния существующих способов управления окружным распределением шихтовых материалов на формирование профиля засыпи и слоев материалов в столбе шихты по сечению печи выполнены с учетом скорости опускания шихты, определяемой по разработанным методам, описанным в разделе 3. При этом использовались результаты обработки статистических данных о форме поверхности засыпи шихты, таких как: значения уровней засыпи перед выгрузкой ( $\bar{H}$ ) и после выгрузки ( $H_{\downarrow}$ ) каждой порции шихтовых материалов в печь и высоты слоев материалов ( $H_{сл}$ ), измеряемых в четырех точках кольцевых зон сечения колошника: периферийной – ПФ (0,35 м от стенки колошника), промежуточных – 1П (1,6 м от стенки колошника) и 2П (2,9 м от стенки колошника) и центральной – Ц (4,4 м от стенки колошника). Окружная неравномерность распределения этих параметров в зонах оценивалась по величине среднеквадратичного отклонения.

Исследования выполнялись для трех периодов работы печи I–16.10.04, II – 25.03.05 и III – 24.06.05 с использованием программ загрузки шихтовых материалов, в которых 9 последовательно выгружаемых порций шихты составляют один цикл (табл. 7.1). Оценка влияния смены вида шихтовых материалов в бункерах БЗУ и направления вращения лоткового распределителя показала следующее. При загрузке шихтовых материалов (К – кокс, ЖСМ – железосодержащие материалы) в печь из бункеров БЗУ (Б1 и Б2) на исходный уровень засыпи 0,8 м (по данным измерителей уровня засыпи в ПФ кольцевой зоне колошника) при вращении распределителя против часовой стрелки (период I), средняя за 8 часов высота слоев ЖСМ и К, выгруженных из 9–6, 9–3, 8–4 и 8–5 угловых его позиций, определенная по измерениям в 1П кольцевой зоне, была больше на 10–20% со стороны бункера, из которого выгружается материал (рис. 7.1 а, б). Указанное распределение высоты слоев рудных материалов в достаточной степени согласуется с результатами, полученными с помощью модели ИЧМ

(рис. 7.2) и при инструментальном измерении в ДП №9, выполненном при исследованиях распределения материалов перед задувкой печи [6].

Таблица 7.1

**Режимы загрузки ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в анализируемые периоды ее работы, 2004–2005 гг.**

Период работы печи, (дата)	Программа загрузки: угловые позиции лотка БЗУ: 9...1 <sup>1)</sup>									Уровень засыпи, м	Кол-во циклов загрузки	Направление вращения лотка БЗУ
	Шихтовые материалы: А – агломерат, О – окатыши, Ш <sub>0</sub> – шлак обогащенный, К – кокс.											
	Номер порции материалов											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Период I, (16.10.04, 10 циклов)	К 3-1	АШ <sub>0</sub> 9-6	К 8-5	АО 9-3	КО 3-1	КШ <sub>0</sub> 8-4	АО 8-4	К 8-4	АО 9-3	1,2	10	против часовой стрелки
Период II, (25.03.05, 9 циклов)	К 3-1	АШ <sub>0</sub> 9-5	К 8-4	АО 9-4	К 4-1	К 8-4	АО 9-4	К 8-4	АО 9-3	1,2	9	по часовой стрелке, 16-24 ч.
Период III, (24.06.05, 9 циклов)	К 3-1	АШ <sub>0</sub> 9-5	К 8-4	АО 9-3	К 4-1	К 8-4	АШ <sub>0</sub> 9-4	К 7-3	АО 9-3	1,2	9	по часовой стрелке, 16-24 ч.

<sup>1)</sup> Углы наклона лотка БЗУ по позициям: 9-46,2°; 8-45,4°; 7-42,8°; 6-40,1°; 5- -37,4°; 4-34,7°; 30-30,9°; 2-26,9°; 1-22,0°.

Для периода I работы печи получены графики изменения высот слоев выгружаемых железосодержащих материалов и кокса, которые характеризуют влияние конструктивных особенностей БЗУ на равномерность распределения материалов по сечению печи. Причем, представленные на рис. 7.1а графики изменения высоты слоя для случая выгрузки из Б1 железосодержащей части шихты ( $H_{сл}^{II} жсмБ1$ ), а из Б2 – кокса ( $H_{сл}^{II} кБ2$ ) с пересечением кривых в сечениях ЧЛ2 и между ШП и ЧЛ4 на расстоянии 1,6 м от стенки печи согласуются с расположением центров “локальных зон”, полученных в результате моделирования расположения линий, образованных точками встречи центров тяжести потоков шихтовых материалов, выгружаемых с лотка БЗУ, с поверхностью засыпи шихты (рис. 7.2).

График, приведенный на рис. 7.1б, свидетельствует о расположении “локальных зон” на расстоянии 1,9 м от стенки печи

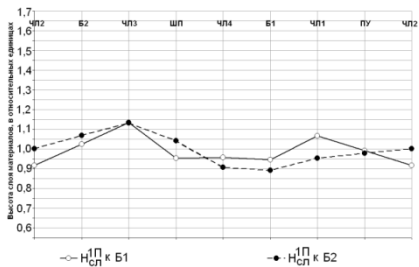
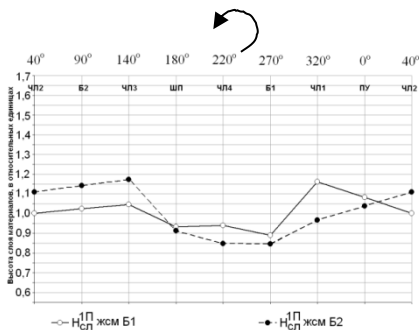


(рис. 7.2). Объяснением этому может быть особенность измерения, в связи с которой максимальная мощность отраженного сигнала находится не по оси луча, а смещена в пределах площади “пятна” измерения на поверхности засыпи. Также это может быть связано и с особенностью схода с лотка мелких фракций, которые движутся не по расчетным траекториям.

Для периода II, указанная выше закономерность изменения расположения высоты слоев материалов при вращении лотка БЗУ по часовой стрелке нарушается, что вызвано понижением исходного уровня засыпи по показаниям радиолокационных измерителей на периферии до 1,2 м, приводящего к приближению материала в сторону, противоположную от разгружаемого бункера, с образованием под ним слоя большей высоты. Это является следствием приближения линий, образованных пересечением точек встречи центров тяжести потоков шихтовых материалов, выгружаемых с лотка БЗУ, с поверхностью засыпи шихты к стенке печи на 0,2 м при снижении уровня засыпи от 0,8 м до 1,25 м. При этом, как следует из рис. 7.3 а, б, “локальные зоны” располагаются в секторах ЧЛЗ–ШП и ПУ–ЧЛ2. Подтверждением достоверности определения положения зон с пониженной газопроницаемостью являются характер распределения дутья по фурмам (рис. 7.5), из которого следует, что на фурмах, расположенных в секторе ЧЛЗ–ШП и ПУ–ЧЛ2, где находятся “локальные зоны”, наблюдается уменьшение расхода дутья, а также результаты, полученные с помощью модели ИЧМ (рис. 7.4).

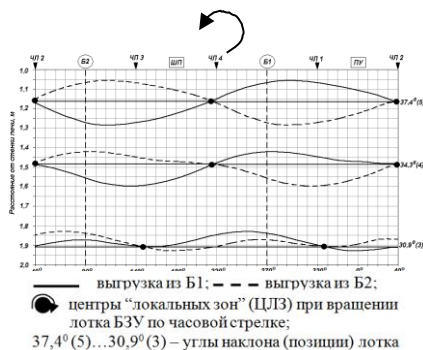
Аналогичные результаты были получены при загрузке печи в периоде – III ее работы на уровень засыпи – 1,3 м, где образование слоев большей высоты наблюдалось в секторах печи, противоположных от разгружаемых бункеров БЗУ (рис. 7.6 а, б), что может быть объяснено так же, как и для периода II, уменьшением уровня засыпи шихты.

Исследования, направленные на установление влияния направления вращения лоткового распределителя на равномерность окружного распределения шихтовых материалов в печи, были выполнены для тех же трех периодов работы печи – I, II и III, причем для периода – I было характерно вращение лотка против часовой стрелки, а для двух других – по часовой стрелке. Установлено, что при вращении лоткового распределителя по часовой стрелке, сход шихты в печи более ровный, что подтверждает характер распределения скоростей опускания шихтовых материалов в четырех зонах сечения колошника (рис. 7.7).

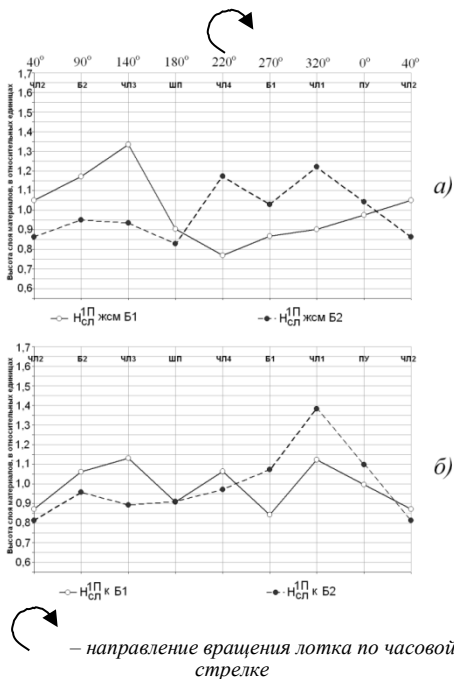


— направление вращения лотка против часовой стрелки

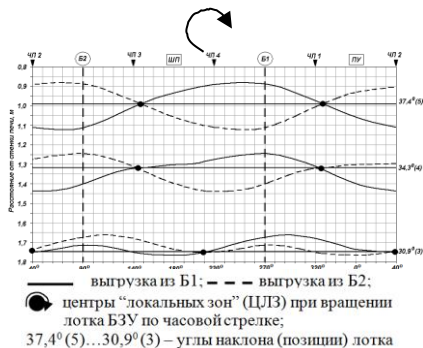
**Рис. 7.1.** Изменение средней высоты слоев материалов по окружности колошника после выгрузки из бункеров 1 и 2 порций шихтовых материалов: ЖСМ (а) и К (б) в течение 8 часов при вращении лотка БЗУ против часовой стрелки и выпуском продуктов плавки через ЧЛ2 и ЧЛ4 (период I).



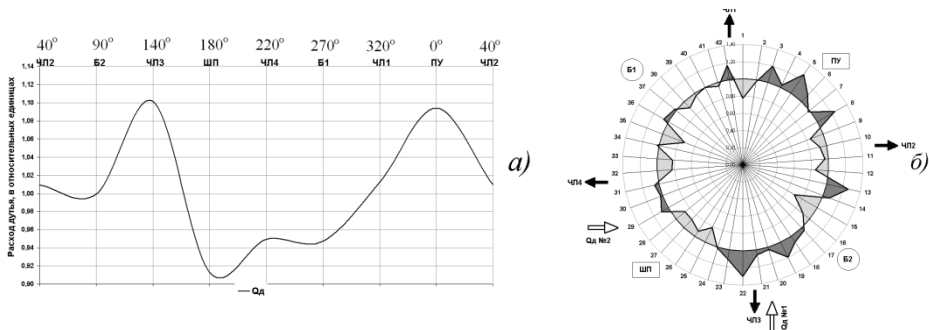
**Рис. 7.2.** Результаты моделирования расположения линий, образованных точками встречи центров тяжести потоков шихтовых материалов, выгружаемых с лотка БЗУ, с поверхностью засыпи шихты (горизонтальный уровень засыпи 0,8 м) на ДП №9.



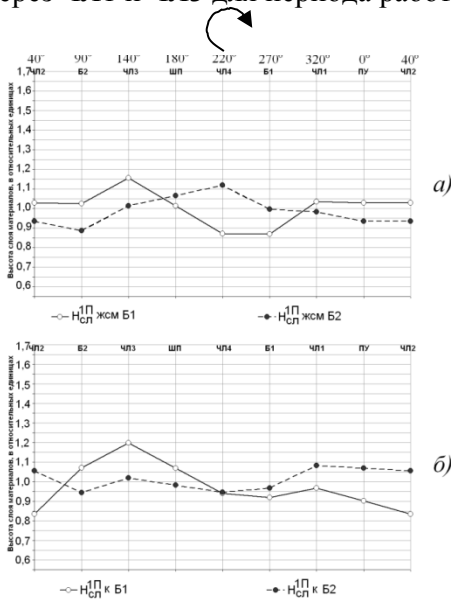
**Рис. 7.3.** Изменение средней высоты слоев материалов по окружности колошника после выгрузки порций шихтовых материалов: ЖСМ (а) и К (б) в течение 8 часов при вращении лотка БЗУ по часовой стрелке и выпуском продуктов плавки через ЧЛ1 и ЧЛ3 для периода работы печи П.



**Рис. 7.4.** Результаты моделирования расположения линий, образованных точками встречи центров тяжести потоков шихтовых материалов, выгружаемых с лотка БЗУ, с поверхностью засыпи шихты (горизонтальный уровень засыпи 1,25 м) на ДП №9.

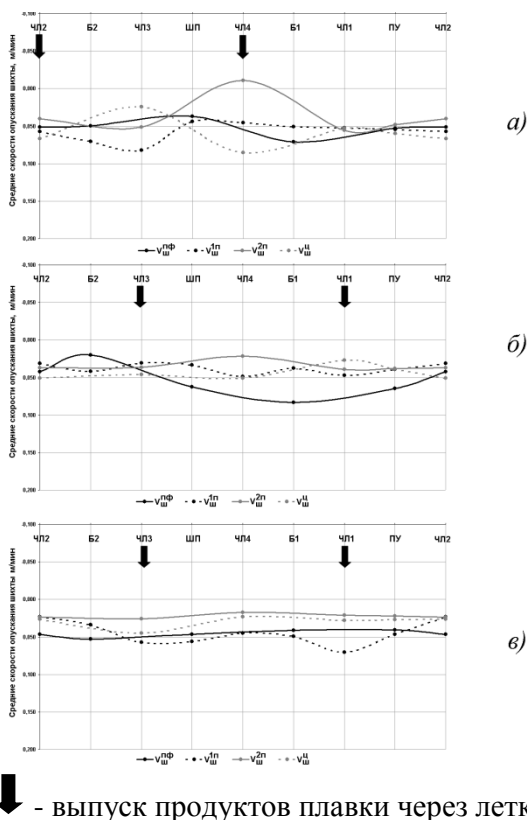


**Рис. 7.5.** Расход дутья по воздушным фурмам ДП №9 после выгрузки порций шихтовых материалов в течение 8 часов при вращении лотка БЗУ по часовой стрелке и выпуском продуктов плавки через ЧЛ1 и ЧЛ3 для периода работы печи II.



— направление вращения лотка по часовой стрелке

**Рис. 7.6.** Изменение средней высоты слоев материалов по окружности колошника после выгрузки порций шихтовых материалов: ЖСМ (а) и К (б) в течение 8 часов при вращении лотка БЗУ по часовой стрелке для периода работы печи III.



**Рис. 7.7.** Изменение скоростей опускания шихты по окружности колошника ДП №9 после выгрузки порций шихтовых материалов в течение 8 часов при вращении лотка БЗУ против часовой стрелки (а) и по часовой стрелке (б, в) для периодов работы печи I, II и III.

О ровности опускания шихты в печи можно судить по величине коэффициента вариации скоростей опускания шихтовых материалов в зонах сечения колошника. Коэффициент вариации ( $v_v^{cp}$ ) позволяет оценить относительную колеблемость скоростей опускания шихты в каждой из четырех зон сечения колошника. Как следует из табл. 7.2, величина коэффициента вариации скоростей опускания шихтовых материалов для периодов работы II и III с характерным для них вращением лотка по часовой стрелке меньше, чем для периода I, исключение составляет зона 1П.

Эти выводы подтверждают сделанные ранее на ДП №9 заключения о более ровном распределении дутья по фурмам при загрузке печи с вращением лоткового распределителя по часовой стрелке по сравнению с противоположным [178, 180].

Как показано ранее, в связи с выгрузкой шихты в кольцевые зоны не за целое число оборотов лотка, в ней образуются незамкнутые кольца, формирующие различную окружную неравномерность. Для ее выравнивания используют способ «попарного перешагивания», когда выгрузка следующей пары порций железосодержащих материалов и кокса начинается со смещенного на  $60^\circ$  положения лоткового распределителя.

Сложность оценки образования незамкнутых колец непосредственно после выгрузки шихтовых материалов за каждый оборот вращения лотка с помощью радиолокационной системы состоит в том, что при этом образуется слой материала, не превышающий значение 0,1 м, что находится в пределах погрешности измерения. С учетом этого, оценка влияния используемого на печи способа «попарного перешагивания» исполнена следующим образом. Для 10-ти циклов загрузки печи периода работы I (табл. 7.3, рис. 7.8) проанализированы профили поверхности засыпи шихты, образованные после выгрузки порций материалов: 2–А 9–6; 4–АО 9–3; 7–АО 8–4; 9–АО 9–3. Установлено, что при выгрузке порции 2–А 9–6, окружная неравномерность уровней засыпи шихты во втором цикле в зонах колошника наибольшая и значительно уменьшается к седьмому циклу, а затем вновь начинает возрастать.

Таблица 7.2

**Изменения величины среднеквадратичного отклонения  $\sigma_v^{cp}$  и коэффициента вариации  $v_v^{cp}$  скоростей опускания поверхности засыпи шихты в течение I, II и III периодов работы ДП №9**

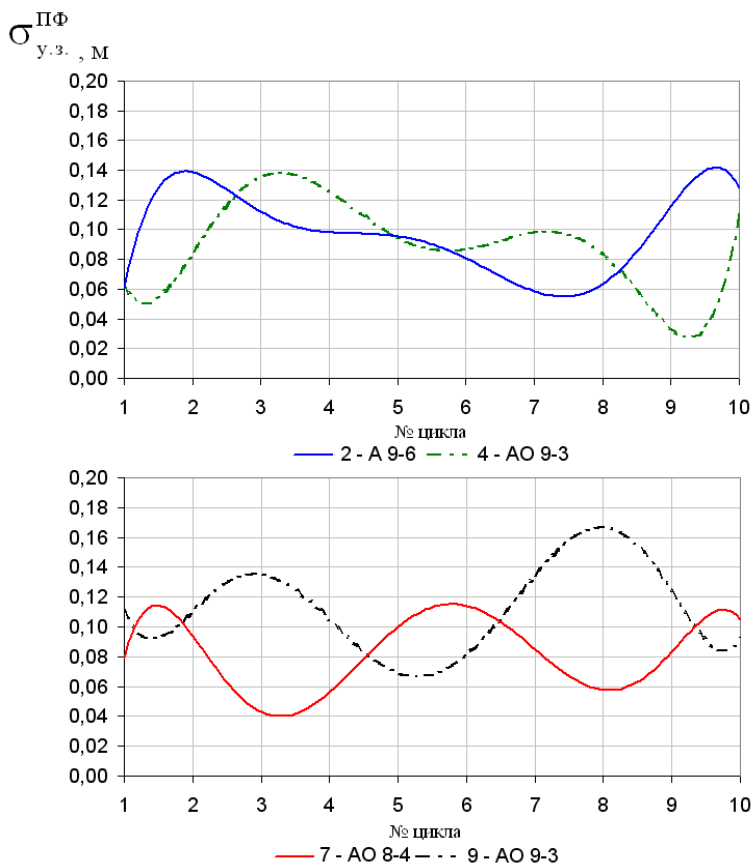
Период работы печи	числитель– $\sigma_v^{cp}$ , знаменатель– $v_v^{cp}$			
	ПФ	1П	2П	Ц
I	<u>0,015</u>	<u>0,018</u>	<u>0,040</u>	<u>0,036</u>
	0,274	0,216	0,421	0,403
II	<u>0,027</u>	<u>0,014</u>	<u>0,014</u>	<u>0,019</u>
	0,443	0,311	0,337	0,396
III	<u>0,008</u>	<u>0,018</u>	<u>0,015</u>	<u>0,013</u>
	0,200	0,328	0,301	0,395

Таблица 7.3

**Среднеквадратичные отклонения уровней точек поверхности  
засыпи шихты в ПФ зоне сечения колошника за 10 циклов  
загрузки**

№ цикла	$\sigma_{у.з.}^{ПФ}, М$			
	2 - А 9-6	4 - АО 9-3	7 - АО 8-4	9 - АО 9-3
1	0,056	0,059	0,081	0,112
2	0,163	0,102	0,085	0,110
ср 1,2	0,110	0,081	0,083	0,111
3	0,063	0,099	0,064	0,143
4	0,135	0,157	0,029	0,079
ср 3,4	0,099	0,128	0,047	0,111
5	0,094	0,079	0,121	0,099
<b>ср 1-5</b>	<b>0,102</b>	<b>0,099</b>	<b>0,076</b>	<b>0,109</b>
6	0,088	0,123	0,099	0,078
ср 5,6	0,091	0,101	0,110	0,089
7	0,009	0,027	0,101	0,106
8	0,121	0,149	0,044	0,197
ср 7,8	0,065	0,088	0,073	0,152
9	0,088	0,005	0,089	0,110
10	0,133	0,115	0,104	0,094
ср 9,10	0,111	0,060	0,097	0,102
<b>ср 6-10</b>	<b>0,088</b>	<b>0,084</b>	<b>0,087</b>	<b>0,117</b>
<b>ср 1-10</b>	<b>0,095</b>	<b>0,092</b>	<b>0,082</b>	<b>0,113</b>

При выгрузке порции 4-А 9-3 и 9-АО 9-3, окружная неравномерность уровней засыпи шихты в третьем и седьмом циклах в зонах колошника наибольшая, и значительно уменьшается к пятому и девятому циклам, а затем вновь начинает возрастать. При этом отклонения уровней по окружности колошника, образованные после выгрузки порции 9-АО 9-3, компенсируют отклонения, образованные после выгрузки предшествующей ей в цикле загрузки железорудной порции 7-АО 8-4, в результате чего происходит выравнивание поверхности засыпи по окружности колошника. Выравнивание окружной неравномерности по истечении нескольких циклов загрузки является подтверждением влияния способа «парного перешагивания» на распределение материалов по сечению колошника.



**Рис. 7.8.** Изменение среднеквадратичных отклонений уровней точек поверхности засыпи в ПФ зоне сечения колошника за 10 циклов загрузки периода I работы печи.

Таким образом, исследования с помощью радиолокационной системы влияния существующих способов управления окружным распределением шихтовых материалов на формирование профиля засыпи, позволили сделать следующее заключение:

– подтверждено влияние смены вида шихтовых материалов в бункерах БЗУ и направления вращения лоткового распределителя шихты на формирование профиля засыпи по сечению колошника и связь «локальных зон» с газораспределением в печи. Эти результаты могут быть использованы при выборе периодичности



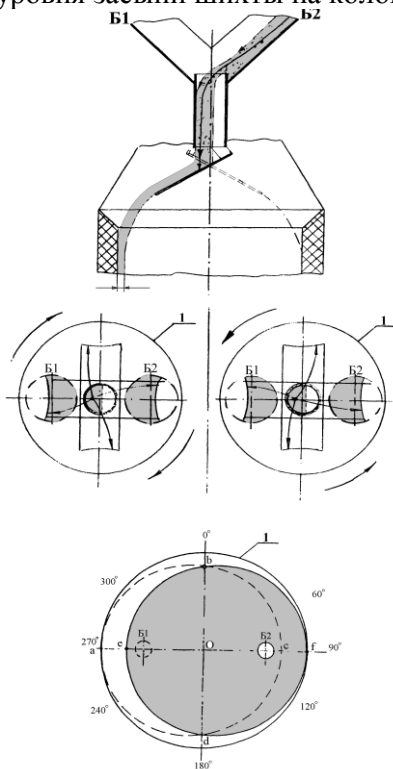
применения указанных управляющих воздействий для выравнивания окружной неравномерности распределения шихты и газового потока в печи;

– подтверждено положительное влияние «попарного перешагивания» начала выгрузки шихтовых материалов из бункеров БЗУ по гаражным положениям лоткового распределителя на выравнивание окружной неравномерности.

### **7.3 Рекомендации по совершенствованию технологических способов управления окружным распределением материалов в печи**

Исследованиями, выполненными в ИЧМ установлено, что линия точек встречи центров тяжести потоков материала с поверхностью засыпи представляет собой окружность неправильной формы, причем ее условный центр смещен к стенке печи относительно вертикальной ее оси. Образование ориентированной окружной неравномерности распределения шихты по сечению колошника (рис. 7.9) обусловлено влиянием конструктивных особенностей БЗУ – параллельным расположением шихтовых бункеров и отсутствием накопительной емкости перед выгрузкой материала на лоток, приводящих к смещению потока материалов в центральной трубе. Неосевое заполнение материалом сечения центральной трубы и воздействие кориолисовой силы на материал при движении по лотку приводит к повышению ориентированной неравномерности окружного распределения шихты по сечению колошника из-за изменения характеристик сходящего с распределительного лотка потока материала в пределах каждого оборота распределителя [1, 168, 174, 175, 178, 180]. При этом, точки встречи с поверхностью засыпи центров тяжести потока, сходящего с лотка, в момент, когда последний разгружает материал в сторону, противоположную от установки разгружаемого бункера, максимально удалены (в пределах оборота распределителя) по радиусу от стенки печи, а в сторону разгружаемого бункера – минимально. Аналогично материал разгружается из другого бункера. При выгрузке материала одного вида из разных бункеров, в любом угловом положении распределителя при неизменном направлении вращения, угловые координаты максимальных радиусов, также как и минимальных смещены по окружности, примерно на  $180^\circ$ , т.е. смена бункеров изменяет положения максимальных (минимальных) радиусов на диаметрально противоположные.

Для двух бункеров БЗУ пересечение окружностей, образованных центрами тяжести потоков материалов с поверхностью засыпи, происходит в точках изменяющих свое положение на поверхности засыпи в зависимости от углового положения, направления вращения лотка БЗУ и уровня засыпи шихты. Совокупность этих точек в секторах поверхности засыпи образует периферийные (для угловых положений лотка 9...4) и промежуточные (для 3...1 угловых положений) «локальные зоны» с более плотной укладкой шихты, особенно мелочи рудной сыпи [168, 180]. Расположение этих «зон» зависит от конструкции, углового положения распределительного лотка и направления его вращения, а также от уровня засыпи шихты на колошнике печи.



*1 – окружность колошника; 0°...300° – станции лотка БЗУ; Б1-Б2 – бункеры БЗУ; а, b, с, d – точки окружности получаемые при выгрузке материала из Б1; e, b, f, d – точки окружности получаемые при выгрузке материала из Б2.*

**Рис. 7.9.** Образование неравномерности окружного распределения шихты на поверхности засыпи при загрузке доменной печи БЗУ

В «локальных зонах» по всей высоте печи формируется столб шихты с пониженной газопроницаемостью, уменьшающей расход дутья на фурмы, расположенные в секторе под «локальными зонами», увеличивая его в секторах между «зонами», и существенно влияющий на окружное и радиальное газораспределение в печи [168, 180].

При многокольцевой выгрузке порции из бункеров БЗУ лоток, в зависимости от массы разгружаемого материала и угла раскрытия шихтового затвора, совершает до 10–12 оборотов (колец), что для каждого углового положения составляет 2–3 оборота (кольца). Так как на большинстве доменных печей, оборудованных БЗУ, перевод из одного углового положения в другое в рамках выгрузки порции производится после выгрузки заданной массы, а скорость вращения лотка – постоянна, то в зависимости от величины раскрытия шихтового затвора, заданной массы шихты и ее гранулометрического состава, последние кольца при выгрузке частей порции в каждое угловое положение могут быть не замкнуты. В определенных секторах колошника, где последние кольца разомкнуты, образуются зоны, отличающиеся величинами рудной нагрузки или объемов материалов, что является одним из факторов, определяющих окружную неравномерность распределения шихты и газового потока в печи. Попытки совместить количество выгружаемого материала по массе и замкнутым кольцам при существующей в Украине гранулометрии шихтовых материалов, не принесли желаемого результата. Поэтому существуют способы компенсации окружной неравномерности шихты, обеспечивающие уменьшение имеющейся или образование необходимой (компенсационной) неравномерности распределения шихтовых материалов по окружности колошника [1, 168]. Для управления, в способах использованы, так называемые, гаражные положения лотка по окружности колошника (не менее 6 точек через 60°), которые в первоначальном варианте управления служили для остановки лотка после выгрузки каждой порции. В связи с переходом по предложению ИЧМ в 1978 году на постоянное вращение лотка, необходимость в гаражных положениях отпала, однако для управления окружным распределением они оставлены на всех печах, оснащенных БЗУ. Равномерное распределение шихтовых материалов в разработанных способах обеспечивается попарным началом выгрузки кокса и железосодержащих материалов при прохождении лотком одного гаражного положения и началом выгрузки каждой следующей пары порций в следующих гаражных

положениях через  $60^\circ$  (способ «попарного перешагивания»). Начало выгрузки определяется открыванием шихтового затвора бункера БЗУ при прохождении лотком заданного гаражного положения. Поворотом по окружности печи незамкнутых частей колец компенсируют неравномерность распределения шихты. Для выравнивания скорости опускания шихтовых материалов в заданных секторах по окружности печи со смещением начала выгрузки (перешагиванием) через  $60^\circ$  разгружают один из видов материала, оставляя начало выгрузки другого в одном определенном или нескольких гаражных положениях. Или же начало выгрузки порции одного материала, например, кокса совмещают с одним или несколькими ближайшими гаражными положениями, а другого (в данном примере – железорудного) с другим или другими с ближайшими к последнему гаражными положениями, тем самым обеспечивая, с одной стороны, по окружности печи требуемое уменьшение (увеличение) рудной нагрузки, а с другой – ее увеличение (уменьшение). Для выравнивания профиля поверхности засыпи, начало выгрузки порций кокса и железосодержащих материалов устанавливают в одном или нескольких ближайших определенных гаражных положениях [1, 132, 168].

В настоящее время одним из способов выравнивания окружной неравномерности, который используется на ДП №9, является смена вида материала, выгружаемого из бункеров (Б1 и Б2) БЗУ, и направления вращения лоткового распределителя шихты. С помощью этих способов можно управлять положением «локальных зон» [185]. Разработаны рекомендации по выбору интервалов времени между сменой направления вращения лотка и вида шихтовых материалов в бункерах, при условии, что внутри каждой смены они должны обеспечивать равномерность износа оборудования БЗУ. Варианты таких комбинаций, обеспечивающих заданные требования к устойчивости образованных зон, или к их нивелированию, представлены в табл. 7.4.

Из таблицы видно, что в варианте 1 частота смены направления вращения и вида материала в бункерах – одинакова и составляет 12 подач. Отсюда, при вращении по часовой стрелке, кокс будет постоянно разгружаться в печь из Б1 (К-Б1), а смесь железорудных материалов из Б2 (См-Б2). При вращении против часовой стрелки – См-Б1, К-Б2.

Таблица 7.4

**Варианты комбинаций продолжительностей между сменой направления вращения распределителя и вида материала в бункерах БЗУ**

		1)		2)		3)		
		Смена вида материала в бункерах, подач						
		12		12		12		
		Смена направления вращения, подач						
		12		36		48		
№№ подачи	Направление вращения	Б1	Б2	№№ подачи	Направление вращения	Б1	Б2	
								№№ подачи
1	ПРОТИВ ЧАСОВОЙ СТРЕЛКЕ	К	СМ	1	ПО ЧАСОВОЙ СТРЕЛКЕ	К	СМ	
2		К	СМ	2		К	СМ	
3		К	СМ	...		...	...	
4		К	СМ	12		К	СМ	
...	ПРОТИВ ЧАСОВОЙ СТРЕЛКЕ	...	...	13	СМ	К	12	
12		К	СМ	14	СМ	К	13	
13		СМ	К	...	...	...	14	СМ
14		СМ	К	24	СМ	К	24	СМ
15		СМ	К	25	К	СМ	25	К
16		СМ	К	26	К	СМ	26	К
...		...	...	...	...	...	...	СМ
24		СМ	К	36	К	СМ	36	К
				ПРОТИВ ЧАСОВОЙ СТРЕЛКЕ	СМ	К	37	
					СМ	К	38	
					...	...	...	
					СМ	К	48	
					К	СМ	49	
					К	СМ	50	
					...	...	...	
					К	СМ	60	
					СМ	К	61	
					СМ	К	62	
					...	...	...	
					СМ	К	72	
					...	...	73	
					...	...	74	
				...	...	84		
				...	...	85		
				...	...	86		
				...	...	...		
				СМ	К	96		

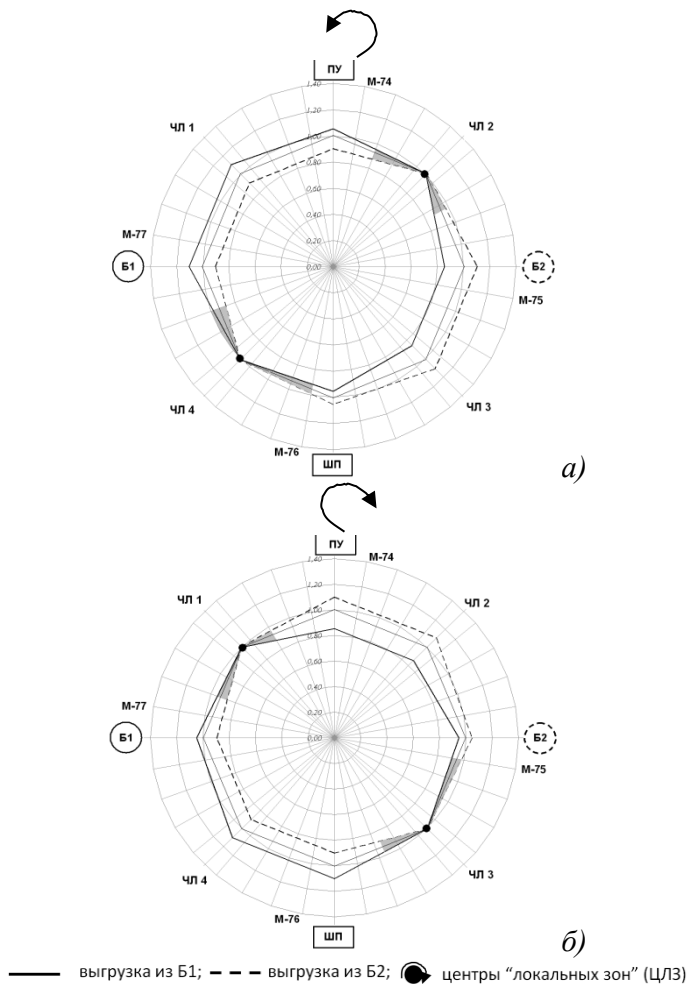
В варианте 2 (табл. 7.4) частота смены направления вращения – 36 подач, а вида материала в бункерах – 12 подач. При этом, при вращении по часовой стрелке, преимущественна выгрузка в печь кокса из Б1 (К-Б1), а при вращении против часовой стрелки – К-Б2. Преимущественная выгрузка смеси железорудных материалов будет выполняться из бункеров противоположных выгрузки кокса: вращение по часовой стрелке См-Б2, вращение против часовой стрелки См-Б1.

В варианте 3 (табл. 7.4), где частота смены направления вращения – 48 подач, а вида материала в бункерах – 12 подач, преимущественная выгрузка какого-либо материала из бункеров при вращении по и против часовой стрелки, как и в варианте 1 – отсутствует.

Во всех вариантах периодичность смены направления вращения лотка и смены вида материала в бункерах – постоянная, а частота каждой смены – разная. Задавая частоту (продолжительность) каждого воздействия совместно или раздельно, можно управлять неравномерностью распределения шихтовых материалов по окружности колошника.

Для обоснованного выбора варианта комбинаций интервалов времени между сменой направления вращения лоткового распределителя и вида материала в бункерах БЗУ (согласно табл. 7.4) разработана форма представления информации, обеспечивающая персоналу цеха необходимый объем информации, полученной с помощью профилемера и характеризующей окружное распределение шихтовых материалов в печи. На видеокadre (рис. 7.9, а) в полярной системе координат отображено распределение высот слоев шихтовых материалов в первой промежуточной зоне по периметру колошника, образованных после загрузки печи в течение заданного интервала времени при установленном направлении вращения лотка. При этом, точки пересечения кривых характеризуют расположение зон с пониженной газопроницаемостью. На видеокadre (рис. 7.9, б) таким же образом отображается распределение высот слоев шихтовых материалов в этой же зоне периода работы печи с противоположным вращением лоткового распределителя.

Оценка во времени динамики изменения расположения зон с пониженной газопроницаемостью может быть использована в перспективе для выбора рациональной частоты смены направления вращения лоткового распределителя при различной интенсивности плавки и темпе загрузки печи.



**Рис. 7.9.** Высота слоев шихтовых материалов в относительных единицах для двух периодов работы печи при вращении лоткового распределителя против часовой стрелки (а) и по часовой стрелке (б) соответственно.

Представленное на видеокадре (рис. 7.9) расположение линий распределения высот слоев шихтовых материалов по периметру колошника печи, образованных после выгрузки шихтовых материалов из бункеров БЗУ (Б1 или Б2), а также

относительные отклонения этих высот от средней величины, позволяют оценить окружную неравномерность распределения выгружаемых из каждого бункера шихтовых материалов.

Таким образом, радиолокационная система измерения профиля поверхности засыпи на ДП №9 позволяет повысить эффективность используемых способов управления окружным распределением шихтовых материалов на основе контроля положения «локальных зон», что открывает возможности разработки новых управляющих воздействий на процесс загрузки шихты.

#### **7.4 Разработка способа управления окружным распределением шихтовых материалов в печи с использованием показаний системы измерения профиля поверхности засыпи.**

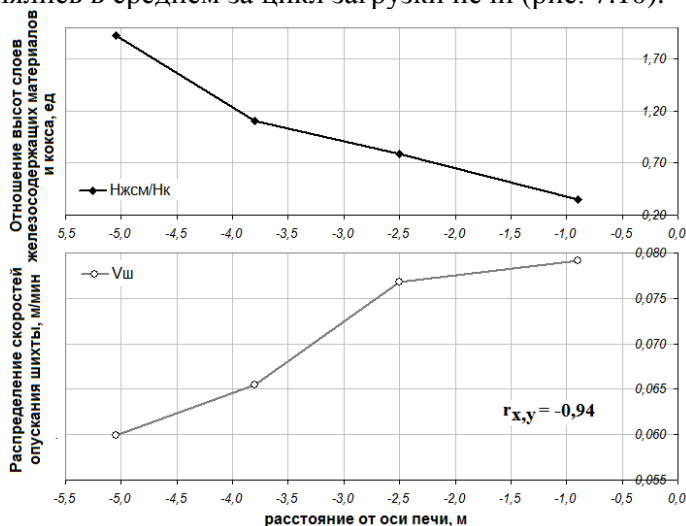
Возможность управления ходом процесса плавки по окружности печи обеспечивает увеличение степени использования восстановительной способности газов и уменьшение расхода энергоносителей. Наиболее эффективное управление газодинамическим режимом доменного процесса может быть достигнуто совместным применением управляющих воздействий «сверху» и «снизу» [186]. Между распределением шихтовых материалов по окружности колошника и распределением дутья по фурмам существует качественная взаимосвязь: изменение расходов дутья через группу фурм влечет за собой изменение характера газового потока в соответствующем секторе печи, а изменение распределения материалов по окружности колошника влияет на газопроницаемость у фурм, т. е. на расходы дутья по фурмам [186], что подтверждено предыдущими исследованиями (раздел 7.2).

Как отмечено в разделе 7.1, для компенсации окружной неравномерности распределения шихтовых материалов и газового потока в печи, вызванной незамкнутостью колец при выгрузке из бункера порций материалов, на ДП №9 используется способ, обеспечивающий уменьшение неравномерности распределения шихтовых материалов по окружности колошника за счет попарного начала выгрузки кокса и железосодержащих материалов из одного гаражного положения лоткового распределителя шихты и затем изменения начала выгрузки каждой последующей пары порций через 60°. В то же время, на печи может дополнительно возникать стабильная во времени неравномерность распределения шихтовых материалов и газов. Для компенсации указанной неравномерности с использованием информации



радиолокационного профилемера разработан способ создания ориентированной неравномерности распределения шихтовых материалов, обеспечивающий изменение объема шихтовых материалов или рудной нагрузки в заданном секторе по окружности колошника [187].

Изменение объемов шихтовых материалов, выгружаемых из заданных позиций лоткового распределителя, в зависимости от скоростей опускания шихты на колошнике при сохранении постоянной средней рудной нагрузки за цикл загрузки является одним из способов формирования заданного профиля поверхности засыпи. Обоснованием возможности уменьшения (увеличения) скорости опускания шихты увеличением (уменьшением) рудной загрузки явилась, установленная в результате исследований, обратная связь косвенного показателя рудной нагрузки – отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса и скорости опускания шихты. Указанная зависимость, для которой коэффициент достоверности аппроксимации двух величин составил  $r_{x,y} = -0,94$ , была получена в результате анализа параметров работы ДП №9 в течение двух суток при постоянных программе загрузки и параметрах газодутьевого режима. При этом, величины отношений высот слоев и скоростей опускания шихты определялись в среднем за цикл загрузки печи (рис. 7.10).



**Рис. 7.10.** Изменение отношения слоев железосодержащих материалов и кокса и скоростей опускания шихты по радиусу колошника печи

Разработанный способ заключается в следующем. По показаниям системы измерения профиля поверхности засыпи определяется сектор окружности колошника с отличающейся в течение цикла загрузки скоростью опускания на 0,5 м/ч и (или) стабильным перекосом профиля поверхности засыпи на 0,5 м. Установленную разницу в скоростях опускания шихтовых материалов и (или) перекос профиля поверхности засыпи по окружности печи компенсируют путем выгрузки в определенный с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи сектор большего (меньшего) количества железосодержащих и кокса или одного из материалов, в зависимости от требуемой компенсации: объема или рудной нагрузки. Причем прохождение сектора, в котором требуется указанная компенсация, вращающимся распределителем при выгрузке в первом, по ходу загрузки порции, угловом положении на один раз больше для увеличения количества материала в секторе печи или на один раз меньше для его уменьшения, обеспечивается при необходимости путем изменения времени выгрузки порции [187]. Поскольку время выгрузки порции регламентируется пропускной способностью системы загрузки, то увеличение или уменьшение времени выгрузки порции для реализации разработанного способа может быть кратковременным, т.е. устанавливаться на один или несколько циклов загрузки, в котором перевод лотка будет осуществляться по программе, необходимой для создания компенсационной неравномерности.

Необходимым условием реализации способа управления окружным распределением шихты является контроль уровней точек поверхности засыпи в периферийной и промежуточной зонах сечения колошника, согласно сформулированным в разделе 2 требованиям к установке измерителей, не менее, чем в шести точках.

Реализация предложенного способа осуществляется по алгоритму, предусматривающему следующую последовательность операций. По показаниям измерителей, входящих в состав радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике, установленных в периферийной и промежуточной зонах сечения колошника, определяют средние уровни засыпи по окружности колошника и их отклонения. Выполняется проверка условия:

$$(Y_{\max} - Y_{\min}) \geq 0,5M, \quad (7.4.1)$$

где  $Y_{\max}$ ,  $Y_{\min}$  – максимальный и минимальный средний уровень

засыпи шихты по окружности колошника за цикл загрузки.

Если условие (7.4.1) выполняется, определяются отклонения значений уровней засыпи в каждом секторе от разницы максимального и минимального уровней ( $\Delta$ ). Затем определяется сектор, для которого  $\Delta \rightarrow \max$ , в котором необходимо увеличить, выгружаемый в сектор объем материала, и определяется сектор, в котором необходимо уменьшить объем материала, для которого  $\Delta \rightarrow \min$ . Выбор варианта уменьшения или увеличения объема материала, выгружаемого в заданные сектора, основывается на условии большего количества секторов печи по окружности, для которых величина  $\Delta$  превышает или не превышает 0,5 м. Для реализации указанных вариантов при прохождении лотком заданных гаражных положений для следующего цикла загрузки печи выдается команда на начало открывания ШЗ по алгоритму, представленному в табл. 7.5, где приведены гаражные положения, при прохождении лотком которых должно начинаться открывание ШЗ с учетом угла заноса материала. Угол заноса соответствует углу поворота лотка за время движения переднего фронта шихтового материала от шибера ШЗ по трактам БЗУ и лотку до поверхности засыпи. Величина угла заноса определяется экспериментальным путем перед задувкой печей после капитального ремонта. Для условий ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» величина угла заноса составляет 180°. При выполнении условия (7.4.1) для одного и того же сектора печи более двух циклов загрузки подряд, в этом секторе с уровнем засыпи ниже (выше), чем у остальных, необходимо после второго подряд увеличения (уменьшения) выгружаемого объема, увеличить (уменьшить) рудную нагрузку.

Для этого определяют средние скорости опускания шихты по окружности колошника за цикл загрузки, проверяется условие:

$$\left| V_{Шi} - (V_{Ш\max} - V_{Ш\min}) \right| \geq 0,5 \text{ м/ч} \quad (7.4.2)$$

где  $V_{Шi}$  – средняя скорость опускания шихты в секторе с уровнем засыпи ниже (выше), чем у остальных в течение двух циклов загрузки подряд,  $V_{Ш\max}$ ,  $V_{Ш\min}$  – максимальная и минимальная средняя скорость опускания шихты по окружности колошника за цикл загрузки.

Таблица 7.5

**Гаражные положения, при прохождении лотком которых  
начинается открывание ШЗ  
(с учетом угла заноса материала 180°)**

Сектор с уровнем засыпи ниже остальных $\Delta \rightarrow \max$	Гаражные положения лотка БЗУ	
	Направление вращения лотка	
	По часовой стрелке	Против часовой стрелки
300°–0°	120°	180°
0°–60°	180°	240°
60°–120°	240°	300°
120°–180°	300°	0°
180°–240°	0°	60°
240°–300°	60°	120°
Сектор с уровнем засыпи выше остальных $\Delta \rightarrow \min$		
300°–0°	180°	120°
0°–60°	240°	180°
60°–120°	300°	240°
120°–180°	0°	300°
180°–240°	60°	0°
240°–300°	120°	60°

При выполнении условия (7.4.2) определяют знак отклонения скорости опускания шихты в заданном секторе по разнице максимальной и минимальной скорости опускания по окружности, при этом управление окружным распределением осуществляют следующим образом. При указанном отклонении средней за цикл загрузки скорости опускания шихты в заданном секторе печи, для уменьшения скорости опускания в этом секторе, увеличивается рудная нагрузка, или уменьшается для случая необходимости увеличения скорости опускания. Для этого, команды на начало открывания ШЗ выполняются в соответствии с алгоритмом, представленном в табл. 7.6.

Для увеличения рудной загрузки, в указанных в табл. 7.6 секторах печи, управление гаражными положениями производится при выгрузке железосодержащих порций, что обеспечивает увеличение массы железосодержащих в заданном секторе. Порции кокса при этом выгружаются в режиме «перешагивания», т.е. каждая последующая порция выгружается с шагом 60° по окружности колошника. Увеличение рудной нагрузки можно также

обеспечить и уменьшением массы кокса в секторе. Однако изменение массы кокса дает большее изменение объемов.

Таблица 7.6

**Гаражные положения, при прохождении лотком которых начинается открывание ШЗ (с учетом угла заноса материала 180°)**

Сектор отклонения	Гаражные положения лотка БЗУ	
	Направление вращения лотка	
	По часовой стрелке	Против часовой стрелки
0°–60°	180°	240°
60°–120°	240°	300°
120°–180°	300°	0°
180°–240°	0°	60°
240°–300°	60°	120°
300°–0°	120°	180°

Для уменьшения рудной нагрузки управление гаражными положениями осуществляется для порций кокса, что приводит к увеличению массы кокса в заданном секторе. Порции железосодержащих материалов выгружаются в режиме «перешагивания». Уменьшение рудной нагрузки может быть реализовано также и путем уменьшения массы железосодержащих материалов в заданном секторе.

В качестве примера реализации на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» предложенного способа может быть рассмотрена следующая ситуация.

На печи, с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи шихты установлено наличие перекоса в 0,5 м уровня засыпи в течение цикла загрузки в секторе 0°–60°. В этом случае, для управления окружным распределением применяется вариант компенсации неравномерности выгружаемым объемом. Для этого из табл. 7.5 выбирается гаражное положение, из которого следует начинать выгрузку, и определяется число оборотов, за которое материал выгружается из первой, по ходу выгрузки порции, позиции. Для указанной программы при выгрузке порций железосодержащих материалов, лоток совершает  $n$  оборотов, при этом заданная масса материала составляет 17,48 т:

$$n = \frac{M_{\text{позиции}} \cdot t_{\text{выгр}}}{t_{\text{об}} \cdot M_{\text{порции}}} = \frac{17,48 \cdot 82,16}{7,5 \cdot 116,50} = 1,64 \text{ оборота, что соответствует}$$

одному полному обороту (6 секторов по 60°) и 3,86 образующей сектора при выгрузке на втором обороте лотка. Для компенсации объема в секторе 0°–60°, необходимо, чтобы лоток в первом, по ходу выгрузки порции, положении проходил указанный сектор три раза, а остальные сектора – два раза, переход лотка в этом случае в следующую, по ходу выгрузки, позицию должен осуществляться в секторе 60°–120°, т.е. осуществлять 2,17–2,33 оборота. Так как используемое число оборотов (1,64) меньше требуемого, необходимо увеличить время выгрузки до 108,47–116,47 с. Для увеличения количества оборотов лотка в первом, по ходу выгрузки, положении от 1,64 до 2,25 оборота, время выгрузки железосодержащих порций увеличено до 112,47 с.

Использование предложенного способа компенсации позволило увеличить уровень засыпи в заданном секторе, тем самым, ликвидировав окружную неравномерность распределения шихтовых материалов.

Подтверждением эффективности разработанного способа выравнивания окружного распределения шихтовых материалов являются результаты сопоставительного анализа технико-экономических параметров плавки на ДП №9 двух периодов работы печи. В первом периоде (базовом), в течение которого в составе АСУ не был реализован разработанный способ, печь в течение двух суток работала с перекосом уровней засыпи по окружности колошника, составившим, в среднем, 0,74 м. Во втором периоде – (сопоставимом), реализация в составе АСУ загрузкой разработанного способа позволила оперативно выравнивать возникающую на печи неравномерность уровней засыпи по окружности колошника. Для двух рассматриваемых периодов работы печи выполнен пофакторный сопоставительный анализ изменения удельного расхода кокса [141]. В результате расчетов получено, что ожидаемый расход кокса в сопоставимом периоде работы печи должен был составить 467,1 кг/т. чуг. (табл. 7.7). Фактическая же его величина для этого периода работы составила 459,7 кг/т. чуг., что на 7,4 кг меньше ожидаемого расхода кокса. Таким образом, использование способа управления окружным распределением шихты в автоматизированном режиме, позволяет обеспечить равномерное распределение шихты и газового потока по окружности печи, оцениваемое по равномерности распределения температур колошникового газа и

газа на периферии табл. 7.7), так и уменьшить удельный расход кокса.

Таблица 7.7

**Технологические параметры работы ДП №9 в базовом и сопоставимом периодах и результаты анализа влияния технологических факторов на удельный расход кокса для сопоставляемых периодов**

Параметры		Периоды работы печи		Изменения расхода кокса, ±кг/т
		базовый (14–15.01.2008)	сопоставимый (30–31.05.2008)	
Разница максимального и минимального уровней засыпи по окружности, м		0,75	0,25–0,5	
Производство, т/сутки		9283,0	9229,7	
Расход, кг/т.чуг.	кокс фактический	449,3	459,7	
	антрацит	33,4	26,1	+6,21
	известняк	1,7	15,9	+3,19
	скрап	70,48	67,14	+0,45
Содержание Fe в железорудной части шихты, %		56,11	55,9	+0,94
Дутье	расход ( $Q_{дл}^{пр}$ ), $\frac{M^3}{мин}$ $\frac{M^3}{т.чуг.}$	8012,3 1242,9	8396,4 1310,0	
	температура ( $T_{гд}$ ), °C	1059,7	1092	-4,06
	давление ( $P_{гд}$ ), ати	3,64	3,06	
	содержание O <sub>2</sub> , %	26,15	27,73	+2,13
Расход природного газа ( $Q_{пр}$ ), $\frac{M^3}{мин}$ $\frac{M^3}{т.чуг.}$		565,9 87,8	527,7 82,3	+3,82
Колошниковый газ	давление ( $P_{кол}$ ), ати	1,65	1,19	+4,13
	температура ( $T_{гто}^{ср}$ ), °C	91,7	87,2	
	$\sigma T_{гто}^{ср}$ , °C	15,2	11,5	
Химсостав колошникового газа, %	CO <sub>2</sub>	17,61	19,81	
	CO	26,37	26,97	
	H <sub>2</sub>	7,01	6,69	
	η	0,40	0,42	
Перепады давления, ати	общий ( $\Delta P_{общ}$ )	1,96	1,84	
	верхний ( $\Delta P_в$ )	0,44	0,37	
	нижний ( $\Delta P_н$ )	1,52	1,47	
Температура газа на периферии ( $T_{пф}^{ср}$ ), °C		322,5	254,2	
$\sigma T_{пф}^{ср}$ , °C		35,6	21,5	
$T_f$ , °C		2092,0	2228,7	
Химсостав чугуна, %	Si	0,82	0,93	+3,46
	Mn	0,22	0,24	+0,18
	S	0,011	0,015	-1,80
	P	0,0703	0,0692	-0,07
Показатель кокса, %	M10	7,9	7,7	-2,52
	M25	85,2	85,0	+0,54
	зола	11,5	11,7	+1,17
Изменения расхода кокса по факторам, кг/т [141, табл. 58]				<b>+17,77</b>
Ожидаемый расход кокса, кг/т.чуг.			<b>467,1</b>	
Экономия кокса, кг/т.чуг.			<b>7,4</b>	

Колеблемость температуры колошникового газа в сопоставимом периоде, по сравнению с базовым, уменьшилась на 3,7 °С, температуры газа на периферии – на 14,1 °С. Пример выравнивания окружной (неравномерности распределения шихты на колошнике печи с помощью способа управления окружным распределением для двух рассматриваемых периодов работы представлен на рис. 7.11. На рис. 7.11а показана окружная неравномерность уровней поверхности засыпи за цикл загрузки печи в базовом периоде, а на рис. 7.11б – в сопоставимом периоде при применении способа управления окружным распределением.

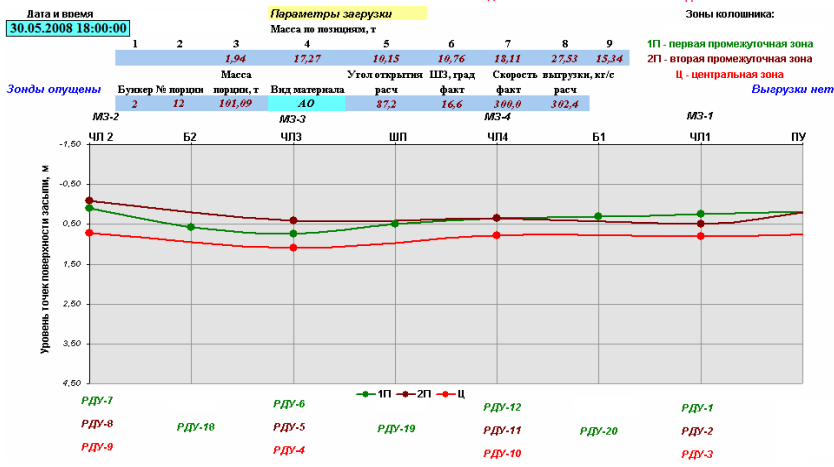
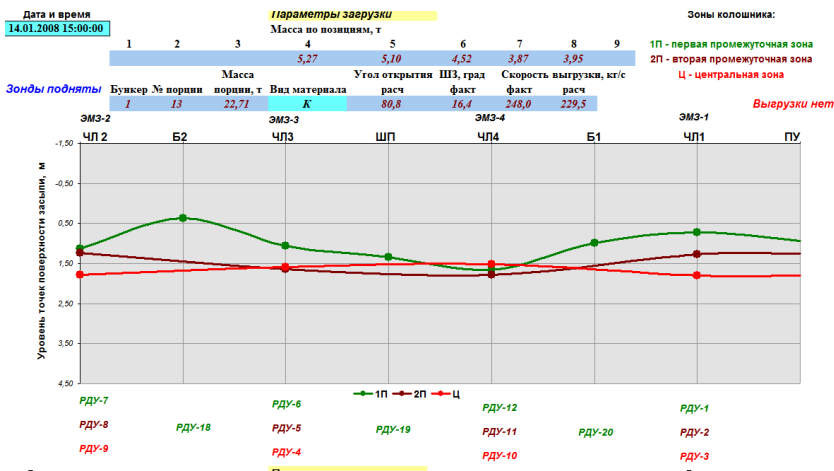


Рис. 7.11. Видеокадр распределения уровней поверхности засыпи шихты по окружности колошника за цикл загрузки печи



Как показали исследования, компенсация окружной неравномерности шихтовых материалов с помощью разработанного способа является одним из наиболее простых и надежных способов управления распределением шихтовых материалов по окружности печи, ввиду отсутствия на большинстве доменных печей контроля распределения дутья по окружности и, как следствие, отсутствия количественных зависимостей, характеризующих взаимосвязь верха и низа доменной печи.

Таким образом, с помощью радиолокационного профилемера оценено влияние существующих способов управления окружным распределением шихты на формирование поверхности засыпи и характер распределения скоростей опускания. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологических способов оценки и управления окружным распределением материалов путем выбора варианта комбинаций интервалов времени между сменой направления вращения лоткового распределителя и вида материала в бункерах БЗУ. Разработана форма представления информации, на которой представление окружного распределения шихтовых материалов в четырех зонах сечения колошника, выполнено в виде развертки значений уровней засыпи по окружности печи, что в полной мере отражает особенности окружного распределения шихты и позволяет персоналу цеха корректировать управляющие воздействия, направленные на создание максимально возможной окружной равномерности или заданной неравномерности с учетом расположения зон с пониженной газопроницаемостью по сечению колошника. С использованием информации профилемера разработан способ управления окружным распределением шихтовых материалов на колошнике доменной печи, позволяющий оперативно выравнять неравномерность окружного распределения шихты созданием направленной (компенсационной) неравномерности. Эффективность реализации разработанного способа в составе АСУ загрузкой ДП №9 подтверждена обеспечением, с его помощью, равномерного распределения шихты и газового потока по окружности печи, характеризуемого уменьшением неравномерности распределения температур колошникового газа и газа на периферии, а также уменьшением удельного расхода кокса на выплавку чугуна. Способ управления окружным распределением шихтовых материалов на колошнике реализован в составе АСУ загрузкой ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Использование способа управления окружным распределением шихты в автоматизированном режиме, позволило

обеспечить равномерное распределение шихты и газового потока по окружности печи, оцениваемое по равномерности распределения температур колошникового газа и газа на периферии, а также уменьшить удельный расход кокса. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения способа управления окружным распределением шихтовых материалов составляет 1041706 грн., что подтверждено соответствующим актом.

## **ГЛАВА 8 МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТИЧНОЙ ЗОНЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ ПРОФИЛЕМЕРА**

### **8.1 Обоснование возможности использования информации профилемера для определения положения пластичной зоны**

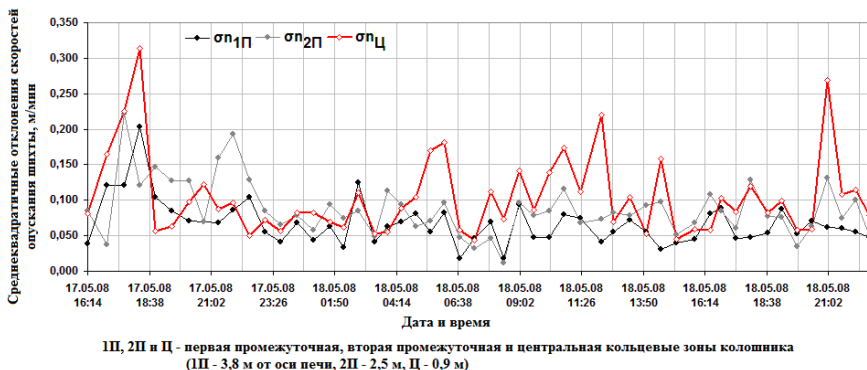
Анализ результатов исследований динамики изменения скоростей опускания поверхности шихтовых материалов в зонах сечения колошника ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», рассчитанных на основе показаний стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты, показал нестабильный характер их изменения во времени (рис. 8.1). При этом, для колеблемости скорости опускания шихтовых материалов, оцениваемой по величине среднеквадратичного отклонения в каждой кольцевой зоне, установлена периодичность проявления максимальной величины среднеквадратичного отклонения скорости, характерная для каждой зоны сечения колошника. Для установления причин, вызывающих периодические колебания скоростей на колошнике печи, выполнен анализ результатов исследований, приведенных в литературных источниках.

Гравитационное движение столба шихты в доменной печи происходит по мере высвобождения объема и при противодействии сил трения шихтовых материалов о стенки печи, подъемной силы газового потока и выталкивающей силы жидких продуктов плавки [101, 155, 188].

Рассчитанные на основе показаний системы скорости отражают изменение во времени положения различных участков поверхности засыпи, опускающейся под влиянием гравитационного движения столба шихты по мере освобождения объемов в различных его частях: 1) при горении кокса на фурмах; 2) при выпуске жидких продуктов плавки; 3) в ходе размягчения и плавления железорудной шихты (ЖРШ); 4) при окислении твердого углерода в зоне прямого восстановления оксидов.

Опускание поверхности под влиянием горения кокса на фурмах происходит практически равномерно, т.к. колебания, частота которых изменяется в пределах 0,1–1 Гц, при образовании и разрушении неустойчивых сводов, гасятся в нижней части печи [85]. Периодичность выпуска продуктов плавки на печи полезным объемом 5000 м<sup>3</sup> такова, что условия опускания материалов близки

к условиям при непрерывном выпуске. Специального изучения требуют условия опускания в ходе размягчения и плавления ЖРШ и при окислении твердого углерода в зоне прямого восстановления оксидов.



**Рис. 8.1.** График изменения среднеквадратичных отклонений скоростей опускания поверхности шихты в трех зонах сечения колошника

Подъемная сила и периодичность выпуска жидких продуктов плавки проявляются на доменных печах с большой глубиной зумпфа, работающих с большими временными интервалами между выпусками продуктов плавки (печи с «плавающим» «малоактивным коксовым конусом») [155]. Металлоприемник ДП №9 имеет большую глубину зумпфа (2,152 м), но из-за непрерывности процесса выпуска продуктов плавки через одну или две из 4-х леток, влияние периодичности их выпуска и подъемной силы значительно уменьшается или отсутствует.

Следовательно, влияние этого фактора на периодические колебания скоростей опускания шихты на колошнике печи, особенно в зонах, удаленных от стенки шахты, исключается. Причина же их возникновения может быть объяснена разрушением пустот в слоях материалов при их расплавлении. Это заключение согласуется с приведенными в работе [189] сведениями, согласно которым значительная доля пустот, вызывающих опускание шихты, формируется в зоне плавления материала. Как показано в работе [81], скорость опускания материалов изменяется, в частности, в зависимости от агрегатного состояния шихты: перейдя в жидкое состояние, железорудные материалы становятся

подвижнее и опускаются быстрее. Сведения о влиянии стекающего расплава на повышение потерь напора потока газов по высоте печи, представлены в работе немецких ученых [190]. Результаты исследований характера опускания шихтовых материалов в доменной печи, приведенные в работе [97], содержат сведения о непрерывных периодических колебаниях как абсолютных, так и относительных скоростей опускания материалов на колошнике, причиной которых, по мнению автора, является периодическое плавление железорудных материалов. Отсюда, следует предположение, что по характеру колебаний скоростей опускания шихты на колошнике доменной печи можно оценить положение пластичной зоны.

Эти соображения подтверждают и исследования, результаты которых приведены в работах [93, 98]. По мнению авторов, положение пластичной зоны по высоте доменной печи изменяется со скоростью периодических колебаний в пределах  $\pm 50$  мм/мин. Причиной этих колебаний является изменение объема пластичной зоны в 1,5–2 раза, вызванное влиянием выпусков продуктов плавки. При этом скорость опускания столба шихты возрастает, что отражается на уровне прогрева опускающихся масс шихты в зоне высоких температур. Таким образом, из приведенного следует, что колебания скоростей опускания шихты за определенные промежутки времени могут характеризовать изменения положения пластичной зоны по высоте печи.

Правомочность этих заключений подтверждается выполненной Никитиным Г. М. [100] аналитической оценкой газопроницаемости пластичной зоны на плоской модели, показавшей, что процессы, происходящие в ней, могут служить источником периодических ее изменений, частота которых пропорциональна скорости опускания шихты. С целью создания условий нестационарности процесса, автором [100] был использован прием загрузки в печь измененного слоя шихты. Установлено, что по величине промежутка времени от момента загрузки измененного слоя шихты до момента изменения нижнего перепада давления газа в печи, можно определить конфигурацию пластичной зоны (зоны размягчения и плавления).

Приведенные результаты анализа дают основание для использования информации о колеблемости скорости опускания поверхности засыпи шихтовых материалов по сечению колошника печи для определения положения пластичной зоны в доменной печи, которое изменяется в ходе плавки.

Для подтверждения связи положения пластичной зоны в печи с показаниями стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты были выполнены аналитические исследования особенностей оценки положения этой зоны с помощью разработанной в ИЧМ НАН Украины многозонной математической модели процессов доменной плавки (МПДП) [160].

Новый подход открыл дополнительные возможности анализа процессов и формирования мер по повышению эффективности плавки, включающие: выявление лимитирующей зоны по высоте и поперечному сечению печи; количественный учет повышенной тепловой нагрузки на газовый поток в периферийной зоне (за счет теплопотерь); учет перетоков газа на разных горизонтах из одних РКЗ в другие; оценку развития восстановительного процесса, в частности, степени прямого восстановления, в кольцевых сечениях по радиусу печи; установление влияния распределения материалов по радиусу печи на теплопотери, а также влияния всех технологических факторов на расход кокса с учетом изменения теплопотерь; оценку роли зоны размягчения и плавления (с учетом влияния степени восстановления железа и прихода щелочных оксидов) в формировании режимов плавки и соответствующих температурно-концентрационных полей печи.

Одним из ключевых параметров оценки условий опускания шихты является вычисляемый в МПДП насыпной объем слоев железорудной шихты (НОЖР,  $\text{м}^3/\text{т}$  чугуна), сокращение которого в различных частях столба с образованием свободного объема определяет характер движения материалов под влиянием размягчения и плавления ЖРШ. Аналогичный параметр для кокса (НОК,  $\text{м}^3/\text{т}$  чугуна) отражает образование свободного объема в различных частях столба при прямом восстановлении оксидов.

Расчеты параметров плавки на ДП №9 полезным объемом  $5000 \text{ м}^3$  ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» выполнили для одного из характерных периодов работы печи с распределением рудных нагрузок на колошнике –  $\text{PPH}_{\text{факт}}$ .

В табл. 8.1 приводятся результаты расчета НОЖР, а в табл. 8.2 – НОК для указанного распределения рудных нагрузок. Из приведенных данных следует, что в ВТЗ – 1–6 сокращение НОЖР незначительно (до 10 %), а ВТЗ – 7–9 происходит сокращение втрое. Величина НОК сокращается в тех же ВТЗ, что НОЖР (7–9), но всего лишь на 15%. Таким образом, при образовании пластичной зоны происходит скачкообразное сокращение объема

слоев ЖРШ в этих зонах, что соответственно, влияет на скорость опускания всего столба шихты. Следует отметить, что полученные результаты согласуются с приведенными в работе [85] данными, согласно которым объем расплавленных железосодержащих материалов почти в 3,5 раза меньше объема материалов, из которых они образуются.

Таблица 8.1

**Расчетные значения НОЖР ( $\text{м}^3/\text{т}$  чугу.) в различных зонах доменной печи**

РРН <sub>факт</sub>										
Зоны (ВТЗ)	РКЗ 1	РКЗ 2	РКЗ 3	РКЗ 4	РКЗ 5	РКЗ 6	РКЗ 7	РКЗ 8	РКЗ 9	РКЗ 10
1	0,078	0,116	0,087	0,087	0,100	0,115	0,117	0,118	0,119	0,120
2	0,077	0,113	0,086	0,085	0,099	0,113	0,115	0,116	0,116	0,116
3	0,077	0,113	0,086	0,086	0,098	0,112	0,115	0,115	0,116	0,114
4	0,074	0,109	0,083	0,083	0,095	0,109	0,111	0,112	0,113	0,108
5	0,072	0,106	0,081	0,080	0,092	0,106	0,108	0,109	0,110	0,103
6	0,070	0,103	0,078	0,078	0,089	0,102	0,105	0,106	0,107	0,099
7	0,066	0,093	0,072	0,072	0,081	0,092	0,095	0,095	0,096	0,063
8	0,031	0,044	0,033	0,033	0,038	0,044	0,045	0,045	0,045	0,043
9	0,026	0,036	0,029	0,029	0,033	0,036	0,036	0,036	0,036	0,039
10	0,022	0,031	0,024	0,024	0,028	0,031	0,032	0,032	0,032	0,032
11	0,022	0,031	0,024	0,024	0,027	0,031	0,032	0,032	0,032	0,032
12	0,022	0,031	0,024	0,024	0,027	0,031	0,032	0,032	0,032	0,032

Таблица 8.2

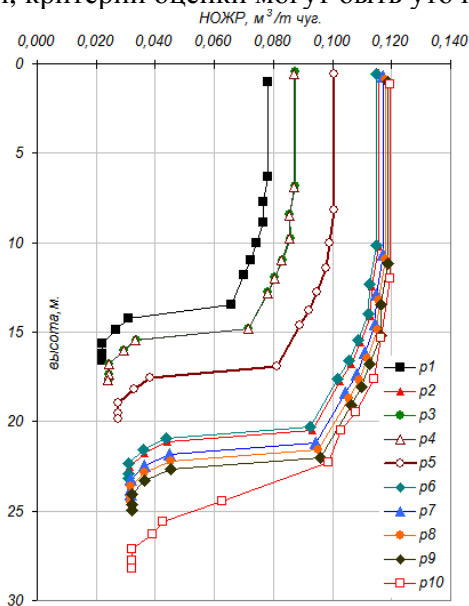
**Расчетные значения НОК ( $\text{м}^3/\text{т}$  чугу.) в различных зонах доменной печи**

РРН <sub>факт</sub>										
Зоны (ВТЗ)	РКЗ 1	РКЗ 2	РКЗ 3	РКЗ 4	РКЗ 5	РКЗ 6	РКЗ 7	РКЗ 8	РКЗ 9	РКЗ 10
1	0,117	0,080	0,108	0,108	0,095	0,080	0,078	0,077	0,076	0,076
2	0,117	0,080	0,108	0,108	0,095	0,080	0,078	0,077	0,076	0,076
3	0,117	0,080	0,108	0,108	0,095	0,080	0,078	0,077	0,076	0,076
4	0,117	0,080	0,108	0,108	0,095	0,080	0,078	0,077	0,076	0,076
5	0,117	0,080	0,108	0,108	0,095	0,080	0,078	0,077	0,076	0,076
6	0,117	0,080	0,108	0,108	0,095	0,080	0,078	0,077	0,076	0,076
7	0,105	0,071	0,097	0,097	0,085	0,072	0,070	0,069	0,068	0,068
8	0,101	0,069	0,093	0,093	0,082	0,069	0,067	0,067	0,066	0,065
9	0,100	0,068	0,092	0,092	0,081	0,069	0,067	0,066	0,065	0,065
10	0,099	0,068	0,091	0,092	0,080	0,068	0,066	0,065	0,065	0,064
11	0,099	0,067	0,091	0,091	0,080	0,068	0,066	0,065	0,064	0,064
12	0,098	0,067	0,091	0,091	0,080	0,068	0,066	0,065	0,064	0,064

Из рис. 8.2 следует, что образование свободного объема в области пластичной зоны происходит на участке высоты 1,1–1,6 м

по всему радиусу нижней части печи (15–25 м от технологического нуля). Поскольку в условиях нормальной работы печи сплошность столба не нарушается, заполнение объема материалом происходит мгновенно, что объясняет установленный с помощью информации системы измерения профиля поверхности засыпи шихты дискретный характер опускания отдельных участков поверхности засыпи. Характерно, что конфигурация НОЖР повторяет конфигурацию пластичной зоны и тесно связана с распределением рудных нагрузок на колошнике. Это означает, что зависящие от НОЖР амплитудно-частотные характеристики изменения скорости опускания поверхности засыпи содержат информацию о положении пластичной зоны и могут служить базой для оперативной ее оценки.

На первом этапе для оценки положения пластичной зоны может быть использован показатель отклонения текущих скоростей опускания поверхности от средних за длительный период, вычисленный для участков радиуса с различной рудной нагрузкой. В дальнейшем, при изучении амплитудно-частотных характеристик изменения скоростей опускания участков поверхности засыпи, критерии оценки могут быть уточнены.



**Рис. 8.2.** Сокращение насыпного объема железорудной шихты (НОЖР, м³/т чугу.) по высоте доменной печи



## **8.2 Разработка метода определения положения пластичной зоны в доменной печи на основе информации профилемера. Анализ факторной структуры показателей, характеризующих опускание поверхности шихтовых материалов в печи. Сопоставление расчетов формы и положения пластичной зоны с технологическими показателями и параметрами доменной плавки**

### **8.2.1 Метод контроля положения пластичной зоны в доменной печи**

С помощью системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике ДП №9 выполнены исследования, в результате которых рассчитаны средние скорости опускания шихтовых материалов за цикл загрузки (по скорости опускания каждой из 10-ти порций цикла) в контролируемых кольцевых сечениях колошника  $V_j$  для десяти периодов работы печи: I период – 14–15.01.08 г.; II период – 17–18.05.08 г.; III период – 29–31.05.08 г.; IV период – 01–03.03.2010; V период – (08–11.03.2010); VI период – (11–13.03.2010); VII период – (13–15.03.2010); VIII период – (21–24.03.2010); IX период – (01–03.04.2010); X период – (03–05.04.2010). Используемые в эти периоды режимы и программы загрузки печи представлены в табл. 8.3.

Отличительной особенностью программ загрузки шихты во II и III исследуемых периодах работы печи, по сравнению с I-м и IV–X периодами (программа А), было изменение последовательности выгрузки порций в цикле загрузки. По сравнению с программой А, выгрузка 6-ой порции К 2-1, а затем К 8-4 (7-ая порция) и АОШо 9-3 (8 порция) в программе Б была изменена на К 8-4 (6-ая порция), затем К 2-1 (7-ая порция) и АОШо 9-3 (8 порция). Кроме того, программы загрузки для всех исследуемых периодов отличались фактическим распределением масс шихтовых материалов по угловым положениям лотка БЗУ.

Технико-экономические показатели работы ДП №9 в исследуемые периоды приведены в табл. 8.4. Как следует из анализа таблицы, исследуемые периоды охватывают достаточно широкий диапазон изменения технологических параметров работы печи. Так, например, в исследуемых периодах производство чугуна изменялось в диапазоне от 6998 т/сут. до 9388 т/сут.; диапазон изменения расхода природного газа составил 297,5–569,4 м<sup>3</sup>/мин.

Таблица 8.3

**Распределение шихтовых материалов (%) по угловым положениям лотка БЗУ при загрузке ДП №9 в исследуемые периоды ее работы**

Период I, 14-15.01.08											
№№ порции	Состав порции <sup>1)</sup>	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9 <sup>2)</sup>	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	12	19	22	23	23	-	-	-	23,93
2/12	АО9-3	18	25	17	11	9	17	4	-	-	113,20
3/13	К8-4	-	15	18	21	22	24	-	-	-	23,58
4/14	АО9-3	18	27	17	10	9	17	2	-	-	112,45
5/15	К2-1	-	-	-	-	-	-	-	22	78	14,56
6/16	К8-4	-	10	21	20	21	27	-	-	-	28,56
7/17	АО9-3	18	25	17	10	9	17	4	-	-	112,61
8/18	К8-4	-	14	19	21	22	24	-	-	-	25,69
9/19	АО9-3	18	27	17	12	9	15	3	-	-	112,81
10/20	К2-1	-	-	-	-	-	-	-	22	78	14,62

Период II, 17-18.05.08											
№№ порции	Состав порции	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	13	23	22	23	20	-	-	-	22,00
2/12	АО9-3	15	28	17	11	10	16	3	-	-	102,45
3/13	К8-4	-	15	21	21	23	20	-	-	-	21,93
4/14 <sup>3)</sup>	АО9-3	15	27	17	11	10	17	3	-	-	102,57
5/16 <sup>3)</sup>	К8-4	-	12	24	22	22	20	-	-	-	21,78
6/15 <sup>3)</sup>	КБр2-1	-	-	-	-	-	-	-	23	77	17,23
7/17	АО9-3	15	28	16	10	10	18	3	-	-	101,58
8/18	К8-4	-	15	23	22	23	17	-	-	-	21,95
9/19	АО9-3	15	28	16	12	10	16	3	-	-	101,88
10/20	К2-1	-	-	-	-	-	-	-	22	78	14,40

<sup>1)</sup> – А – агломерат; О – окатыши; К – кокс; Скр – скрап чугунный, Ш – шлак обогащенный.

<sup>2)</sup> – Угла наклона лотка, град.:

9	8	7	6	5	4	3	2	1
45,9°	42,7°	40,0°	37,1°	34,1°	30,7°	26,7°	22°	18°

<sup>3)</sup> – Режим загрузки с использованием приема изменения последовательности выгрузки порции в рамках цикла загрузки.

Продолжение таблицы 8.3

**Распределение шихтовых материалов (%) по угловым  
положениям лотка БЗУ при загрузке ДП №9 в исследуемые  
периоды ее работы**

Период III, 29-31.05.08											
№№ порции	Состав порции	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	13	22	23	23	19	-	-	-	25,03
2/12	АО9-3	16	27	17	11	10	17	2	-	-	111,36
3/13	К8-4	-	14	22	22	23	19	-	-	-	24,78
4/14 <sup>3)</sup>	АО9-3	15	28	16	11	10	18	3	-	-	110,09
5/16 <sup>3)</sup>	К8-4	-	13	22	23	23	19	-	-	-	24,98
6/15 <sup>3)</sup>	КБр2-1	-	-	-	-	-	-	-	22	78	17,11
7/17	АО9-3	16	27	17	10	10	18	1	-	-	110,78
8/18	К8-4	-	14	22	21	23	20	-	-	-	25,05
9/19	АО9-3	14	28	17	12	10	16	3	-	-	110,56
10/20	К2-1	-	-	-	-	-	-	-	22	78	13,13

Период IV, 01-03.03.2010											
№№ порции	Состав порции	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	15	23	23	22	17	-	-	-	17,65
2/12	АСкрШ9-3	14	19	18	19	16	12	3	-	-	99,63
3/13	К8-4	-	16	19	23	22	20	-	-	-	16,09
4/14	АСкрШ9-3	13	19	18	19	16	13	3	-	-	99,87
5/15	К3-1	-	-	-	-	-	-	32	29	40	10,56
6/16	К8-4	-	14	23	24	23	17	-	-	-	17,39
7/17	АСкрШ9-3	14	18	18	19	16	12	3	-	-	99,68
8/18	К8-4	-	14	21	23	22	20	-	-	-	16,20
9/19	АСкрШ9-3	13	19	18	19	16	13	3	-	-	99,85
10/20	К3-1	-	-	-	-	-	-	29	28	43	10,04

Период V, 08-11.03.2010											
№№ порции	Состав порции	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	14	23	23	22	17	-	-	-	15,98
2/12	АСкрШ9-3	13	19	18	18	17	12	4	-	-	99,27
3/13	К8-4	-	14	22	23	22	20	-	-	-	17,97
4/14	АСкрШ9-3	13	19	18	19	16	13	3	-	-	98,34
5/15	К3-1	-	-	-	-	-	-	31	30	40	10,89
6/16	К8-4	-	15	24	25	24	12	-	-	-	16,33
7/17	АСкрШ9-3	13	19	18	18	17	12	4	-	-	98,86
8/18	К8-4	-	18	17	22	21	22	-	-	-	18,61
9/19	АСкрШ9-3	13	19	18	19	16	13	3	-	-	98,81
10/20	К3-1	-	-	-	-	-	-	33	28	39	10,78

Продолжение 2 таблицы 8.3

**Распределение шихтовых материалов (%) по угловым  
положениям лотка БЗУ при загрузке ДП №9 в исследуемые  
периоды ее работы**

Период VI, 11–13.03.2010											
№№ порции	Состав порции	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	14	23	24	23	15	-	-	-	16,43
2/12	АСкрШ9-3	15	18	18	19	17	11	2	-	-	83,21
3/13	К8-4	-	16	20	23	22	20	-	-	-	16,30
4/14	АСкрШ9-3	15	19	18	19	17	11	2	-	-	81,33
5/15	К3-1	-	-	-	-	-	-	31	28	41	9,95
6/16	К8-4	-	15	23	24	23	15	-	-	-	16,02
7/17	АСкрШ9-3	14	18	18	18	17	11	4	-	-	82,97
8/18	К8-4	-	17	19	22	22	20	-	-	-	16,78
9/19	АСкрШ9-3	14	18	18	19	17	12	3	-	-	81,15
10/20	К3-1	-	-	-	-	-	-	31	28	41	9,91
Период VII, 13–15.03.2010											
№№ порции	Состав порции	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	15	24	24	23	14	-	-	-	17,70
2/12	АСкрШ9-3	13	19	18	19	17	11	3	-	-	94,93
3/13	К8-4	-	18	17	22	21	21	-	-	-	16,93
4/14	АСкрШ9-3	13	19	17	19	17	12	3	-	-	95,25
5/15	К3-1	-	-	-	-	-	-	32	29	39	10,12
6/16	К8-4	-	14	22	23	22	19	-	-	-	17,63
7/17	АСкрШ9-3	14	19	18	19	17	12	3	-	-	94,34
8/18	К8-4	-	14	21	23	22	21	-	-	-	16,42
9/19	АСкрШ9-3	13	19	18	19	17	11	3	-	-	95,91
10/20	К3-1	-	-	-	-	-	-	30	29	41	10,18
Период VIII, 21–24.03.2010											
№№ порции	Состав порции	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	15	23	23	23	17	-	-	-	15,94
2/12	АСкрШ9-3	14	19	18	19	17	12	3	-	-	102,78
3/13	К8-4	-	15	20	23	22	20	-	-	-	17,63
4/14	АСкрШ9-3	14	19	17	19	17	12	3	-	-	101,02
5/15	К3-1	-	-	-	-	-	-	32	29	39	10,35
6/16	К8-4	-	14	23	23	23	18	-	-	-	16,16
7/17	АСкрШ9-3	14	18	18	19	17	12	2	-	-	101,56
8/18	К8-4	-	13	21	22	21	22	-	-	-	17,66
9/19	АСкрШ9-3	14	19	17	19	17	12	3	-	-	101,92
10/20	К3-1	-	-	-	-	-	-	30	29	41	10,36

*Продолжение 3 таблицы 8.3*

**Распределение шихтовых материалов (%) по угловым  
положениям лотка БЗУ при загрузке ДП №9 в исследуемые  
периоды ее работы**

Период IX, 01–03.04.2010											
№№ порции	Состав порции	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	15	23	23	23	16	-	-	-	16,39
2/12	АСкрШ9-3	14	19	17	19	17	12	2	-	-	102,03
3/13	К8-4	-	15	23	23	22	17	-	-	-	16,62
4/14	АСкрШ9-3	14	19	17	19	17	12	3	-	-	99,69
5/15	К3-1	-	-	-	-	-	-	34	31	35	10,81
6/16	К8-4	-	14	23	24	23	17	-	-	-	16,23
7/17	АСкрШ9-3	14	19	18	19	17	12	2	-	-	99,61
8/18	К8-4	-	14	21	22	21	22	-	-	-	16,58
9/19	АСкрШ9-3	14	19	18	19	17	12	2	-	-	101,36
10/20	К3-1	-	-	-	-	-	-	29	28	43	10,37

Период X, 03–05.04.2010											
№№ порции	Состав порции	Угловые положения распределителя, %									Σ, т
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	
1/11	К8-4	-	14	23	23	22	18	-	-	-	17,28
2/12	АСкрШ9-3	14	19	18	19	17	12	2	-	-	97,40
3/13	К8-4	-	14	23	23	23	17	-	-	-	17,84
4/14	АСкрШ9-3	14	19	18	19	17	11	2	-	-	95,34
5/15	К3-1	-	-	-	-	-	-	36	31	34	10,45
6/16	К8-4	-	14	24	24	23	15	-	-	-	17,41
7/17	АСкрШ9-3	14	19	18	19	17	12	2	-	-	98,97
8/18	К8-4	-	14	20	22	22	22	-	-	-	17,73
9/19	АСкрШ9-3	14	19	18	19	17	12	2	-	-	95,71
10/20	К3-1	-	-	-	-	-	-	28	28	45	10,32

Таблица 8.4

Технико-экономические показатели работы ДШ №9 (V<sub>д</sub>—5034 м<sup>3</sup>)

Параметры, показатели	Ед. изм.	Периоды, №%, дата											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
Нормальное время работы	час	15,01	17,17	29,10	31,05	03,03	01,11	08,11	13,03	15,03	24,03	03,03	05,04
	т/сут	9283	30,97	35,93	37,43	61,79	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10
Расход кокса	кг/т	449,1	475,6	470,9	444,3	453,6	463,3	458,3	454,2	477,9	48,67	82,74	81,49
	кг/т	32,88	37,77	26,77	41,96	43,67	26,96	40,76	43,18	48,73	51,87	3,37	3,37
Доля в ж.р. части шихты	%	80,21	81,76	84,10	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	%	17,79	18,24	15,90	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Расход (Q <sub>г</sub> )	м <sup>3</sup> /мин	7982,4	7787,8	7893,9	7322,8	7270,4	7619,1	7452,1	7111,2	7390,8	7508,3	7508,3	7508,3
	атм	3,63	3,42	3,02	3,21	3,00	2,88	3,29	3,19	3,42	3,48	3,42	3,48
Дутье	°C	1038	1031	1087	1088	1023	1033	1063	1049	1108	1087	1087	1087
	т/ч	1,40	0,00	0,00	1,64	1,46	1,75	3,26	2,86	2,60	2,59	2,59	2,59
Расход природного газа, (Q <sub>пг</sub> )	%	26,0	28,1	27,6	24,1	24,0	23,6	24,9	24,3	25,2	25,9	25,9	25,9
	м <sup>3</sup> /мин	569,4	512,9	522,1	315,2	297,5	300,3	328,8	321,4	343,8	338,6	338,6	338,6
Теоретическая тем-ра горения (T <sub>г</sub> )	°C	2084	2216	2224	2155	2109	2095	2148	2108	2192	2214	2192	2214
	м <sup>3</sup> /мин	50,46	52,69	61,94	55,63	60,44	65,24	54,39	57,57	53,49	52,98	53,49	52,98
Выход кокшикового газа на 1 м <sup>3</sup> Sh <sub>д</sub> при P <sub>зад</sub>	атм	1,65	1,56	1,18	1,10	1,10	1,01	1,35	1,26	1,48	1,53	1,48	1,53
	°C	84	88	86	83	89	99	85	99	80	80	80	80
Кокшиковый газ	(T <sub>к</sub> )	19,19	19,43	19,81	19,52	19,32	18,56	18,97	19,21	19,61	19,92	19,61	19,92
	CO <sub>2</sub>	25,42	27,81	26,78	27,29	27,32	27,69	27,35	29,09	28,50	28,50	28,50	28,50
Химсостав кокшикового газа (объемная доля)	H <sub>2</sub>	6,84	7,00	6,67	5,36	5,30	5,27	5,57	6,21	6,14	6,26	6,14	6,26
	N <sub>2</sub>	48,55	45,76	46,74	47,83	47,86	48,49	48,10	45,49	45,68	45,33	45,68	45,33
Степень использования CO <sub>2</sub> (η <sub>CO</sub> )	%	43,02	41,13	42,52	41,70	41,42	40,13	40,96	39,78	41,14	40,96	41,14	40,96
	Доля (S <sub>г</sub> ) в дутье	0,82	1,19	0,94	0,80	1,01	0,97	1,07	1,01	0,98	0,95	0,98	0,95
Скорость истечения дутья из шфурма	м/с	191,4	192,0	221,4	195,8	194,7	210,0	192,3	186,9	191,9	189,4	191,9	189,4
	°C	326,7	274,0	254,0	424,9	393,3	395,8	410,3	406,3	325,3	309,6	325,3	309,6
Тем-ра периф. газоз (T <sub>г</sub> )	°C	388	348	321	533	506	533	562	539	499	502	499	502
	К <sub>д</sub> —T <sub>д</sub> —T <sub>зад</sub>	3,89	3,11	2,95	5,15	4,44	4,30	4,83	4,12	4,04	3,88	4,12	3,88
Отношение	ед.	4,62	3,95	3,73	6,45	5,72	5,39	6,62	5,46	6,19	6,29	5,46	6,19
	К <sub>д</sub> —P <sub>д</sub> —P <sub>зад</sub>	ед.	0,84	0,84	0,64	0,67	0,38	0,34	0,70	0,66	0,78	0,66	0,78
Перепад давления по высоте печи	атм	0,45	0,40	0,37	0,43	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,35	0,42	0,35
	атм	1,51	1,45	1,46	1,48	1,47	1,45	1,50	1,48	1,55	1,54	1,48	1,55
Общий (ΔP <sub>г</sub> )	атм	1,96	1,86	1,84	1,91	1,88	1,87	1,92	1,91	1,89	1,89	1,89	1,89
	атм	1,96	1,86	1,84	1,91	1,88	1,87	1,92	1,91	1,89	1,89	1,89	1,89

Продолжение таблицы 8.4

Технико-экономические показатели работы ДШ №9 (V<sub>п</sub>=5034 м<sup>3</sup>)

Параметры, показатели	Ед. изм.	Периоды №№ дата									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Расход шихтовых материалов	атом. ГОК-1 (склад)	14-15.01. 2008)	17-18.05. 2008)	29-31.05. 2008)	01-03.03. 2010)	08-11.03. 2010)	11-13.03. 2010)	13-15.03. 2010)	01-24.03. 2010)	01-03.04. 2010)	03-05.04. 2010)
	И.п.д.	—	1767	1668	347	—	1827	1782	1852	1530	1770
	кг т.чуг.	—	13165	10664	14384	—	15275	17082	17186	23546	31740
	атом. ГОК-2	19-27	28-13	28-27	30-23	31-12	01-23	22-22	23-24	24-23	25-24
	И.п.д.	124116	169566	108313	145828	149596	131098	136598	139269	118183	137178
	кг т.чуг.	—	—	1423	140	140	018	271	—	824	334
	И.п.д.	363	—	11379	—	2482	380	974	—	13581	10340
	кг т.чуг.	3990	—	1640	—	—	—	—	—	—	—
	атом. ГОК-2 (склад)	20-30	16-91	16-40	—	—	—	—	—	—	—
	И.п.д.	32098	29050	23815	8850	8551	2283	8393	8755	8595	8297
кг т.чуг.	10360	9271	10312	138412	151878	150753	157454	161412	139110	160658	
Итого рудная часть	И.п.д.	162704	139160	162371	138412	151878	150753	157454	161412	139110	160658
	кг т.чуг.	044	133	109	—	—	—	—	—	—	—
	И.п.д.	219	2633	1724	—	—	—	—	—	—	—
	кг т.чуг.	442	446	439	263	193	239	240	330	377	426
	И.п.д.	6920	7652	6912	4710	3420	3568	4508	6080	6982	8256
	кг т.чуг.	231	240	238	207	328	340	191	300	300	295
	И.п.д.	39531	4127	4055	3705	5822	6822	5585	5524	5560	5704
	кг т.чуг.	—	—	—	131	253	117	272	262	218	210
	И.п.д.	127	065	090	2702	4501	2419	4164	4838	4052	4057
	кг т.чуг.	1985	1116	1418	—	021	—	018	021	449	—
Добавки	И.п.д.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	кг т.чуг.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	И.п.д.	786	1343	1083	1238	1146	1139	781	1447	1627	1755
	кг т.чуг.	12462	23063	17054	22161	19818	23570	14649	26681	30118	33982
	И.п.д.	623	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	кг т.чуг.	9784	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	И.п.д.	1111	799	912	912	1073	932	1358	638	525	522
	кг т.чуг.	17401	19320	12574	16323	19058	19711	25484	12140	9718	10101
	И.п.д.	—	—	874	—	—	—	—	020	—	—
	кг т.чуг.	—	—	13764	—	—	—	—	370	—	—
Коис	И.п.д.	077	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	кг т.чуг.	1210	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	И.п.д.	259	301	233	32	365	137	332	360	302	191
	кг т.чуг.	4048	5175	3698	5946	6479	3249	6220	6638	5585	3707
	И.п.д.	210	220	170	234	246	217	234	269	268	268
	кг т.чуг.	3288	3777	2677	4196	4367	2696	4076	4318	4973	5187
	И.п.д.	236	208	336	312	320	320	320	320	320	320
	кг т.чуг.	6.1	6.7	6.0	5.4	5.2	6.8	6.4	5.8	6.4	6.6
	Итого	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Количество подач	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Количество подач в час	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Следует отметить, что исследуемые периоды работы печи (I – X) различались составом шихтовых материалов:

– для I–III периодов в составе шихты присутствовали окатыши (средний расход – 289,81 кг/т.чуг), а в IV–X периодах – они отсутствовали;

– расходом антрацита в составе шихтовых материалов. Если в первых трех периодах средний расход антрацита на тонну чугуна составлял 32,5 кг/т.чуг, то в остальных периодах его величина, в среднем, составила 43,9 кг/т.чуг;

– расходом брикетов. В первых трех периодах средний расход брикетов на тонну чугуна составлял 15,1 кг/т.чуг, в IV– X периодах – 1,8 кг/т.чуг;

– в IV–X периодах, в отличие от I–III периодов, в составе шихты использовали офлюсованные железосодержащие материалы (МОЖ), расход которых в указанных периодах в среднем составлял 40,3 кг/т.чуг;

– в I–III периодах, в отличие от IV–X периодов, в составе шихты использовали известняк, расход которого в этих периодах в среднем составлял 15,3 кг/т.чуг;

– в IV–X периодах, по сравнению с I–III периодами, на 20,4 кг/т.чуг увеличился расход мелочи агломерата.

С помощью выражения (8.2.1.1) определены среднеквадратичные отклонения скорости опускания шихты в точках каждого контролируемого радиуса колошника  $\sigma^m_i$  за цикл загрузки [17, 191]:

$$\sigma^m_i = \sqrt{\frac{\sum (V^m_i - V^m_i{}^{cp})^2}{i-1}}, \quad (8.2.1.1)$$

где  $i$  – количество порций в цикле загрузки;  $V^m_i$  – скорость опускания шихты в точке радиуса колошника после выгрузки каждой порции цикла загрузки, м/мин;  $V^m_i{}^{cp}$  – средняя скорость опускания шихты в точке радиуса колошника за цикл загрузки, м/мин;  $m$  – количество контролируемых радиусов колошника.

и среднеквадратичные отклонения скоростей опускания шихты по радиусам колошника согласно выражению:

$$\sigma^m_R = \sqrt{\frac{\sum (V^m_{ij} - V^m_{ij}{}^{cp})^2}{i \cdot j - 1}}, \quad (8.2.1.2)$$



где  $V_{ij}^m$  – скорость опускания шихты по радиусу колошника после выгрузки каждой порции цикла загрузки, м/мин;  $V_{ij}^{m,cp}$  – средняя скорость опускания шихты по радиусу колошника за цикл загрузки, м/мин;  $j$  – количество точек на радиусе колошника. Определены средние значения среднеквадратичных отклонений скоростей опускания шихты за период, равный двум суткам работы печи, в соответствии с выражением:

$$\sigma_{R}^{m,cp} = \frac{\sum_{k} \sigma_{R}^m}{k}, \quad (8.2.1.3)$$

где  $k$  – количество циклов периода.

Точки на каждом контролируемом радиусе колошника, в которых осуществляется измерение расстояний до поверхности засыпи шихты и расчет скоростей ее опускания, соответствуют границам трех кольцевых зон сечения колошника – 1П, 2П и Ц.

Анализ рассчитанных среднеквадратичных отклонений скорости в секторах сечения печи, расположенных по радиусам, ориентированным по осям чугунных леток (ЧЛ1–ЧЛ4), для каждого цикла загрузки показал, что их значения изменяются и с различными для каждой из зон сечения колошника временными интервалами, увеличиваются до максимальных, по сравнению со средними, для исследуемых периодов значениями среднеквадратичных отклонений скоростей. При этом, для зоны 1П периодический рост среднеквадратичных отклонений скорости до максимальных происходит через промежуток времени, соответствующий, в среднем, опусканию 7-10 циклов загрузки; для зоны 2П – 4-5 циклов и зоны Ц – 2-3 циклов. Принято, что рассчитанные в каждой зоне на основе установленных временных интервалов между максимальными среднеквадратичными отклонениями скорости ( $t_{max}$ ), превышающими среднее значение, и усредненными за эти интервалы скоростями опускания шихты ( $V_{max}$ ) расстояния ( $H_{пл}$ ) от «технологического нуля», могут характеризовать точку начала образования жидких фаз в слое железорудных материалов, т.е. положение пластичной зоны по высоте и радиусу доменной печи. Положение пластичной зоны в каждой из зон по радиусу доменной печи определено с помощью выражения:

$$H_{пл} = Y^{исх} - V_{cp,max} \cdot t_{max} \quad (8.2.1.4)$$

где  $H_{пл}$  – расстояние от «технологического нуля» до границы пластичной зоны, м;  $Y^{исх}$  – исходный уровень засыпи шихтовых

материалов (перед выгрузкой очередной порции шихты), м;  $V_{\text{ср max}}$  – среднее значение скорости опускания шихты за периоды между максимальными среднеквадратичными отклонениями скорости, превышающими среднее его значение, м/мин;  $t_{\text{max}}$  – временной интервал между циклами, характеризующимися максимальными среднеквадратичными отклонениями скорости по отношению к среднему его значению, мин.

Результаты расчетов положения пластичной зоны для периодов I–X приведены в табл. 8.5 и 8.6 и на рис. 8.3–8.12, где схематически отображен «малоактивный коксовый конус», положение и геометрические параметры которого рассчитаны для условий ДП №9 в соответствии с методикой [192].

При обосновании выбора временного интервала, в течение которого определяются средние значения среднеквадратичных отклонений скоростей опускания шихты, приняты во внимание следующие факторы. В ходе исследований было установлено, что для работы печи характерны периоды, когда выпуск чугуна осуществлялся в течение продолжительного времени (около 1 часа) одновременно на две летки, что при постоянных параметрах загрузки и дутьевого режима не вызывало изменений положения пластичной зоны. Последовательное изменение летки, через которую осуществляется выпуск чугуна, с незначительным перерывом при этом, вызывает изменение положения пластичной зоны в печи. Из этого следует, что для получения достаточной статистической выборки необходимо проанализировать скорости опускания шихты за период ее работы без внесения управляющих воздействий на ход плавки, составляющий не менее 24 часов работы печи. Кроме этого, следует учитывать большое время запаздывания, т.е. интервал между внесением управляющих воздействий, например, изменения состава шихты или расхода кокса, и началом изменения состава продуктов плавки.

Такая инерционность связана с изменением структуры столба шихтовых материалов, которая, при внесении управляющих воздействий на нее, проявляется по истечении определенного времени, соответствующего проплавке шихты, занимающей рабочий объем печи. В среднем, этот промежуток времени составляет 8 часов [150]. Для того, чтобы реформированная структура столба стабилизировалась, необходима работа печи в этих условиях в течение не менее 8-ми часов. С учетом этих факторов, для определения положения пластичной зоны должен быть проанализирован период, продолжительностью около 2-х суток.

Таблица 8.3  
Изменение параметров профиля поверхности засыпи шихты на колошнике ЦП №9 и расположение границы зоны образования жидких фаз по высоте и периметру печи в исследуемые периоды ее работы

Период, №№, дата	Параметры, показатели	Сектор печи, где измеряется профиль поверхности засыпи, точки измерения по R колошника																		
		ЦП1			ЦП2			ЦП3			ЦП4			ЦП1-ЦП4						
		III	2II	Ц	III	2II	Ц	III	2II	Ц	III	2II	Ц	III	2II	Ц	III	2II	Ц	
I (14-15.01.08)	Средний уровень засыпи перед выгрузкой порций шихты, (Ур, месс), м.	0,68	0,94	0,98	0,80	0,40	0,82	1,06	0,87	1,17	0,81	0,95	0,79	0,84	0,79	0,94				
	Скорость опускания поверхности засыпи шихты, (V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,095	0,093	0,095	0,055	0,086	0,095	0,101	0,092	0,089	0,069	0,059	0,091	0,080	0,082	0,093				
	Коллебоность скорости опускания поверхности засыпи шихты, (σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,080	0,100	0,081	0,073	0,093	0,078	0,070	0,095	0,086	0,070	0,071	0,096	0,073	0,090	0,085				
II (17-18.05.08)	Расстояние от отн. ТН «0» (42100) до границы области образования жидких фаз (Н <sub>ж</sub> ), м (по 0-му месс)	13,05	10,52	16,00	11,21	10,95	16,06	22,31	12,03	12,14	11,57	8,44	12,08	13,51	9,24	15,43				
	(Ур, месс), м.	1,25	1,42	1,53	1,24	1,21	1,49	1,41	1,52	2,04	1,21	1,50	1,62	1,28	1,41	1,67				
	(V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,086	0,090	0,094	0,075	0,081	0,080	0,100	0,083	0,101	0,076	0,067	0,091	0,084	0,080	0,092				
III (29-31.05.08)	(σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,074	0,082	0,098	0,074	0,098	0,112	0,078	0,105	0,107	0,067	0,088	0,104	0,073	0,093	0,105				
	(Н <sub>ж</sub> ), м	23,63	15,89	8,96	23,99	9,71	11,72	23,89	10,07	13,70	20,43	9,13	10,27	22,99	11,72	10,62				
	(Ур, месс), м.	0,87	1,25	1,62	1,05	1,20	1,56	1,06	1,22	1,96	0,88	1,37	1,58	0,97	1,26	1,68				
III (29-31.05.08)	(V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,101	0,101	0,100	0,086	0,097	0,107	0,095	0,086	0,102	0,077	0,064	0,099	0,090	0,087	0,102				
	(σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,069	0,068	0,101	0,061	0,087	0,099	0,059	0,102	0,097	0,056	0,078	0,107	0,061	0,084	0,101				
	(Н <sub>ж</sub> ), м	19,45	17,62	11,59	23,59	11,98	14,01	15,77	9,88	14,75	23,83	9,53	11,39	30,42	10,95	11,69				

Таблица 8.6

**Изменение параметров профиля поверхности засыпи шихты на колошнике ДП №9 и расположение границы зоны образования жидких фаз по высоте и периметру печи в исследуемые периоды ее работы**

Период, №№, дата	Параметры, показатели	Кольцевые зоны сечения колошника		
		1П	2П	Ц
IV (01–03.03.2010)	(Ур. <sup>исх</sup> ), м.	0,720	0,560	0,800
	(V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,054	0,074	0,086
	(σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,075	0,084	0,086
	(H <sub>3п</sub> ), м	<b>12,250</b>	<b>10,770</b>	<b>13,000</b>
V (08–11.03.2010)	(Ур. <sup>исх</sup> ), м.	0,770	0,610	0,620
	(V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,064	0,070	0,075
	(σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,059	0,071	0,100
	(H <sub>3п</sub> ), м	<b>25,520</b>	<b>15,620</b>	<b>9,340</b>
VI (11–13.03.2010)	(Ур. <sup>исх</sup> ), м.	0,880	0,840	0,750
	(V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,073	0,075	0,081
	(σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,052	0,071	0,070
	(H <sub>3п</sub> ), м	<b>13,050</b>	<b>8,920</b>	<b>12,240</b>
VII (13–15.03.2010)	(Ур. <sup>исх</sup> ), м.	0,740	0,670	0,550
	(V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,077	0,077	0,080
	(σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,050	0,070	0,083
	(H <sub>3п</sub> ), м	<b>18,360</b>	<b>10,890</b>	<b>8,820</b>
VIII (21–24.03.2010)	(Ур. <sup>исх</sup> ), м.	0,790	0,750	0,590
	(V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,067	0,071	0,076
	(σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,055	0,068	0,073
	(H <sub>3п</sub> ), м	<b>16,540</b>	<b>10,310</b>	<b>9,520</b>
IX (01–03.04.2010)	(Ур. <sup>исх</sup> ), м.	0,780	0,600	0,800
	(V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,072	0,072	0,094
	(σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,056	0,076	0,084
	(H <sub>3п</sub> ), м	<b>23,450</b>	<b>10,040</b>	<b>10,850</b>
X (03–05.04.2010)	(Ур. <sup>исх</sup> ), м.	0,880	0,640	0,850
	(V <sub>ш</sub> ), м/мин.	0,076	0,077	0,100
	(σ <sub>ш</sub> ), м/мин	0,056	0,069	0,070
	(H <sub>3п</sub> ), м	<b>14,580</b>	<b>9,640</b>	<b>12,530</b>

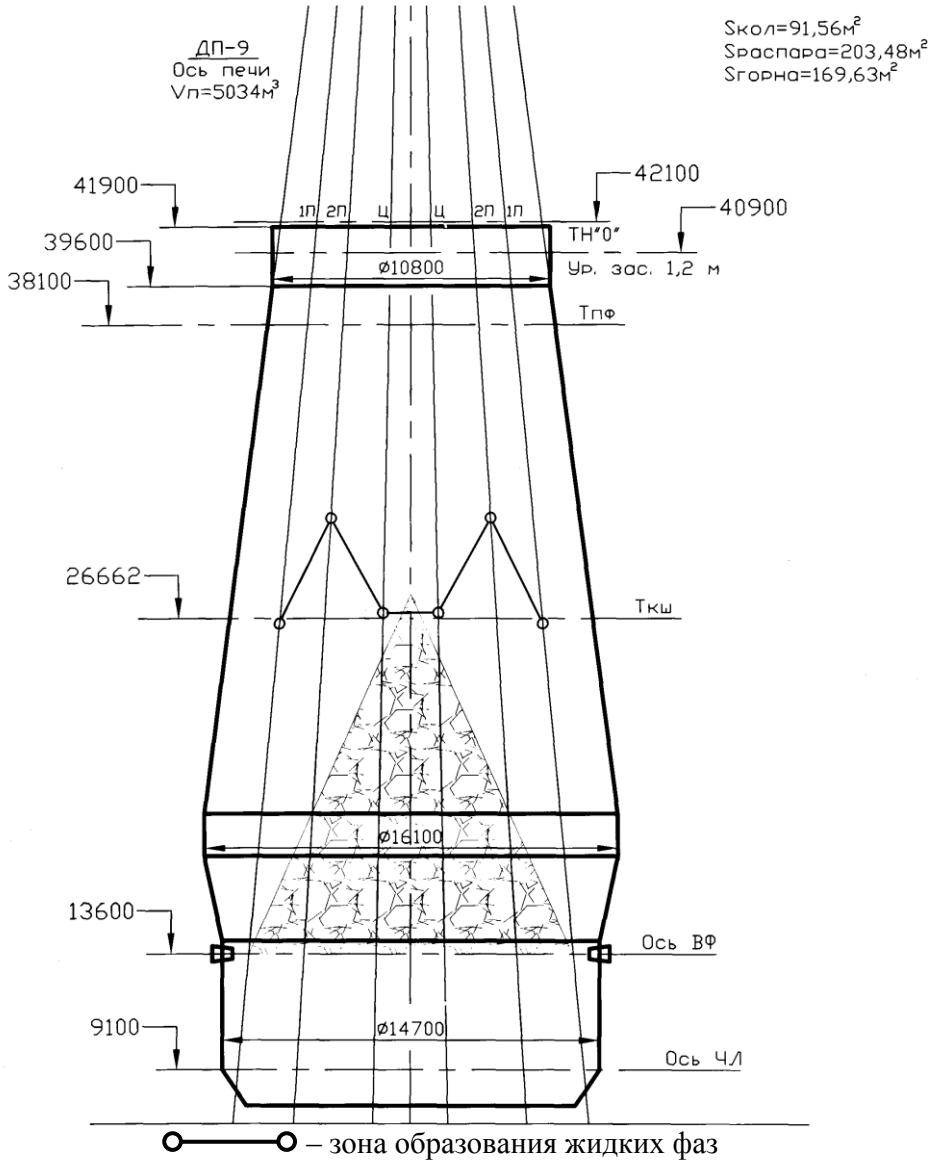
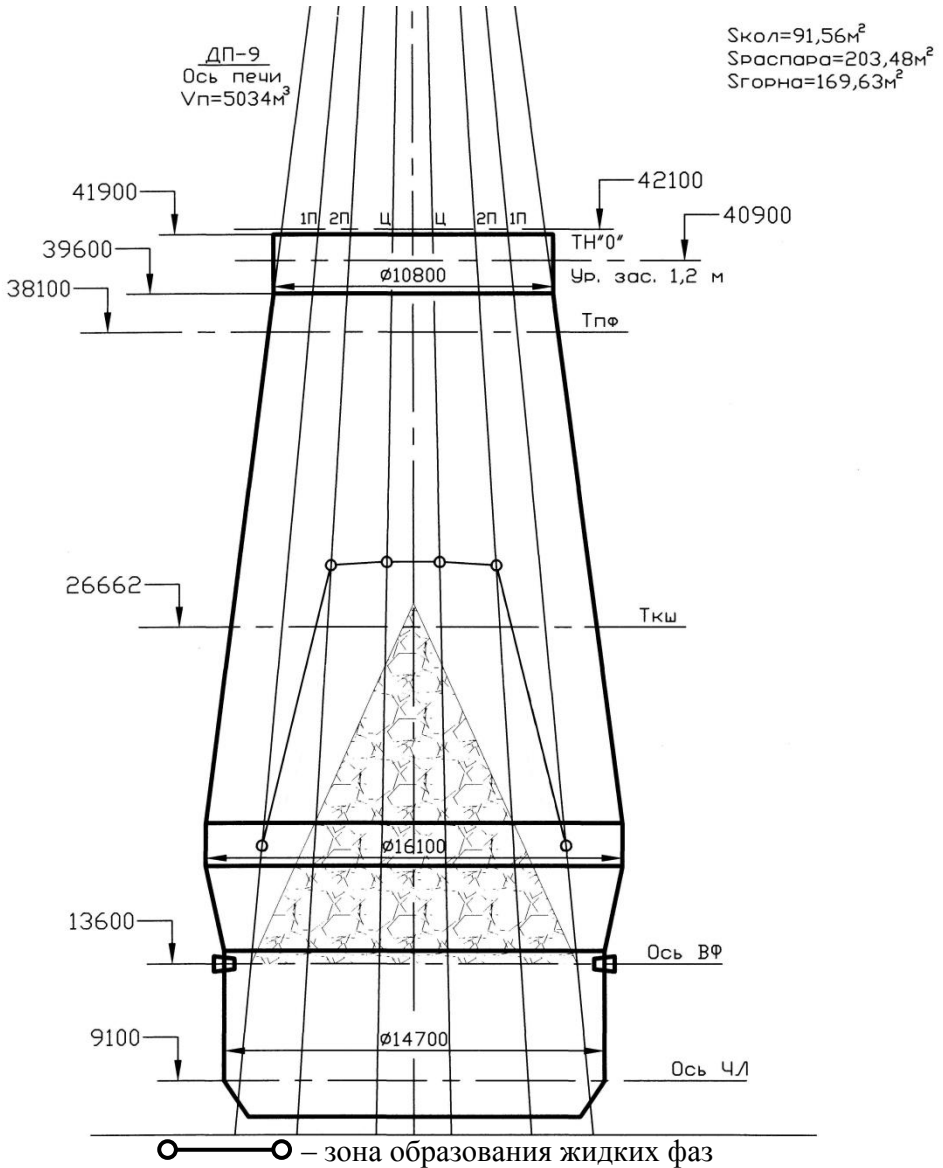


Рис. 8.3. Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период I (14–15.01.08)



**Рис. 8.4.** Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период II (17–18.05.08)

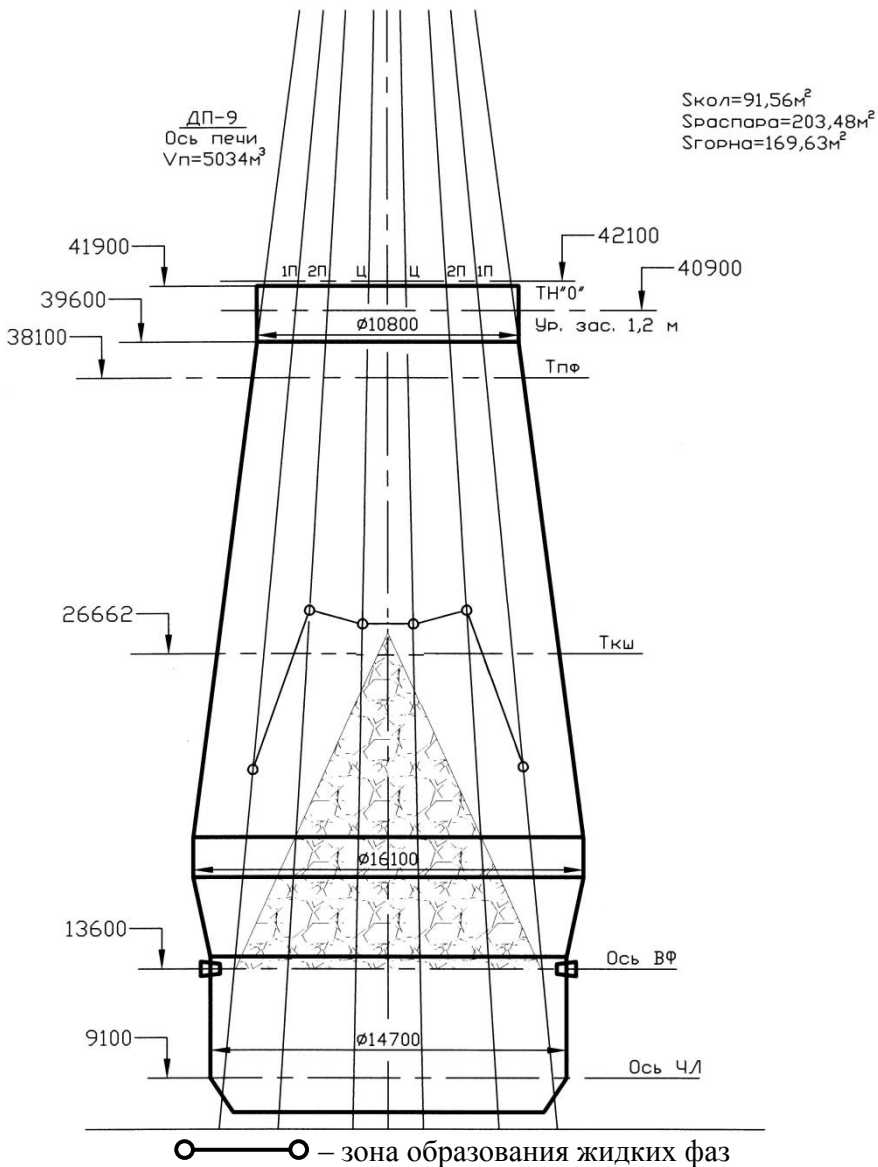
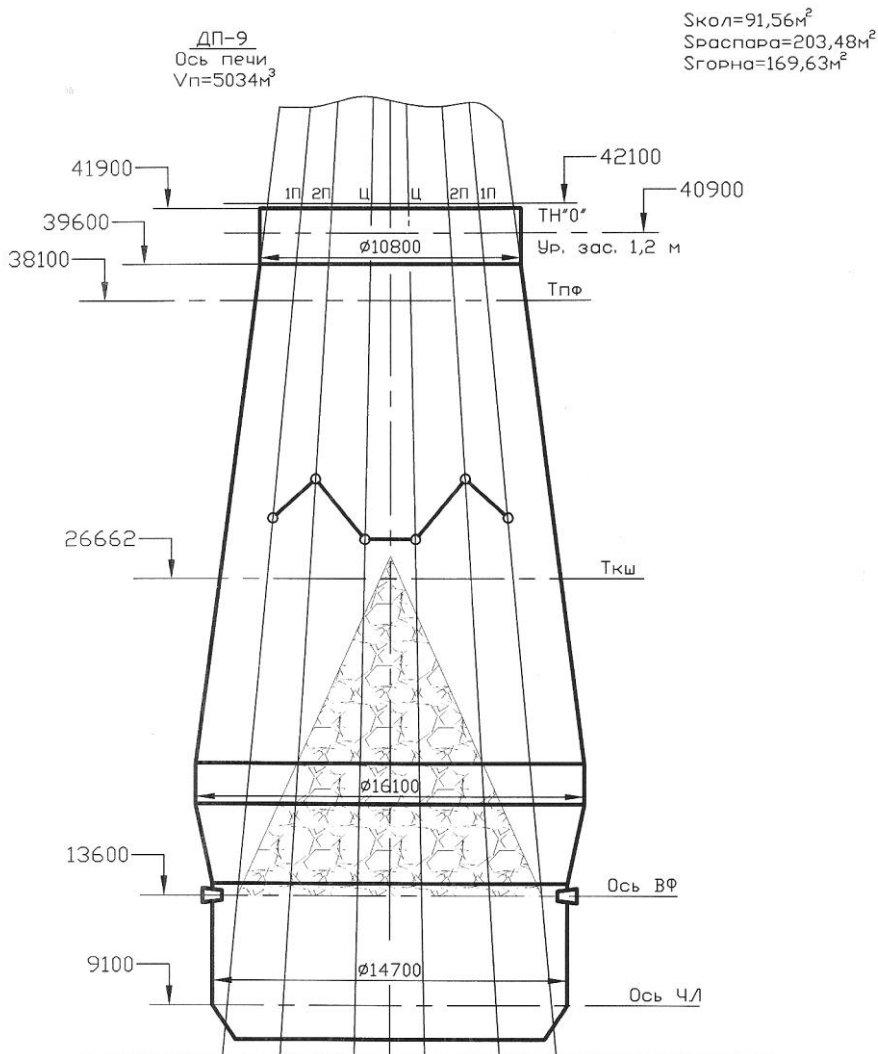
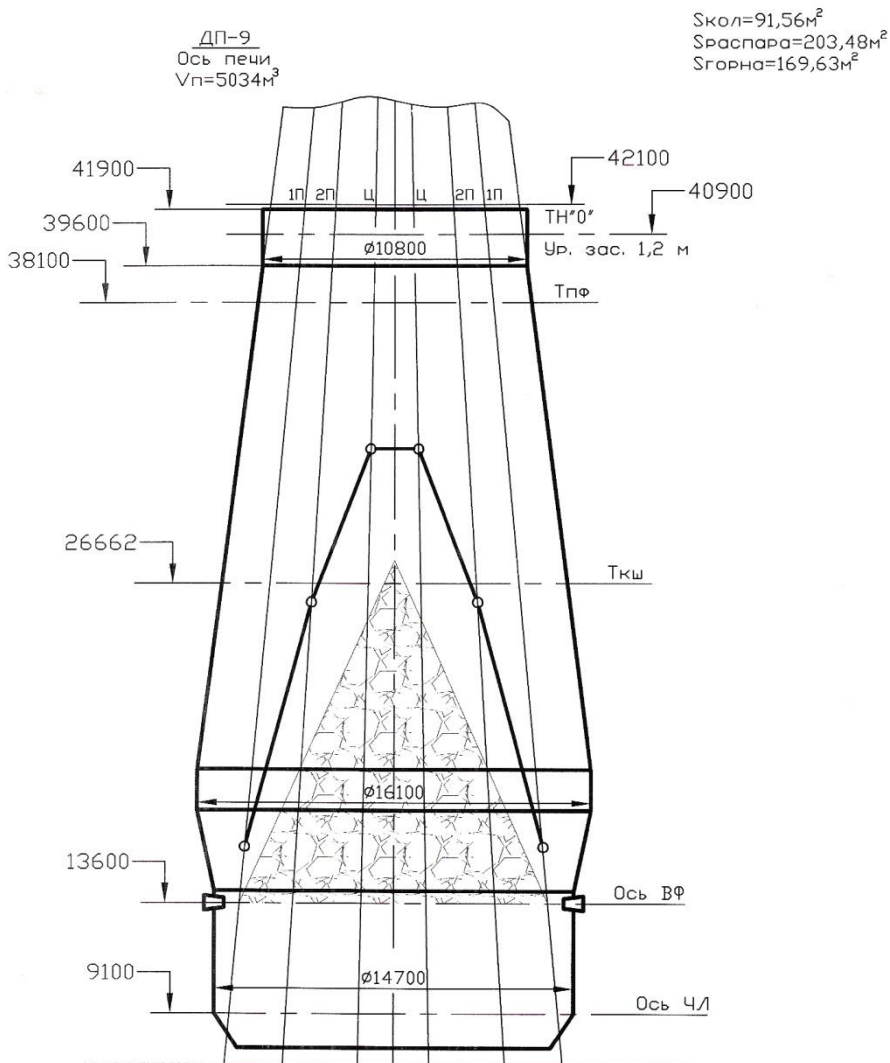


Рис. 8.5. Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период III (29–31.05.08)

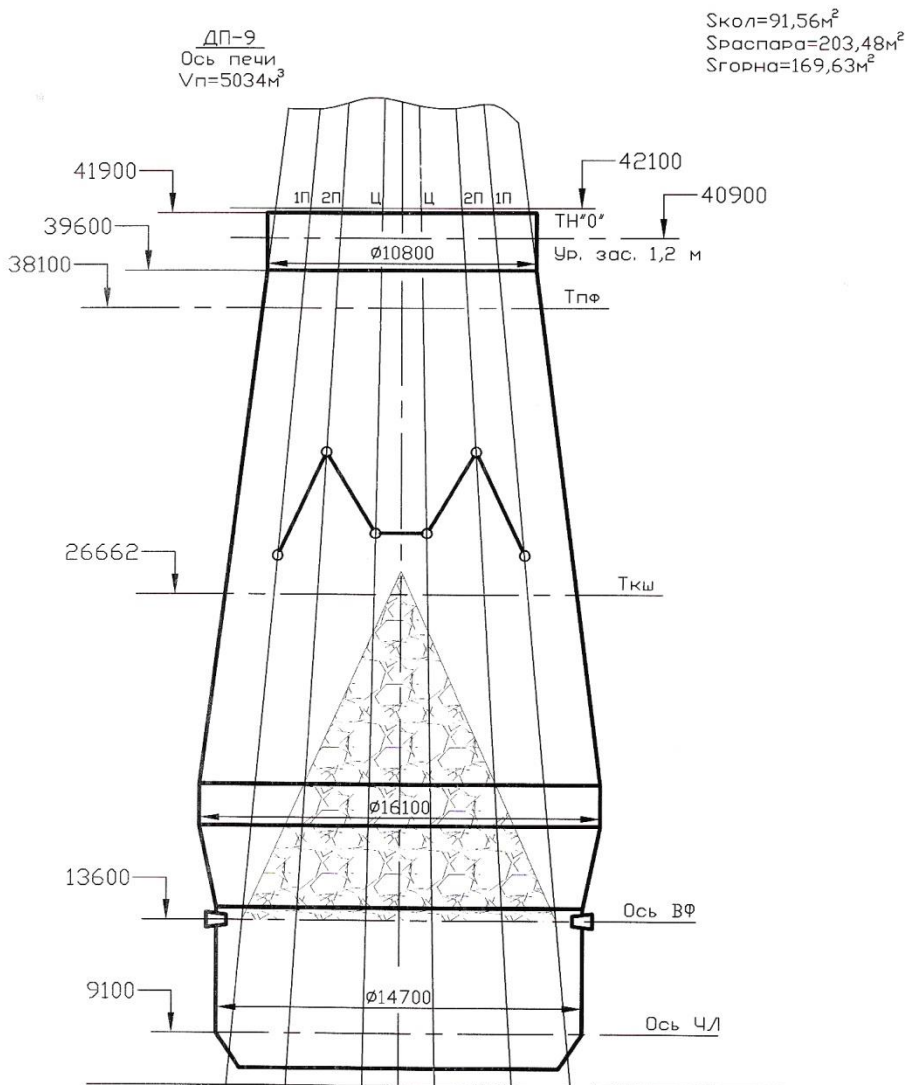


**Рис. 8.6.** Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период IV (01–03.03.10)

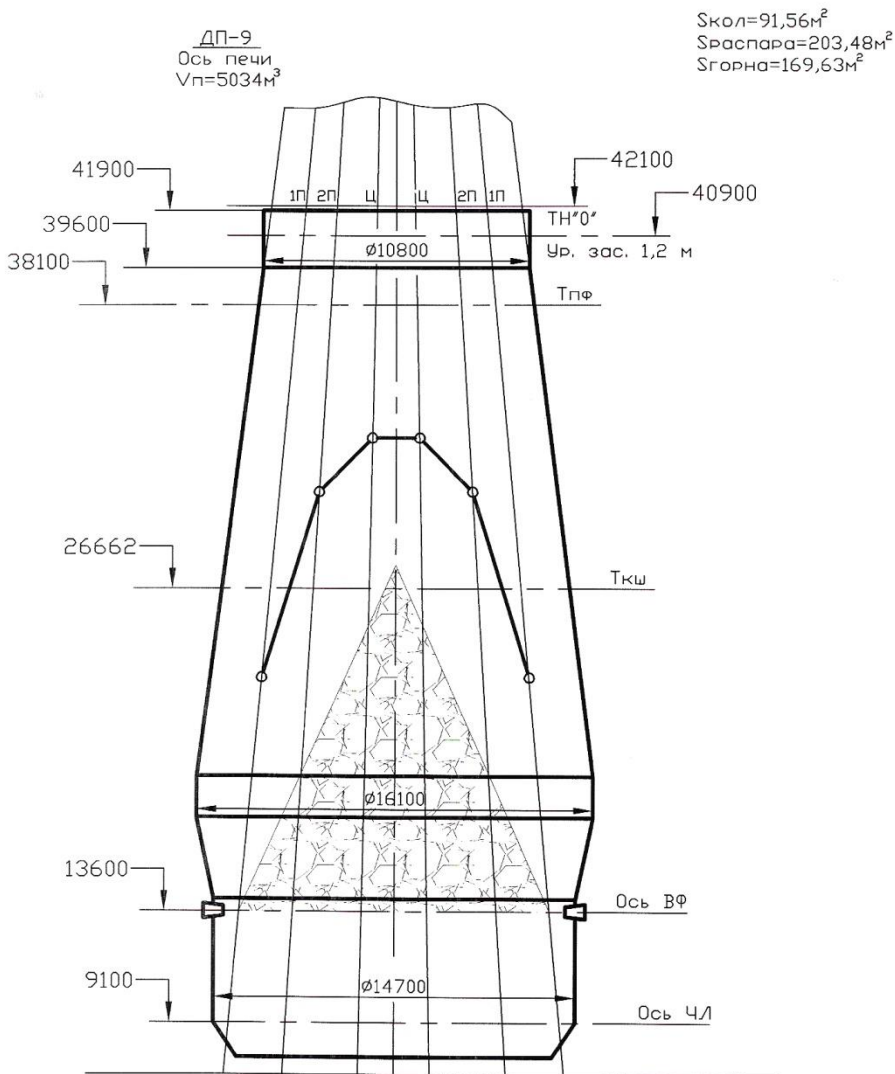




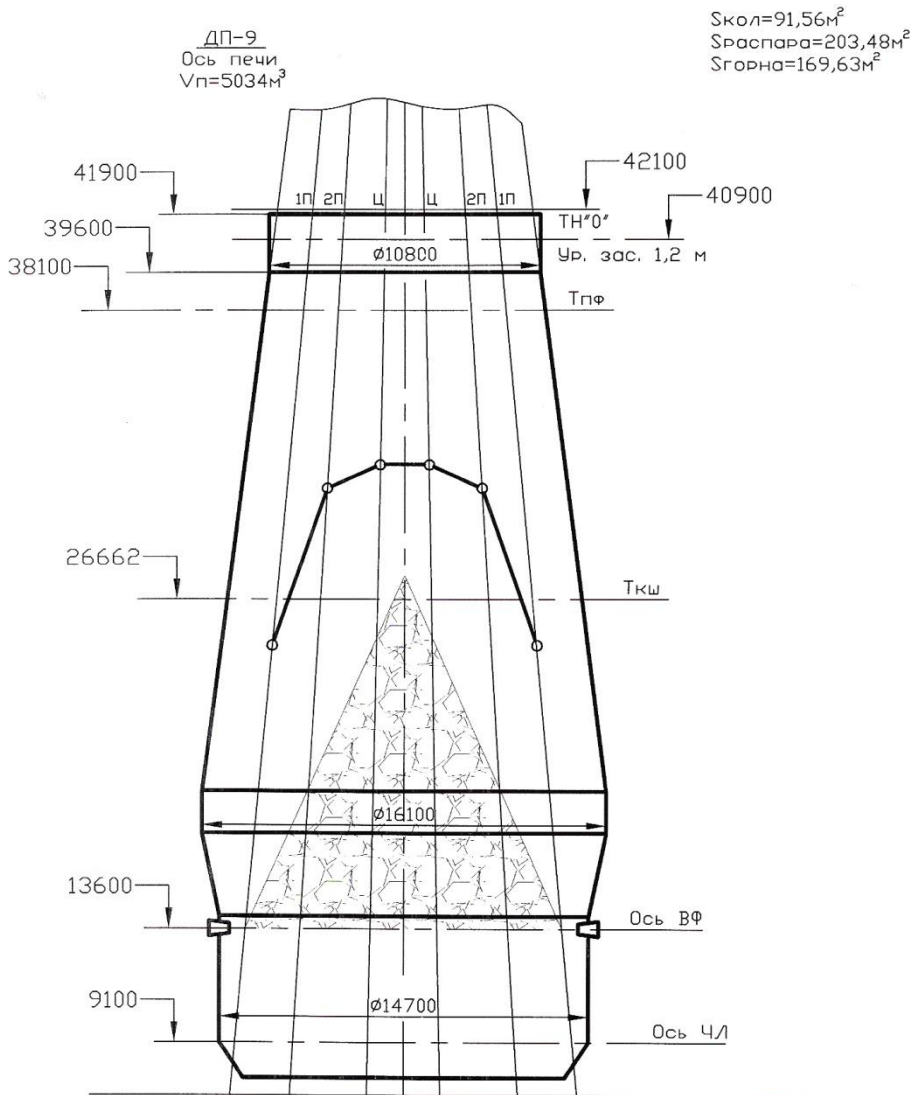
**Рис. 8.7.** Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период V (08–11.03.10)



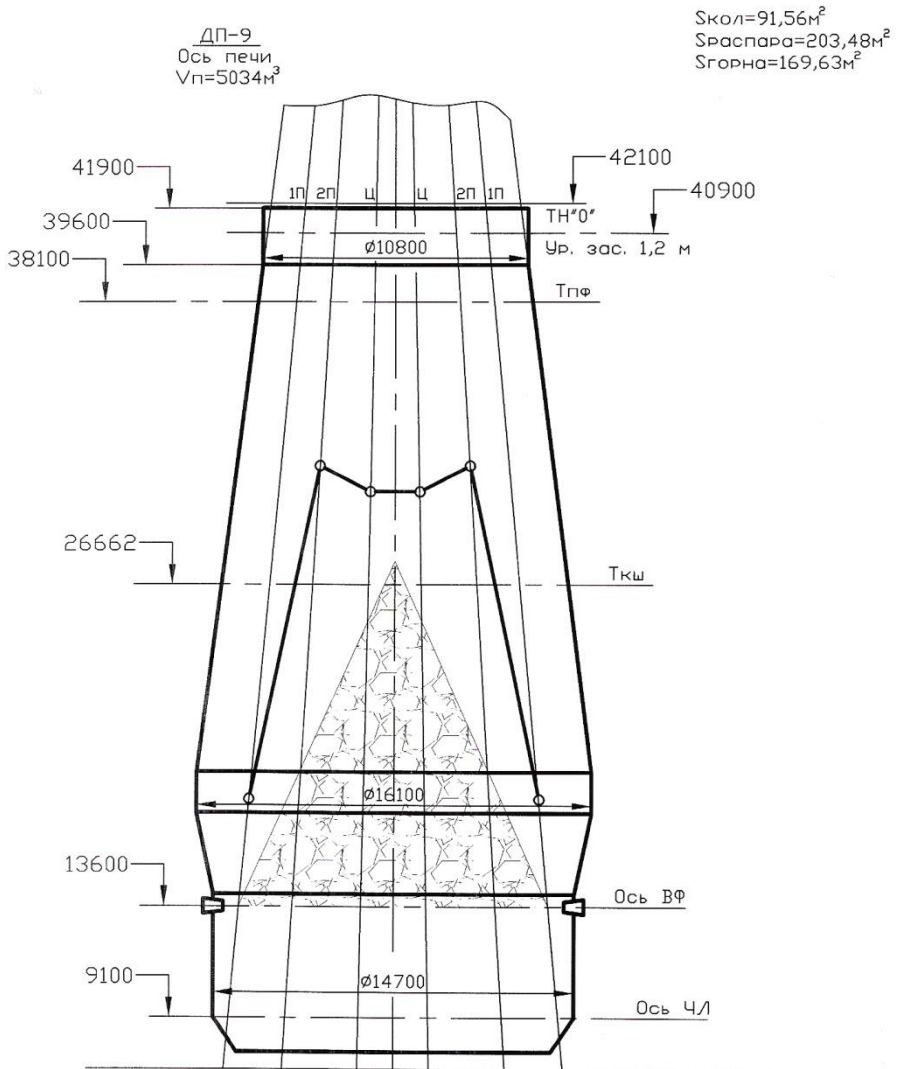
**Рис. 8.8.** Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период VI (11–13.03.10)



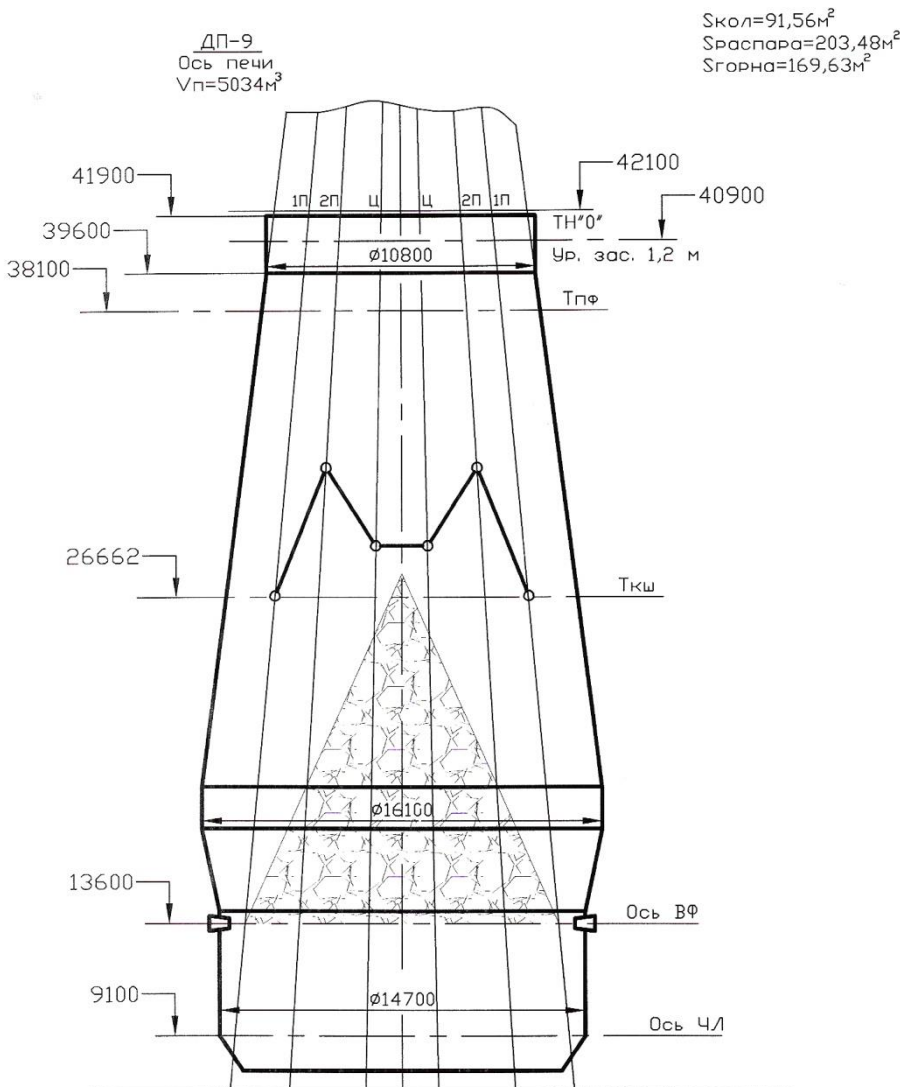
**Рис. 8.9.** Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период VII (13–15.03.10)



**Рис. 8.10.** Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период VIII (21–24.03.10)

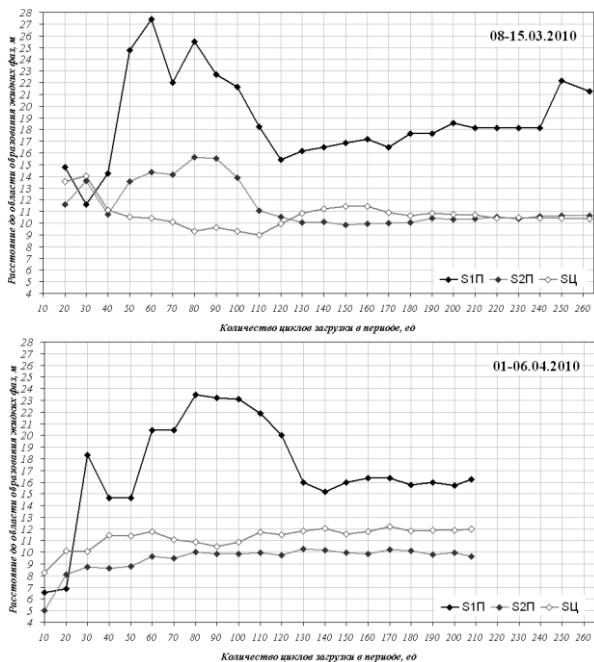


**Рис. 8.11.** Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период IX (01–03.04.10)



**Рис. 8.12.** Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП №9, период X (03–05.04.10)

Обоснование временного интервала, в течение которого определяются средние значения среднеквадратичных отклонений скоростей опускания шихты, выполнено расчетным методом. Для этого определены расстояния от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в трех контролируемых с помощью профилемера зонах печи при различных продолжительностях периодов. Приведенные на рис. 8.13 графики, показывают, что наибольшие отклонения положения пластичной зоны в контролируемых сечениях печи характерны для периодов, составляющих около 80 циклов загрузки. Об этом свидетельствуют экстремумы на кривых изменения расстояния от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз, соответствующие периоду из 80 циклов загрузки. Таким образом, выполненные расчетные исследования позволили обосновать выбор временного интервала, в течение которого определяются средние значения среднеквадратичных отклонений скоростей опускания шихты, составляющий около 80 циклов загрузки.



**Рис. 8.13.** Влияние количества циклов усреднения на величину расстояния от технологического нуля до области образования жидких фаз

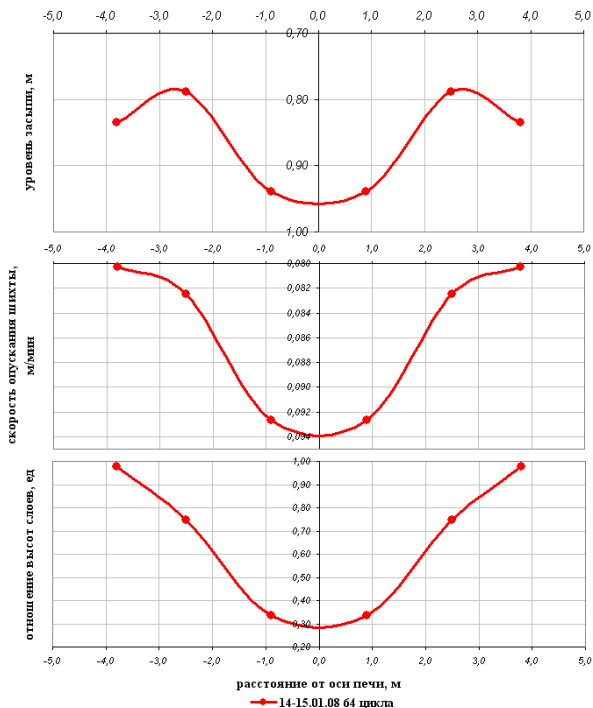
С целью подтверждения достоверности полученных результатов по определению положения пластичной зоны в доменной печи с помощью предложенного метода выполнено сопоставление полученных результатов с характером изменения показателя распределения шихтовых материалов, в качестве которого принято отношение высот железосодержащих материалов и кокса, рассчитываемых на основе информации профилемера (рис. 8.14–8.20). Сопоставительный анализ для периодов II, V, VII и VIII подтвердил известные положения о том, что изменение распределения рудных нагрузок приводит к изменению формы пластичной зоны. Как следует из приведенных в статье японских авторов результатов исследований, выполненных на двухмерной физической модели [193], при плавном возрастании отношения высот слоев (показатель распределения шихтовых материалов) от оси к стенке печи пластичная зона приобретает  $\Lambda$ -образную форму (рис. 8.21). При низкой рудной нагрузке на участке от оси до середины радиуса с резким ее возрастанием у стенки, пластичная зона имеет форму перевернутой буквы U. Из сопоставления рис. 8.21 и 8.15, 8.18 и 8.19 следует, что характер изменения показателя распределения – отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса для программ II периодов близок к варианту 8.21в, для которого характерно формирование пластичной зоны в виде перевернутой буквы U, а для программ периодов V, VII и VIII – варианту 8.21а с характерной  $\Lambda$ -образной формой пластичной зоны. Таким образом, полученная в результате расчетов с помощью предложенного метода форма пластичной зоны для периодов II, V, VII и VIII согласуется, в достаточной степени, с известными из литературных источников положениями.

Для остальных исследуемых периодов работы печи зависимость изменения распределения рудных нагрузок с формой пластичной зоны не установлена, что связано с тем, что расстояние до точки начала образования жидких фаз в осевой зоне печи превышает значение, полученное для примыкающей к ней промежуточной (2П) зоне. Следовательно, существуют факторы, не позволяющие для ряда периодов установить прямые связи рудных нагрузок с положением и формой пластичной зоны.

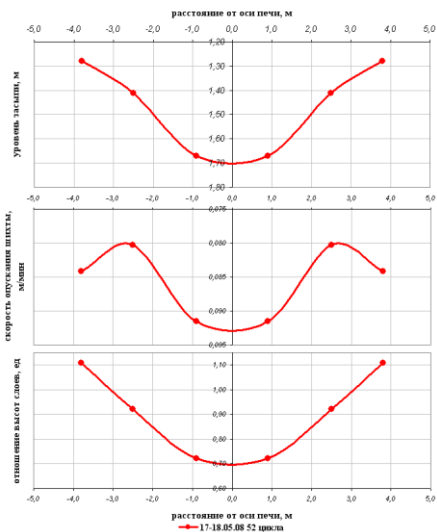
К числу таких факторов относятся скорость опускания шихтовых материалов в осевой зоне печи и профиль поверхности засыпи, образованный в результате выгрузки 80 циклов загрузки шихты. Как следует из представленных на рис. 8.14, 8.16–8.18 и 8.20 графиков изменения скоростей опускания шихты, в периодах I, III, IV, VI, IX и X скорость опускания шихты в осевой зоне печи



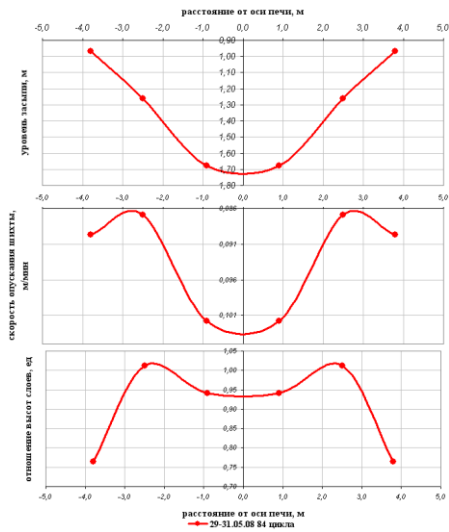
на уровне колошника превышает скорость опускания шихты во второй промежуточной зоне (2П) на 18–34%. Для сравнения следует отметить, что для периодов II, V, VII и VIII, превышение скорости в осевой зоне, по сравнению с ее значением в зоне 2П, изменяется от 4 до 7%. Исключение составляет II-ой период, где это превышение достигает 15%, но для него характерным является значительная глубина воронки (0,3 м), что также оказывает влияние на формирование пластичной зоны в осевой части печи.



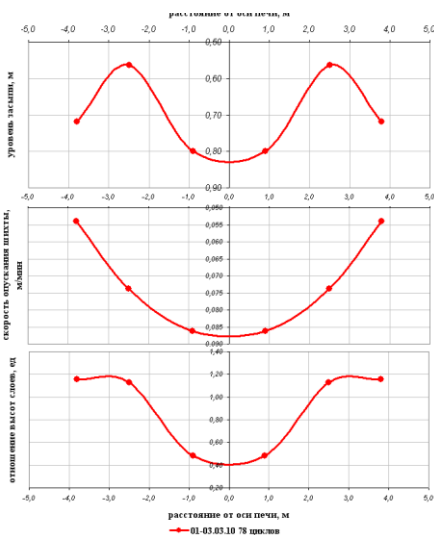
**Рис. 8.14.** Изменение профиля поверхности засыпи, скоростей опускания шихты и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса для периода работы печи I (14–15.01.08)



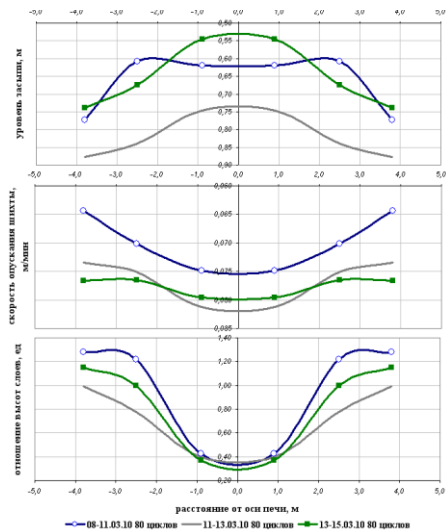
**Рис. 8.15.** Изменение профиля поверхности засыпи, скоростей опускания шихты и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса для периода работы печи II (17–18.05.08)



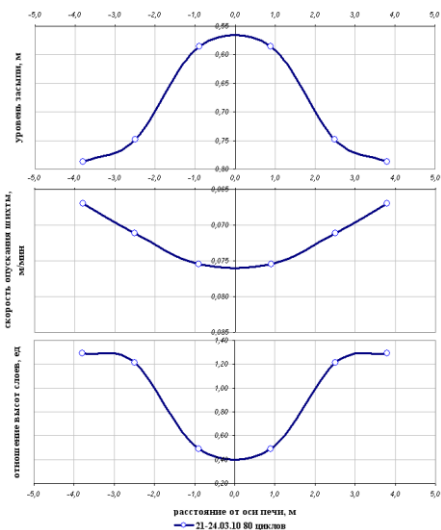
**Рис. 8.16.** Изменение профиля поверхности засыпи, скоростей опускания шихты и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса для периода работы печи III (29–31.05.08)



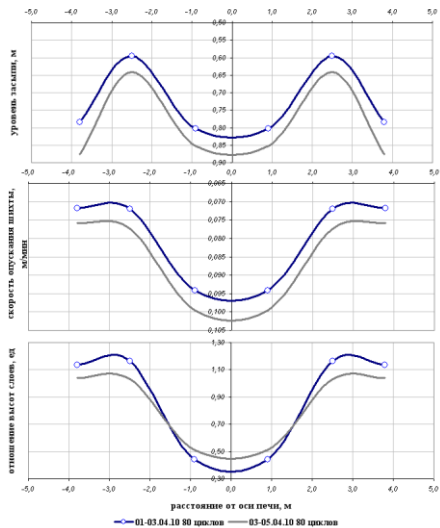
**Рис. 8.17.** Изменение профиля поверхности засыпи, скоростей опускания шихты и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса для периода работы печи IV (01–03.03.10)



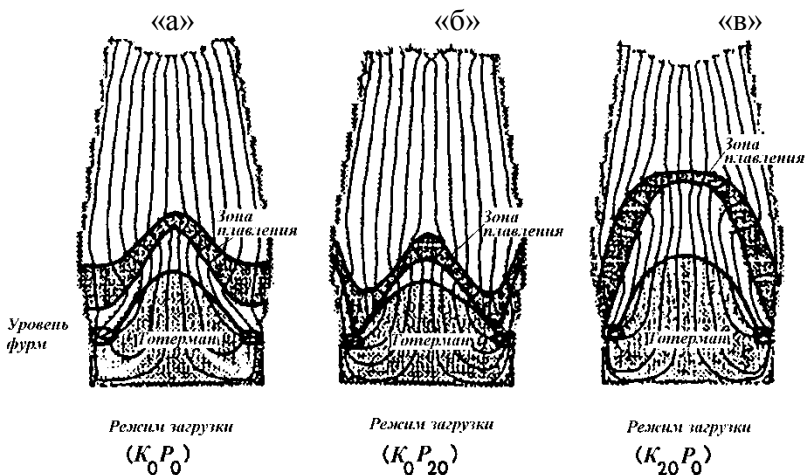
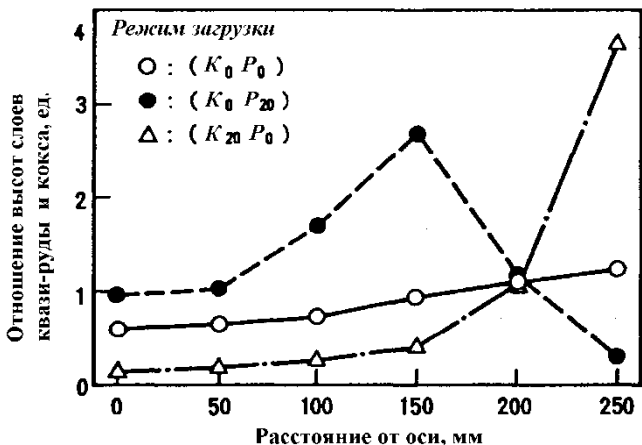
**Рис. 8.18.** Изменение профиля поверхности засыпи, скоростей опускания шихты и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса для периодов работы печи V, VI, VII (08–11.03.10, 11–13.03.10 и 13–15.03.10)



**Рис. 8.19.** Изменение профиля поверхности засыпи, скоростей опускания шихты и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса для периода работы печи VIII (21–24.03.10)



**Рис. 8.20.** Изменение профиля поверхности засыпи, скоростей опускания шихты и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса для периодов работы печи IX, X (01–03.04.10 и 03–05.04.10)



**Рис. 8.21.** Радиальное распределение квази-рудных нагрузок на двухмерной физической модели доменной печи при различных режимах загрузки и соответствующая им схема образования расплавов

Разработанный метод определения положения пластичной зоны опробован в условиях работы ДП №9 и может быть реализован в составе АСУ доменных печей, на которых установлены стационарные системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике. Выбор периода для

анализа характера изменения скоростей и определения на их основе положения пластичной зоны должен быть уточнен по результатам работы метода в составе АСУ ДП в течение продолжительного времени.

### **8.2.2 Факторный анализ влияния технологических условий на положение пластичной зоны в доменной печи**

Исследование влияния на положение пластичной зоны в печи различных условий плавки, характеризующихся соответствующими технологическими параметрами, является многофакторной задачей. Для выявления самых информативных и значимых показателей нами использован многомерный сравнительный анализ.

Для построения модели оптимальной структуры используется методика факторного анализа [194], позволяющая не только уменьшить размерность исходного факторного пространства, но и вскрыть оптимальную группировку переменных  $\{X^j\}^k$  для их интегральной «свертки»  $F^k$ , т.е. все связанные между собой переменные объединяются в один фактор. В этом случае они имеют максимальную нагрузку на общий для них фактор. Основная модель факторного анализа имеет вид:

$$Z_{ij} = A_{jk} \cdot F_{ki}, \quad (8.2.2.1)$$

где  $Z_{ij}$  – матрица стандартизованных исходных переменных;

$A_{jk}$  – факторные нагрузки переменной  $j$  на фактор  $k$ .

Факторная модель (8.2.2.1) внешне сходна с регрессионной, но в отличие от последней, она отражает внутреннее состояние объекта с помощью факторов состояния или обобщенных структур, полученных в результате «свертки» взаимосвязанных параметров.

Приняты два варианта представления исследуемых данных, характеризующих технологические особенности работы печи, в соответствии с которыми сформированы шесть выборок исследуемых данных [195]. Принятие двух вариантов представления исследуемых данных вызвано необходимостью обеспечения корректности входных данных факторного анализа. Каждая из выборок содержит информацию о параметрах, характеризующих положение пластичной зоны в печи – расстояниях от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз, рассчитанных для каждой из трех контролируемых профиломером зон, о показателях распределения шихтовых материалов и скоростях их опускания в контролируемых

профилемером зонах, а также информацию о технологических параметрах плавки. К этим шести матрицам был применен факторный анализ с целью выявления наиболее значимых факторов, оказывающих определяющее влияние, т.е. имеющих наибольшие факторные нагрузки на общий фактор с показателем положения пластичной зоны в печи – расстоянием от уровня засыпи до точки начала образования жидких фаз.

В первом варианте анализа были сформированы три выборки (1–3), представляющие собой технологические параметры доменной плавки в исследуемые периоды работы ДП №9, а также рассчитываемые на основе информации профилемера с помощью предложенного метода параметры, характеризующие положение пластичной зоны в печи, соответственно в трех зонах (1П, 2П и Ц). В результате расчетно-аналитических определений для зон 1П и 2П получены матрицы «нагрузок» отдельных показателей и обобщенных «свернутых» их значений на три генеральных фактора, отражающих весь исследуемый массив данных (табл. 8.7–8.9). Для зоны Ц характерным явилось получение матрицы нагрузок на два генеральных фактора. Графически выявленные связи представлены на рис. 8.22.

Анализ влияния переменных на показатель положения пластичной зоны в печи – расстояние от уровня засыпи до точки начала образования жидких фаз в трех зонах печи показал следующее. По величинам нагрузок факторы условно можно охарактеризовать следующим образом:

Для зоны 1П факторная структура исследуемых показателей показана на рис. 8.22а, которую можно трактовать следующим образом:

1. Значимые показатели первого фактора характеризуют влияние на показатель производства чугуна ( $f_n = -0,91$ ) скорости опускания шихтовых материалов в этой зоне печи ( $f_n = -0,9$ ), показателя распределения шихтовых материалов на колошнике, выражаемого отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $H_{жс}/H_k$ , в первой промежуточной зоне ( $f_n = 0,89$ ), степени использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n = -0,63$ ), а также расхода кокса ( $f_n = -0,51$ ).

2. Значимые составляющие второго фактора – высота слоев железосодержащих материалов ( $f_n = 0,91$ ), которая определила, в значительной степени, положение пластичной зоны – расстояние в этой зоне от технологического нуля до точки образования жидких фаз ( $f_n = 0,88$ ), которое обусловлено также отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $H_{жс}/H_k$  ( $f_n = 0,33$ );

Таблица 8.7

**Численные значения факторных нагрузок параметров и показателей доменной плавки для ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (матрица 1)**

Показатель	Обозначение	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
<i>Расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз (пластичной зоны) в зоне 1П, м</i>	S <sub>1П</sub>	-0,03	0,88	0,19
Отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса в зоне 1П, ед.	H <sub>жс</sub> / H <sub>к</sub>	0,89	0,33	0,09
Высота слоя железосодержащих компонентов в зоне 1П, м	H <sub>жс</sub>	-0,04	0,91	-0,01
Скорость опускания шихтовых материалов в зоне 1П, м/мин.	V <sub>ш1П</sub>	-0,90	0,24	0,31
Расход кокса, кг/т чугуна	K	-0,51	0,03	0,78
Содержание кремния в чугуне, %	[Si]	-0,06	0,55	0,78
Степень использования монооксида углерода, ед.	η <sub>со</sub>	-0,63	0,09	-0,70
Производство чугуна	Пр	-0,91	0,15	0,08

Таблица 8.8

**Численные значения факторных нагрузок параметров и показателей доменной плавки для ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (матрица 2)**

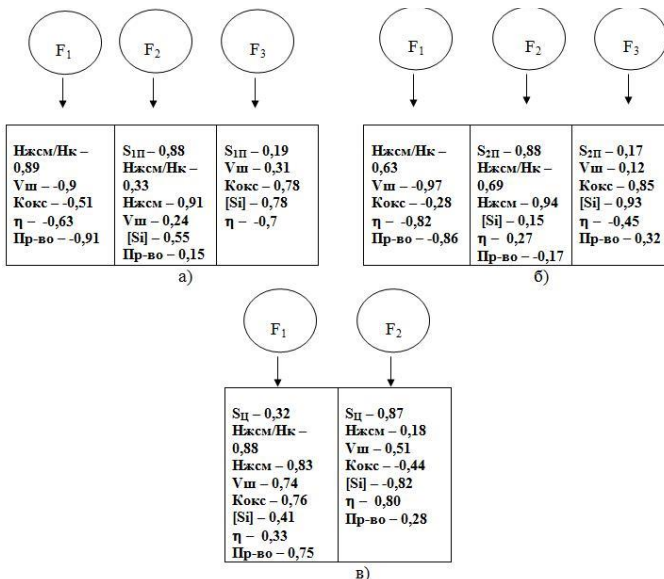
Показатель	Обозначение	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
<i>Расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз (пластичной зоны) в зоне 2П, м</i>	S <sub>2П</sub>	-0,01	0,88	0,17
Отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса в зоне 2П, ед.	H <sub>жс</sub> / H <sub>к</sub>	0,63	0,69	-0,10
Высота слоя железосодержащих компонентов в зоне 2П, м	H <sub>жс</sub>	-0,05	0,94	-0,06
Скорость опускания шихтовых материалов в зоне 2П, м/мин.	V <sub>ш2П</sub>	-0,97	-0,02	0,12
Расход кокса, кг/т чугуна	K	-0,28	-0,05	0,85
Содержание кремния в чугуне, %	[Si]	0,08	0,15	0,92
Степень использования монооксида углерода, ед.	η <sub>со</sub>	-0,81	0,27	-0,45
Производство чугуна	Пр	-0,86	-0,17	0,32



Таблица 8.9

**Численные значения факторных нагрузок параметров и показателей доменной плавки для ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (матрица 3)**

Показатель	Обозначение	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
Расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз (пластичной зоны) в зоне Ц, м	S <sub>Ц</sub>	0,32	0,87
Отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса в зоне Ц, ед.	H <sub>жс</sub> / H <sub>к</sub>	0,88	0,02
Высота слоя железосодержащих компонентов в зоне Ц, м	H <sub>жс</sub>	0,83	0,18
Скорость опускания шихтовых материалов в зоне Ц, м/мин.	V <sub>ш1П</sub>	0,74	0,51
Расход кокса, кг/т чугуна	K	0,76	-0,44
Содержание кремния в чугуне, %	[Si]	0,41	-0,82
Степень использования монооксида углерода, ед.	η <sub>со</sub>	0,33	0,80
Производство чугуна	Пр	0,75	0,28



а) 1П (матрица 1); б) 2П (матрица 2); в) Ц (матрица 3).

Рис. 8.22. Факторный анализ показателей плавки (10 периодов)

скоростью опускания шихты в этой зоне печи ( $f_n=0,24$ ) и с содержанием кремния в чугуна ( $f_n=0,55$ ).

3. Третий фактор наиболее нагружают расход кокса в печи ( $f_n=0,78$ ), содержание кремния в чугуна ( $f_n=0,78$ ), степень использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n= -0,70$ ), а также скорость опускания шихты в первой промежуточной зоне ( $f_n=0,31$ ).

Таким образом, первый и третий фактор, в большей мере, «нагрузили» технологические параметры плавки. Показатель положения пластичной зоны в печи – расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз отличается значимой нагрузкой на второй фактор.

Для зоны 2П, по величинам нагрузок, факторы условно можно охарактеризовать следующим образом (рис. 8.22б):

1. Значимые показатели первого фактора свидетельствуют о наибольшем влиянии на скорость опускания шихтовых материалов в этой зоне печи ( $f_n= -0,97$ ) показателя производства чугуна ( $f_n= -0,86$ ), показателя распределения шихтовых материалов на колошнике, выражаемого отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $N_{жсм}/N_k$ , во второй промежуточной зоне ( $f_n=0,63$ ), степени использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n= -0,82$ ), а также расхода кокса ( $f_n= -0,28$ ).

2. Значимые составляющие второго фактора – высота слоев железосодержащих материалов ( $f_n=0,94$ ), которая определила расстояние в этой зоне от технологического нуля до точки образования жидких фаз ( $f_n=0,88$ ), отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $N_{жсм}/N_k$  ( $f_n=0,69$ ), скорость опускания шихты в этой зоне печи ( $f_n=0,24$ ), и частично, степень использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n=0,27$ ).

3. Третий фактор характеризует влияние на содержание кремния в чугуна ( $f_n=0,93$ ) расхода кокса в печи ( $f_n=0,85$ ), степени использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n= -0,45$ ), а также показателя производства чугуна ( $f_n=0,32$ ).

При этом первый и третий фактор, в большей мере, «нагрузили» технологические параметры плавки. Показатель положения пластичной зоны в печи «нагрузил» второй фактор.

Для зоны Ц, по величинам нагрузок, факторы условно можно охарактеризовать следующим образом (рис. 8.22в):

1. Значимые составляющие первого интегрального фактора – отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $N_{жсм}/N_k$  ( $f_n=0,88$ ), а также высота слоя железосодержащих материалов ( $f_n=0,83$ ), которые наиболее связаны с расходом кокса

( $f_n=0,76$ ), производством ( $f_n=0,75$ ), а также определяют скорость опускания шихты в осевой зоне печи ( $f_n=0,74$ ), содержание кремния в чугуне ( $f_n=0,41$ ), степень использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n=0,33$ ), расстояние в этой зоне от технологического нуля до точки образования жидких фаз ( $f_n=0,32$ ).

2. Показатели второго фактора характеризуют взаимосвязь положения пластичной зоны, оцениваемое по расстоянию от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в осевой зоне печи ( $f_n=0,87$ ), с содержанием кремния в чугуне ( $f_n=0,82$ ), степенью использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n=0,8$ ), скоростью опускания шихты в осевой зоне ( $f_n=0,51$ ), расходом кокса ( $f_n= -0,44$ ) и производством ( $f_n=0,28$ ).

Как следует из факторного анализа, нагрузки расстояния от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в осевой зоне печи распределились на оба фактора, причем, более значимую роль при этом они играют во втором факторе, увязывая показатели, рассчитанные по информации профилемера, с технологическими параметрами плавки.

Во втором варианте анализа были сформированы три выборки (4–6), представляющие собой технологические параметры доменной плавки в исследуемые периоды работы ДП №9, а также рассчитываемые на основе информации профилемера с помощью предложенного метода параметры, характеризующие положение пластичной зоны в печи, соответственно в трех зонах (1П, 2П и Ц). В результате расчетно-аналитических определений для зон 1П и Ц получены матрицы «нагрузок» отдельных показателей и обобщенных «свернутых» их значений на два генеральных фактора, отражающих весь исследуемый массив данных (табл. 8.10–8.12). Для зоны 2П характерным явилось получение матрицы нагрузок на три генеральных фактора. Графически выявленные связи представлены на рис. 8.23.

Анализ влияния переменных на показатель положения пластичной зоны в печи – расстояние от уровня засыпи до точки начала образования жидких фаз в трех зонах печи показал следующее. По величинам нагрузок факторы условно можно охарактеризовать следующим образом:

Для зоны 1П факторная структура исследуемых показателей представлена на рис. 8.23а, которую можно трактовать следующим образом:

Таблица 8.10

**Численные значения факторных нагрузок параметров и показателей доменной плавки для ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (матрица 4)**

Показатель	Обозначение	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
<i>Расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз (пластичной зоны) в зоне 1П, м</i>	S <sub>1П</sub>	-0,06	0,87
Отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса в зоне 1П, ед.	H <sub>жс</sub> /H <sub>к</sub>	0,84	0,31
Высота слоя железосодержащих компонентов в зоне 1П, м	H <sub>жс</sub>	-0,08	0,78
Скорость опускания шихтовых материалов в зоне 1П, м/мин.	V <sub>ш1П</sub>	-0,79	0,38
Содержание кремния в чугуна, %	[Si]	0,05	0,86
Степень использования монооксида углерода, ед.	η <sub>со</sub>	-0,78	-0,23
Содержание окатышей в шихте, кг/т чугуна	Ок	-0,91	0,17
Температура кладки шахты, °С	T <sub>кл.ш.</sub>	0,91	-0,28

Таблица 8.11

**Численные значения факторных нагрузок параметров и показателей доменной плавки для ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (матрица 5)**

Показатель	Обозначение	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
<i>Расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз (пластичной зоны) в зоне 2П, м</i>	S <sub>2П</sub>	0,16	0,84	0,27
Отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса в зоне 2П, ед.	H <sub>жс</sub> /H <sub>к</sub>	-0,58	0,77	-0,05
Высота слоя железосодержащих компонентов в зоне 2П, м	H <sub>жс</sub>	0,12	0,94	-0,08
Скорость опускания шихтовых материалов в зоне 2П, м/мин.	V <sub>ш2П</sub>	0,92	-0,12	-0,07
Содержание кремния в чугуна, %	[Si]	0,05	0,12	0,98
Степень использования монооксида углерода, ед.	η <sub>со</sub>	0,77	0,20	-0,52
Содержание окатышей в шихте, кг/т чугуна	Ок	0,96	-0,03	0,09
Температура кладки шахты, °С	T <sub>кл.ш.</sub>	-0,93	-0,21	-0,15

1. Значимые показатели первого фактора, объединяющие параметры и показатели плавки, характеризуют влияние на температуру кладки шахты ( $f_n=0,91$ ) доли окатышей в железосодержащей части шихты ( $f_n=-0,91$ ), показателя распределения шихтовых материалов на колошнике, выражаемого отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $H_{жс}/H_k$  ( $f_n=0,84$ ), скорости опускания шихтовых материалов в этой зоне печи ( $f_n=-0,79$ ), степени использования монооксида углерода  $\eta_{со}$  ( $f_n=-0,78$ ).

2. Значимые составляющие второго фактора определили параметры, оказывающие наибольшее влияние на расстояние от технологического нуля до пластичной зоны ( $f_n=0,87$ ), к числу которых следует отнести: содержание кремния в чугуне ( $f_n=0,86$ ), высоту слоев железосодержащих материалов ( $f_n=0,78$ ). В меньшей степени расстояние до пластичной зоны определяется скоростью опускания шихты в этой зоне печи ( $f_n=0,38$ ), а также отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $H_{жс}/H_k$  ( $f_n=0,31$ ).

Таблица 8.12

**Численные значения факторных нагрузок параметров и показателей доменной плавки для ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (матрица б)**

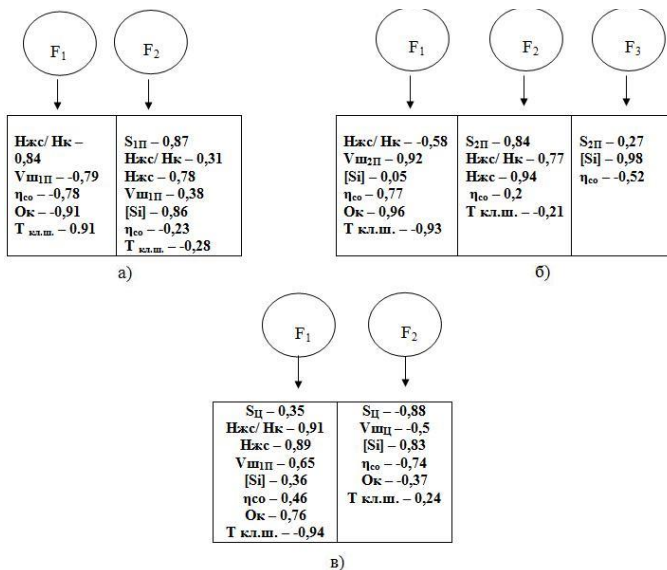
Показатель	Обозначение	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
<i>Расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз (пластичной зоны) в зоне Ц, м</i>	S <sub>Ц</sub>	0,35	-0,88
Отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса в зоне Ц, ед.	H <sub>жс</sub> /H <sub>к</sub>	0,91	0,09
Высота слоя железосодержащих компонентов в зоне Ц, м	H <sub>жс</sub>	0,89	-0,06
Скорость опускания шихтовых материалов в зоне Ц, м/мин.	V <sub>ш.П</sub>	0,65	-0,50
Содержание кремния в чугуне, %	[Si]	0,36	0,83
Степень использования монооксида углерода, ед.	$\eta_{со}$	0,46	-0,74
Содержание окатышей в шихте, кг/т чугуна	Ок	0,76	-0,37
Температура кладки шахты, °С	T <sub>кл.ш.</sub>	-0,94	0,24

То есть, показатель положения пластичной зоны в печи – расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз «нагрузил» второй фактор.

Для зоны 2П, по величинам нагрузок, факторы условно можно охарактеризовать следующим образом (рис. 8.23б):

1. Значимым показателем первого фактора явилось содержание окатышей в шихте ( $f_n=0,96$ ), оказывающих наибольшее влияние на температуру кладки шахты ( $f_n=-0,93$ ), скорость опускания шихтовых материалов в этой зоне печи ( $f_n=0,92$ ), степень использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n=0,77$ ), а также показатель распределения шихтовых материалов на колошнике, выражаемого отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $N_{жсм}/N_k$  в этой зоне ( $f_n=-0,58$ ).

2. Значимая составляющая второго фактора – высота слоев железосодержащих материалов ( $f_n=0,95$ ) определила расстояние до пластичной зоны ( $f_n=0,84$ ), а также повлияла на отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $N_{жсм}/N_k$  ( $f_n=0,77$ ).



а) 1П (матрица 4); б) 2П (матрица 5); в) Ц (матрица 6).

Рис. 8.23. Факторный анализ показателей плавки (10 периодов)

3. Третий фактор характеризует взаимосвязь содержания кремния в чугунах ( $f_n=0,98$ ) со степенью использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n=-0,52$ ).

При этом, показатель положения пластичной зоны в печи – расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз «нагрузил» второй фактор.

Для зоны Ц, по величинам нагрузок, факторы условно можно охарактеризовать следующим образом (рис. 8.23в):

1. Значимые показатели первого фактора определили влияние на температуру кладки шахты ( $f_n=-0,94$ ) таких параметров: отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса  $H_{жсм}/H_k$  в этой зоне ( $f_n=0,92$ ), высоты слоев железосодержащих материалов ( $f_n=0,89$ ), скорости опускания шихтовых материалов в этой зоне печи ( $f_n=0,65$ ), степени использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n=0,46$ ), а также расстояния до пластичной зоны ( $f_n=0,35$ ).

2. Показатели второго фактора характеризуют взаимосвязь положения пластичной зоны, оцениваемое по расстоянию от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в осевой зоне печи ( $f_n=-0,88$ ), с содержанием кремния в чугунах ( $f_n=0,83$ ), степенью использования монооксида углерода  $\eta_{co}$  ( $f_n=-0,74$ ), скоростью опускания шихты в осевой зоне ( $f_n=-0,50$ ) и содержанием окатышей в шихте ( $f_n=-0,37$ ).

Таким образом, расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в осевой зоне печи «нагрузили» оба фактора, причем более значимую роль при этом они играют во втором факторе.

Анализ результатов полученных факторных нагрузок позволил установить:

1. Из особенностей нагрузок, определяющих расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в осевой зоне печи (матрицы 3 и 6) следует, что расположение границ пластичной зоны вблизи оси печи ближе к верху шахты объясняется меньшей скоростью опускания шихты в осевой зоне. Расположение границ пластичной зоны вблизи оси печи ближе к верху шахты обуславливает большее значение содержания кремния в чугунах. Такой характер изменения положения пластичной зоны согласуется с результатами выполненных ранее исследований по прогнозированию содержания кремния в чугунах по изменению скорости в осевой зоне печи [196].

2. Второй фактор матрицы 6 позволил установить влияние содержания окатышей в шихте на положение пластичной зоны в

осевой части печи. Установлено, что большее содержание окатышей вызывает формирование более высокой пластичной зоны. Известно, что окатыши имеют меньшие значения температур плавления, что приводит к увеличению высоты пластичной зоны.

3. Из анализа факторов матриц 3 и 6 следует, что при увеличении объема сухой зоны, что характеризуется уменьшением расстояния до пластичной зоны в осевой части печи, степень использования монооксида углерода  $\eta_{\text{CO}}$  возрастает.

4. Показатели второго фактора в 1, 2, 4 и 5 матрицах позволили установить определяющее влияние высоты слоев железосодержащих материалов на положение пластичной зоны, оцениваемое по расстоянию от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в зонах 1П и 2П. Именно эта величина, согласно предлагаемому методу, определяет, в значительной степени, изменение положения пластичной зоны.

Если обобщить полученные результаты с точки зрения влияния технологических параметров на положение пластичной зоны в печи, определяемое расстояниями от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в трех зонах сечения печи, то можно заключить, что связь этих расстояний с технологическими параметрами, характеризующая полученными факторными нагрузками  $f_n$ , подтверждает достоверность определения положения пластичной зоны в доменной печи с помощью предложенного метода.

Полученные результаты, по определению положения пластичной зоны, подтверждаются анализом показаний стационарных термопар, установленных в шахте и на периферии ДП №9. Установлено, что показания стационарных термопар, расположенных в кладке шахты печи на отметке 26,6 м, возрастают, а температура периферии убывает, и наоборот. Это связано с перераспределением газового потока в радиальном направлении, на которое оказывает влияние изменение конфигурации пластичной зоны в пределах отметок 26–29 метров.

Разработанный метод опробован в условиях работы ДП №9 и может быть реализован в составе АСУ доменных печей, на которых установлены стационарные системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике. Выбор периода для анализа характера изменения скоростей и определения на их основе положения пластичной зоны должен быть уточнен по результатам применения метода в составе АСУ ДП в течение продолжительного времени.



## ГЛАВА 9

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТОЛБА ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Управляющие воздействия на ход процессов доменной плавки направлены на совершенствование технологии, в том числе, на формирование рациональной структуры столба шихты в печи. В связи с отсутствием возможности непосредственного контроля состава и структуры столба шихты в печи, управление ее формированием осуществляется на основе математического моделирования отдельных составляющих структуру элементов. Известные математические модели, позволяющие определять положение элементов структуры столба шихты в печи, не являются совершенными в связи с отсутствием в настоящее время возможности их адаптации к конкретным условиям плавки. Информация, получаемая с помощью стационарных систем измерения поверхности засыпи шихты, является важным аспектом в решении вопросов адаптации моделей структуры столба шихты к реальным процессам в печи.

Необходимым условием высокопроизводительной и экономичной работы доменной печи является обеспечение благоприятных условий движения газового потока через столб опускающихся шихтовых материалов [2]. При этом основными факторами, определяющими распределение и движение газового потока по горизонтальным сечениям, являются ситовый состав материалов, характер распределения шихты на колошнике и ее перераспределение при опускании, а также профиль печи и дутьевой режим [81]. Важность состояния, характера формирования и влияния на процессы плавки особенностей движения газового потока в доменной печи отмечена в монографиях Готлиба А. Д., Стефановича М. А., Рамма А. Н., Тарасова В. П. и др. [81, 96, 169, 170, 203], разработавших основы аналитического описания процессов газодинамики. Известна также, разработанная под руководством В. Н. Ковшова [204], математическая модель газодинамики нижней и верхней зон доменной печи.

Распределение газового потока по сечению печи и его движение определяется сформированной структурой столба шихтовых материалов, которая может быть представлена как система взаимосвязанных элементов, для описания которых могут быть усовершенствованы известные и разработаны новые методы их расчета. Конечной целью исследований, представленных в данной главе, являлась разработка метода аналитического описания газодинамических процессов в печи на основе комплексного рассмотрения их особенностей в элементах структуры столба шихтовых материалов. Повышение достоверности результатов математического описания элементов структуры столба шихты в доменной печи обеспечивается на основе использования получаемой с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи шихты информации.

### **9.1 Разработка и совершенствование математических моделей структурных элементов столба шихтовых материалов в доменной печи**

В структуре столба шихты выделяется ряд зон (рис. 9.1), которые определяют особенности работы газов в печи и достижимую степень использования их тепловой и химической энергии, а, следовательно, и расход кокса [205, 206]: зона (1) твердых подвижных шихтовых материалов – «сухая» зона, зона (2) сплошной коксовой насадки; зона (3) – пластичная зона; «малоактивный коксовый конус» (4); фурменная зона (5); коксовый канал (6), отдушины (7, 8); зоны жидких продуктов плавки.

#### **9.1.2 Разработка алгоритма расчета положения слоев шихтовых материалов при их опускании в сухой зоне доменной печи**

Значительную роль в восстановительных процессах, протекающих в доменной печи, играет зона твердых подвижных шихтовых материалов – сухая зона. Верхняя граница этой зоны формируется распределением шихтовых материалов на колошнике печи, а нижняя – началом размягчения материалов (пластичная зона). Причем, увеличение протяженности сухой зоны способствует увеличению степени использования тепловой и химической энергии газового потока. Опускание шихты в доменной печи является результатом уменьшения объема шихты за счет горения углерода на фурмах в периферийной части горна и

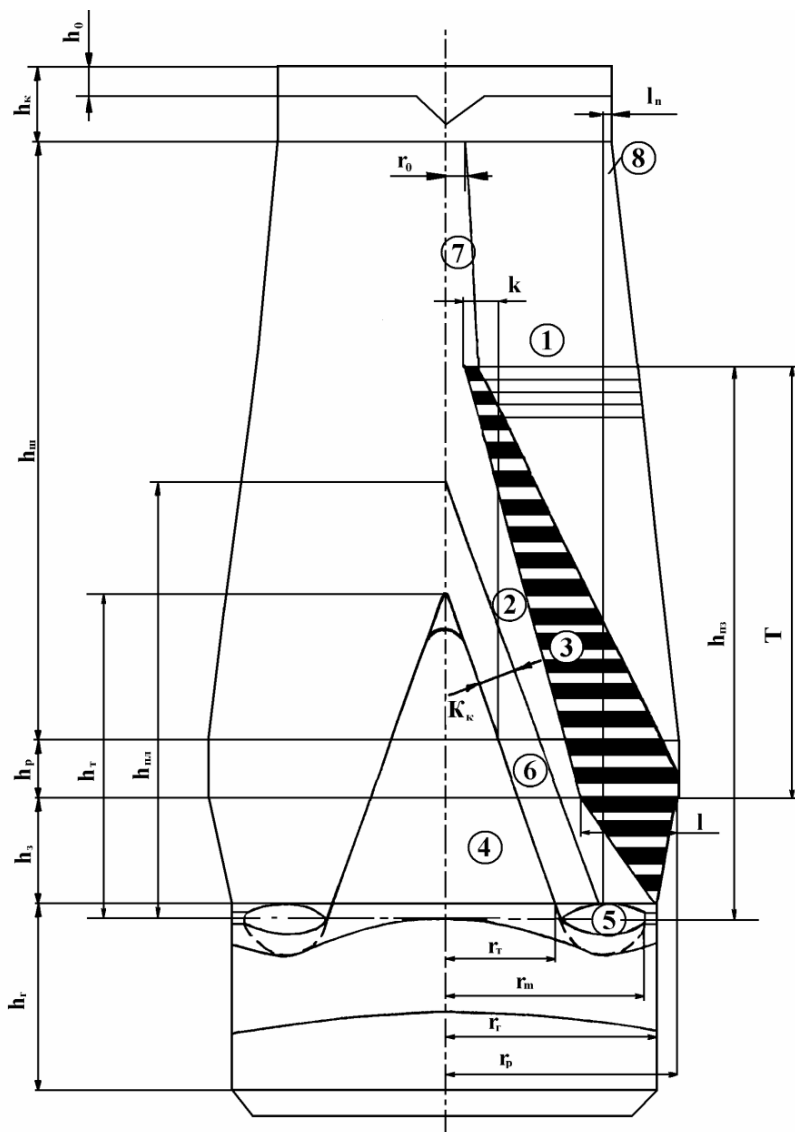
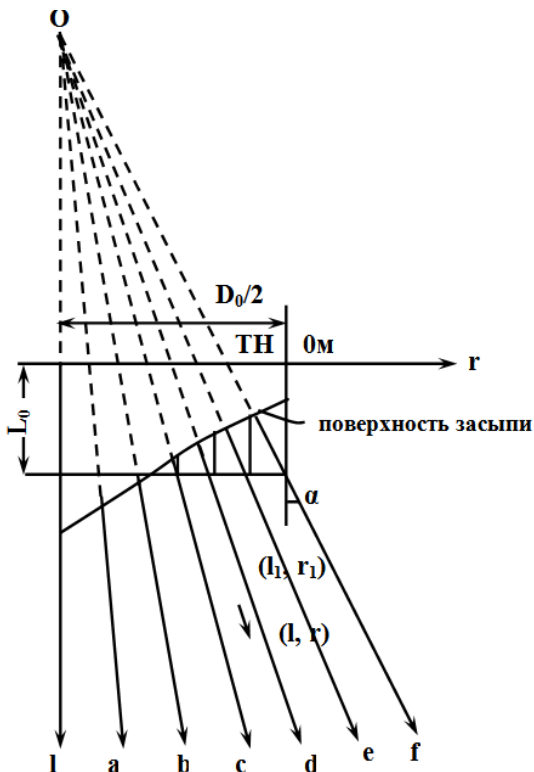


Рис. 9.1. Схема структуры столба шихтовых материалов в доменной печи

плавления железосодержащей части [81]. Опускание шихты происходит под воздействием ее веса. В ряде литературных источников предполагается [96, 210], что слои шихтового материала в шахте печи равномерно плоскопараллельно перемещаются вниз. Исследования, проведенные на затушенных печах, показали, что выгруженный на колошник шихтовый материал, перемещаясь вниз в шахте печи, сохраняет созданное при загрузке послонное распределение [211]. По мере опускания слоев, их толщина уменьшается, как и угол откоса. Как показано в работе [85], скорость опускания шихтовых материалов до середины распара печи мало изменяется, затем незначительно уменьшается, а в заплечиках увеличивается под воздействием горения кокса в фурменных очагах и плавления железорудных материалов.

Для математического описания процесса опускания шихтовых материалов в сухой зоне доменной печи принято условное разделение шахты на две зоны, в одной из которых, на основании результатов исследований, представленных в главе 5, слои материалов опускаются с одинаковой по радиусу печи скоростью. Протяженность этой зоны в нижней части достигает горизонта распара печи. Начиная с распара, что соответствует верхней границе второй зоны, шихта опускается со скоростями, формируемыми процессами в нижней части печи.

Разработан алгоритм, описывающий перемещение материалов в обеих зонах шахты печи [212]. Характер слоев материалов, установленный при исследованиях, проведенных на замороженных печах, позволяет предположить, что шихта в шахте печи равномерно перемещается вдоль лучей, проведенных из точки пересечения образующей конуса шахты печи с вертикальной осью и проходящих через середины равновеликих кольцевых зон [79]. При этом параметры рудных и коксовых слоев и их перемещение могут быть определены с помощью аналитических выражений [79], смысл которых поясняется рис. 9.2. Здесь  $D_{\text{кол}}$  и  $H_{\text{кол}}$  – диаметр и высота колошника,  $\alpha$  – угол наклона шахты,  $(l_i, r_i)$  –  $(l, r)$  – путь опускания за соответствующее время материала одной подачи объемом  $V_t, \text{ м}^3$ .



$D_0$  – диаметр колошника;

$L_0$  – высота колошника;

$\alpha$  – угол наклона образующей шахты;

ТН – технологический нуль;

$(l_i, r_i)$  – точка поверхности засыпи до опускания в коническую часть печи;

$(l, r)$  – точка поверхности засыпи после опускания в коническую часть печи;

$l$  – ось печи;

$a, b, c, d, e, f$  – линии опускания шихты в конической части печи.

**Рис. 9.2.** Расчетная схема опускания материалов в шахте

1. Координата  $l$ :

$$a) l_i \leq l_0, \text{ когда } V_t \leq (\pi/4) D_{\text{кол}}^2 (H_{\text{кол}} - l_i)$$

$$l = V_t / (\pi/4) D_{\text{кол}}^2 + l_i \quad (9.1)$$

при  $V_t > (\pi/4) D_{\text{кол}}^2 (H_{\text{кол}} - l_i)$

$$l = \{ (1/8) (D_{\text{кол}} / \text{tg} \alpha)^3 + 3 [V_t - (\pi/4) D_{\text{кол}}^2 (H_{\text{кол}} - l_i)] \pi \text{tg}^2 \alpha \}^{1/3} D_{\text{кол}} / 2 \text{tg} \alpha + H_{\text{кол}} \quad (9.2)$$

б)  $l_i > H_{\text{кол}}$ , тогда

$$l = \{ (D_{\text{кол}} / 2 \text{tg} \alpha - H_{\text{кол}} + l_i)^3 + 3 V_t \pi \text{tg}^2 \alpha \}^{1/3} - D_{\text{кол}} / 2 \text{tg} \alpha + H_{\text{кол}} \quad (9.3)$$

2. Координата  $r$ а)  $l_i \leq H_{\text{кол}}$ , тогда  $r = r_i$ б)  $l_i > H_{\text{кол}}$ ,когда  $l_i \leq H_{\text{кол}}$ ,  $r = r_i(l + D_{\text{кол}}/2 \operatorname{tg} \alpha - H_{\text{кол}}) / (D_{\text{кол}}/2 \operatorname{tg} \alpha)$ ,когда  $l_i > H_{\text{кол}}$ ,  $r = r_i(l + D_{\text{кол}}/2 \operatorname{tg} \alpha - H_{\text{кол}}) / (l_i + D_{\text{кол}}) / (2 \operatorname{tg} \alpha - H_{\text{кол}})$ .

Исходными для расчета являются профили засыпи шихты на колошнике печи, которые могут быть получены либо в результате моделирования с помощью модели радиального распределения шихты на колошнике, либо на основе данных профилемера.

С помощью математического описания процесса может быть рассчитано расстояние, которое проходят слои материала одной порции. При этом, как показано выше, в первой зоне шахты печи скорость опускания слоев шихты одинакова по всему ее сечению.

Математическое описание процесса опускания шихтовых материалов во второй зоне шахты печи может быть выполнено с учетом влияния на движение шихты происходящих в нижней части печи процессов [213]. Шихта в доменной печи движется под действием силы веса вследствие высвобождения объемов в результате горения кокса в фурменной зоне (42–52% уменьшения объема шихты). В результате этого не только освобождается пространство для поступления новых порций горючего сверху, но и создаются условия существования вторичных факторов, обуславливающих сокращение объема материалов. К ним относятся: уминка шихты, расход кокса на прямое восстановление, процесс плавления железорудных материалов, выпуск жидких продуктов плавки и др.

Математическое описание процесса опускания шихтовых материалов в сухой зоне доменной печи базируется на известных результатах исследований оценки вклада процесса горения кокса на фурмах в распределение скоростей схода шихты [85]. По современным представлениям, поступление кокса в зоны циркуляции у фурм доменной печи аналогично истечению сыпучего материала из отверстий, и носит дискретный характер, обусловленный образованием динамически неустойчивых сводов. Принято, что над фурменными очагами образуются эллипсоиды разрыхления, которые пересекаются, и в результате их разрушения, скорость опускания шихтовых материалов по сечению печи не будет одинаковой, материалы будут ускоренно сходить в зонах над фурменными очагами. Исходя из приведенных представлений о движении шихтовых материалов в печи и

основываясь на предложенной в работе [214] методике, разработан алгоритм расчета скоростей схода шихты по радиусу доменной печи в нижней части сухой зоны.

Суммарная скорость опускания шихты на колошнике, вызванная горением кокса и плавлением железорудной части шихты, представляет собой сумму их абсолютных скоростей, соответственно  $W^{А абс.}$  и  $W^{К абс.}$  Абсолютная скорость схода шихтовых материалов, вызванная горением кокса на фурмах, определяется из выражения:

$$W^{К абс.} = W^{К} W^{К омн.}; \text{ (м/с)}, \quad (9.4)$$

где  $W^{К}$  – коэффициент пропорциональности

$$W^{К} = k / 2\pi\gamma_{к} \int_0^{R_{кк}} W^{К омн.} dx -; \quad (9.5)$$

$$W^{К омн} = A \sum_{n=1}^N \frac{1}{B^2 r_i \frac{1}{2}}, i = \overline{1, m}; \quad (9.6)$$

$$A = N \cdot (\mu^2 z_1^2 + L^2) \sqrt{L^2 + z_1^2}; \quad (9.7)$$

$$B_i = \mu^2 z_1^2 + x_i^2 - 2Lx_i \cdot \cos \frac{360}{N} n + L^2; r_i = x_i^2 - 2Lx_i \cdot \cos \frac{360}{N} n + L^2 + z_1^2.$$

$k$  – расход кокса на фурмах, кг/т. чуг.;

$x$  – текущий радиус сечения печи, м;

$\gamma_{к}$  – насыпная масса кокса, кг/м<sup>3</sup>;

$R_{кк}$  – радиус колошника, м;

$m$  – число равновеликих зон для расчета скоростей опускания шихты;

$z_1 = H_0 - h_1$ ;

$h_1, H_0$  – соответственно расстояние горизонта Н-Н и плоскости F-F условных центров зон горения от отметки «технологический ноль», м;

$L = R_r - L_0$ ;

$R_r$  – радиус горна, м;

$L_0$  – расстояние от стенки горна до условных центров зон горения, м.

Абсолютная скорость опускания шихты, связанная с плавлением железорудной ее части, может быть определена из выражения:

$$W^{А абс.} = W^A (V_A/F), \text{ (м/с)}, \quad (9.8)$$

$$\text{где } W^A = \frac{A}{2\pi\gamma_A \int_0^{R_{K_k}} x(V_A / F) dx}; \quad (9.9)$$

$A = Pr \cdot Fe_{\text{ч}} / 24 \cdot 3600 \cdot Fe_{\text{ш}}$  – расход железорудной части шихты кг/т.чуг.;

$\gamma_a$  – насыпной вес железорудной части шихты, кг/м<sup>3</sup>;

$Pr$  – производство чугуна, т/сут;

$Fe_{\text{ч}}, Fe_{\text{ш}}$  – содержание Fe в чугуне и шихте, ед.;

$V_A$  – объемы железосодержащей части шихты, м<sup>3</sup>.

При расчете скоростей схода шихты по равновеликим зонам, параметр  $V_A$  задается в виде набора дискретных значений по каждой равновеликой зоне. Для нахождения  $W^A$  следует представить  $V_A$  в виде ступенчатой функции.  $W^A_{\text{отн}}$  тоже представляет собой ступенчатую функцию, так как вычисляется в виде  $m$  значений. Тогда выражения (9.5) и (9.9) приобретут следующий вид:

$$W^K = \frac{k}{2\pi\gamma_k \sum_{i=1}^m W_{\text{отн}_i}^k \frac{(x_i^2 - x_{i-1}^2)}{2}}; \quad (9.10)$$

$$W^A = \frac{A}{2\pi\gamma_A \sum_{i=1}^m \frac{V_{A_i} \cdot (x_i^2 - x_{i-1}^2)}{2F}}. \quad (9.11)$$

При расчете может быть учтена уминка при опускании шихтовых материалов в шахте доменной печи, составляющая 1/8 от исходного объема при опускании на уровень воздушных фурм.

Расчет положения слоев шихтовых материалов выполняется в соответствии со следующим алгоритмом:

- 1) формирование слоев выгруженных шихтовых материалов на колошнике доменной печи при помощи модели радиального распределения шихтовых материалов при заданной программе загрузки;
- 2) определение скоростей опускания материалов в сухой зоне в соответствии с выражениями (9.4), (9.6) – (9.8), (9.10), (9.11);
- 3) выбор шага опускания материалов в шахте доменной печи;
- 4) послынное опускание материалов в шахте доменной печи на один шаг опускания;
- 5) определение средней высоты опущенного слоя материала;
- 6) определение коэффициента уминки железосодержащих материалов по определенной средней высоте;



- 7) определение толщины слоев материалов с учетом коэффициента увеличения поперечного сечения шахты печи;
- 8) если не достигли уровня воздушных фурм, то повторить шаги 3–7;
- 9) завершение процесса опускания шихты и формирование визуальных результатов.

### **9.1.3 Исследование влияния распределения шихтовых материалов в печи на формирование нижней границы пластичной зоны**

#### **9.1.3.1 Факторы, определяющие форму и положение пластичной зоны**

Форма и положение пластичной зоны при данном составе шихтовых материалов определяют характер распределения газового потока и эффективность преобразования энергии и массообмен в доменной печи [215]. Вследствие этого, форма пластичной зоны оказывает существенное влияние на производительность, экономические показатели работы и длительность кампании печей. Поэтому разработка способов воздействия на форму этой зоны является одной из основных задач совершенствования технологии доменной плавки [199, 200].

Форма пластичной зоны, в значительной мере, зависит от распределения материалов на колошнике [216]. Поэтому важно установить взаимосвязи величины поверхности плавления пластичной зоны по сечению печи и распределения рудных нагрузок на колошнике. С другой стороны, требования к распределению материала на колошнике, в свою очередь, зависят от формы и положения пластичной зоны, так как оба этих фактора влияют на распределение скоростей опускания шихты по радиусу. Гранулометрический состав шихтовых материалов оказывает существенное влияние на газопроницаемость, а следовательно, и на форму пластичной зоны.

Известно, что форма пластичной зоны зависит от ряда технологических параметров доменного процесса. В частности, уменьшение рудной нагрузки на периферии приводит к образованию W – образной зоны, в этом случае температура газового потока по оси печи уменьшается, а на периферии увеличивается, что ведет к увеличению тепловых нагрузок на стенки печи в области заплечиков и распара. Уменьшение рудной нагрузки по оси приводит к образованию Λ-образной пластичной

зоны, обуславливающей осевой ход печи при некотором развитии в шахте периферийного [216]. Профиль пластичной зоны зависит от режима загрузки печи и эффективности теплообменных процессов между шихтой и газом. Японскими исследователями установлено [216], что оптимальной с точки зрения обеспечения высокой производительности печи является зона пластичности, имеющая  $\Delta$ -образную форму, однако этот профиль в значительной степени реагирует на различные нарушения хода.

Как показали исследования, проведенные на доменной печи объемом  $3594 \text{ м}^3$  завода в Швельгерне [217, 218], при ровном ходе печи вершина пластичной зоны находится на высоте 8 м выше уровня фурм (при высоте шахты печи 26,9 м). В условиях неровного хода печи высота пластичной зоны увеличивается до 15 м. Установлено [197], что лучшие форма и положение пластичной зоны в печи наблюдаются тогда, когда размягчение и плавление железорудных материалов протекают в узком диапазоне высоких температур.

### 9.1.3.2 Анализ известных методов определения положения пластичной зоны

В настоящее время известны следующие методы контроля положения пластичной зоны непосредственно в доменной печи: способы с применением индикаторов, вертикальное или горизонтальное зондирование, рефлектометрия, по вертикальному распределению тепловой нагрузки на футеровку печи, акустические методы [215]. Методы контроля профиля пластичной зоны с помощью зондов обеспечивают лишь точечные измерения и характеризуются недостаточной надежностью и низкой метрологической представительностью. Другие способы либо нетехнологичны, либо нуждаются в промышленной проверке.

Ряд исследователей определяют положение пластичной зоны [121, 219] по результатам измерений потерь напора по высоте печи. На рис. 9.3 приведено изменение потерь напора у стенки по высоте печи для трех значений отношения  $\chi_l/\chi_d$ . ( $\chi_l$  – сопротивление газовому потоку в области кусковых материалов;  $\chi_d$  – сопротивление газовому потоку в области стекания жидких продуктов плавки).

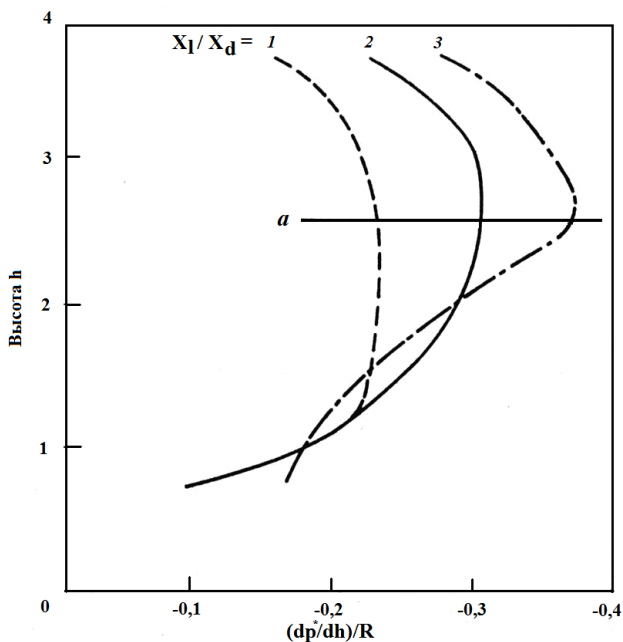
Японские исследователи форму пластичной зоны определяют тремя способами [216]:

1. По температуре и составу газа, определяемым в нескольких точках с помощью зонда, который вводят в печь

радиально в области колошника. Предположительно пластичная зона находится в том месте, где температура газа составляет  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а содержание углекислого газа приближается к нулю.

2. По статическому давлению, измеряемому в вертикальном направлении, и потере напора между областью стекания жидких продуктов плавки и областью кусковых материалов.

3. По температуре газа, измеряемой зондами в радиальном направлении в шахте печи. При этом исходят из того, что пластичная зона находится там, где температура газа составляет  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 9.3.** Потери напора у стенки печи в функции отношения сопротивлений газопотоку в области кусковой шихты (а — самый верхний пластичный слой)

Никитиным Г. М. показана возможность определения конфигурации пластичной зоны по величине промежутка времени от момента загрузки в печь измененного слоя шихты до момента соответствующего изменения нижнего перепада давления газа в печи [201].

Помимо известных методов прямого контроля положения пластичной зоны с использованием зондирования, в последнее время предпринимаются попытки расчета профиля пластичной зоны с помощью математических моделей. Так, фирма «Кобэ сэйкосе» (Япония) разработала модель тепло- и массопереноса, которая базируется на данных измерений толщины слоев кокса и рудной части шихты, их крупности и порозности, распределения температур и состава газа над и под уровнем засыпи [220]. При условном разделении печи на пять вертикальных концентрических зон с примерно одинаковыми скоростями газовых потоков с помощью модели последовательно рассчитывали температуру шихты каждой подачи в направлении сверху вниз и определяли положение пластичной зоны (по верхней границе – изотерме 1200 °С). Известна также разработанная этой фирмой тепловая модель печи, основанная на данных вертикального зондирования [221]. Оценка формы пластичной зоны производится по рассчитываемым с помощью модели тепловым нагрузкам на футеровку печи.

Математическая модель зоны вязкопластического состояния разработана для условий ОАО ЗСМК и построена на основе уравнений теплового баланса [222]. Известна также модель для определения положения пластичной зоны, которая положена в основу управления доменным процессом на печах завода фирмы “Italsider” (Таранто, Италия), исходными данными для которой являются температура газов по радиусу колошника, параметры загрузки, характеристики шихтовых материалов и параметры работы печи [223].

Наибольшего эффекта при использовании математической модели пластичной зоны достигли на доменной печи фирмы «Тиссен» в Швельгерне [224]. Модель базируется на данных контроля химического состава и технологических параметров шихтовых материалов, температуры и состава газов над и под уровнем засыпи, а также на результатах вертикального зондирования. Модель позволяет рассчитать процессы, протекающие над пластичной зоной, т.е. определить границы сухой зоны, а также границы зоны плавления.

Фирмой «Nippon Kokan» (Япония) разработана математическая модель, в которой профиль пластичной зоны рассчитывается с помощью дифференциальных уравнений теплопередачи: газ – шихта и материального баланса [225]. В модели принято допущение, согласно которому внешняя граница пластичной зоны соответствует кривой нулевого содержания  $\text{CO}_2$  в

газе. Входными параметрами модели, полученными в результате измерений, являются параметры газа и толщины слоев шихты, полученные с помощью газозаборных зондов и магнитометров.

На основе оценки газового потока и расчета теплообменных процессов между шихтой и газом, фирмой «Син Ниппон Сэйтэцу» разработаны математические модели пластичной зоны, учитывающие распределение материалов на колошнике и профиль коксовой насадки [226]. С помощью модели рассчитывают распределение давления газа в шахте и по этим данным определяют профиль пластичной зоны.

Фирмой «British Steel» (Великобритания) разработаны математические модели доменного процесса, основанные на положении Рейхардта о сближении температур потоков газов и шихты при температуре 950 °С, которая по горизонтальной изотерме делит противоточную область на верхнюю и нижнюю зоны [227]. Разработаны три модели процесса: термодинамическая, кинетическая и динамическая.

Фирма «Син ниппон сэйтэцу» разработала несколько способов определения профиля пластичной зоны с помощью математических моделей, в которых используется практически одинаковая информация: параметры колошникового газа по сечению печи, характеристики шихтовых материалов, параметры дутья и вдуваемых добавок [215]. Предложен также способ определения расположения пластичной зоны с помощью модели потерь напора газовых потоков в шахте печи [215].

Все приведенные выше модели описывают, как правило, каждый слой пластичной зоны отдельно, без учета влияния внутренних процессов и изменений. Для более подробного описания внутреннего состояния пластичной зоны, каждого отдельного пластичного слоя и соседнего коксового окна необходимы данные о температурном поле, области оплавления, механизмах теплопередачи и теплопроводности внутри отдельных слоев. Анализ литературных источников свидетельствует, что до настоящего времени задачи определения динамики изменения профиля пластичной зоны и установления связи с показателями работы доменной печи не решены. Кроме того, известные математические модели решают задачи определения профиля пластичной зоны без учета процессов опускания шихтовых материалов в сухой зоне печи, собственно формирующих состав слоев материалов в пластичной зоне, знание которых необходимо для оценки газодинамических процессов в столбе шихты. Это потребовало разработки математической модели определения

положения пластичной зоны в доменной печи с учетом ее слоевого состава, формируемого программой загрузки.

### 9.1.3.3 Разработка математической модели определения положения пластичной зоны

На основе модификации известных моделей разработана математическая модель определения положения линии плавления и в целом пластичной зоны [202]. В ее основу положена разработанная Крайбихом [199] модель расчета линии плавления, с помощью которой можно определять процессы на «влажной» стороне, т.е. форму и расположение области стекания жидкой фазы в пластичной зоне. Для определения линии плавления в модели принято, что производительность плавки соответствует площади расплавленной поверхности пластичной зоны, а это, в свою очередь, обеспечивает передачу необходимого количества тепла для расплавления железорудной части шихты.

Известно [228], что величина поверхности плавления определяется количеством генерируемого у фурм тепла, отнесенного к образующемуся количеству жидких фаз (чугун+шлак), обозначаемому  $\Pi_{ж}$ ,

$$Q = C_p V_G (T_f - T_o) / \Pi_{ж}, \text{ кДж ч/т}, \quad (9.12)$$

где  $C_p$  – теплоемкость (горнового) газа;

$V_G$  – выход газа на единицу  $\Pi_{ж}$ ;

$T_f$  – теоретическая температура у фурм;

$T_o = 20$  °С.

Часть этого тепла ( $Q_{общ}$ ) непосредственно реализуется на образование поверхности плавления  $A$  пластичной зоны. Эффективная поверхность плавления пластичной зоны может быть определена следующим образом [200]:

$$A_{эфф} = \frac{K \cdot 21,3 \cdot 10^4 \cdot \Pi_{ж}}{24 \left\{ C \cdot \left[ \left( \frac{T_{изл} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{пл.агл} + 273}{100} \right)^4 \right] + h_c (T_{газ} - T_{пл.агл}) \right\}} \quad (9.13)$$

При этом, различают величины поверхности корневой части зоны ( $A_{кор}$ ), собственно, пластичной зоны  $A_{пласт}$  (где индекс «пласт» означает пластичная зона) и общей поверхности  $A_{общ} = A_{кор} + A_{пласт}$ . Величины поверхности корневой части зоны ( $A_{кор}$ ) и, собственно, пластичной зоны  $A_{пласт}$  могут быть определены по аналогии с (9.13) в соответствии с выражениями:

$$A_{кор} = \frac{K_{кор} \cdot Q_{кор} \cdot P_{ж}}{24 \cdot \left\{ C \cdot \left[ \left( \frac{T_f \cdot 0,9 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{к.м.} + 273}{100} \right)^4 \right] + h_C (T_f - T_{пл.агл.}) \right\}} \quad (9.14)$$

$$A_{пласт} = \frac{K_{пласт} \cdot Q_{пласт} \cdot P_{ж}}{24 \cdot \left\{ C \cdot \left[ \left( \frac{T_f \cdot 0,81 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{к.м.} + 273}{100} \right)^4 \right] + h_C \left( \frac{T_f \cdot 0,9 + T_{ч+ш} \cdot 1,9}{2} - T_{пл.агл.} \right) \right\}} \quad (9.15)$$

В выражениях (9.13)–(9.15):

$K$  – геометрическая постоянная модели, зависящая от рудной нагрузки и ее распределения, уменьшающаяся с ростом нагрузки и приводящая к снижению величины  $A_{общ}$ . На основании приведенных в литературных источниках [199] результатов исследований по определению формы и положения пластичной зоны в доменной печи могут быть приняты следующие значения этой постоянной:  $K_{кор} - 0,6$ ;  $K_{пласт} - 1,4$ ;  $K - 2,0$ ;  $Q_{общ}$  – количество тепла, затрачиваемое на образование жидких продуктов плавки. Зависит от качества железорудных материалов, в частности, от их восстановимости. Считается, что в большинстве случаев состав передельного чугуна всегда более или менее постоянен, а выход и качество шлака изменяются в ограниченных пределах, поэтому при определении общей поверхности расплава  $Q_{общ}$  принимается равным  $21,3 \cdot 10^4$  кДж на единицу  $P_{ж}$ .  $P_{ж}$  – производство общего количества расплава (жидких фаз), т/час. Для вычисления этой величины необходимо знать:  $P_{чуг}$  – производство жидкого чугуна, т/сутки;  $P_{шл}$  – выход шлака в тоннах на тонну чугуна, тогда

$$P_{ж} = P_{чуг} (1 + 1,77 P_{шл} / 1000). \quad (9.16)$$

В дальнейшем, все удельные параметры плавки определяются по отношению общего количества расплава  $P_{ж}$ . В частности, для образования расплава затрачивается

$$Q_{пласт} = 2 Q_{общ} \cdot P_{ж} \quad (9.17)$$

$C$  – постоянная излучения, равная  $2,91$  кДж/час,  $m^2 K^4$ ;

Принимаются в дальнейших расчетах по аналогии с литературными источниками следующие обозначения температуры:

- $T_{изл}$  – температура излучающего вещества (главным образом кокса);
- $T_{изл}^{ум}$  – температура излучения в центре тяжести шихты;
- $T_{пл.агл}$  – температура плавления агломерата (либо смеси рудных компонентов);
- $T_{газ}$  – средняя температура газа в фурменной зоне;
- $T_{чуг}$  – температура чугуна;
- $T_{шл}$  – температура плавления оксидов (шлак) рудных материалов;
- $T_{к.т}$  – температура плавления чугуна (капельное течение расплава);
- $T_{усадки}$  – температура 50% усадки;
- $T_{н.р.}$  – температура начала размягчения (внешняя сторона зоны плавления).

Известны следующие эмпирические соотношения между температурами:

$$T_{изл}^{max} = 0,81 \cdot T_{f(A)} \text{ и } 0,79 \cdot T_{f(w)};$$

$T_{изл}^{min} = 1,09 \cdot T_{пл.агл.}$ , где  $T_{пл.агл.}$  – температура плавления агломерата (смеси);

$T_{конв} = T_{изл} \cdot 1,09$ ; температура на линии плавления

$$T_{газ}^{лин.пл.} = 1,09 \cdot T_{кокса}^{min};$$

$$T_{изл}^{ум} = 0,78 T_f;$$

$T_{ж.ф.} = 1550^\circ\text{C}$  – температура жидких фаз в горне;

$h_c$  – коэффициент теплопередачи конвекцией (кДж/м<sup>2</sup>, час, °C).

Коэффициент теплопередачи может быть определен в соответствии с выражением [229]:

$$h_c = 0,62 (\lambda_g / D_{н.о}) (D_{н.о} U_g / \eta_g)^{0,7} (C_p \eta_g / \lambda_g \rho_g)^{0,33}, \quad (9.18)$$

где  $\lambda_g$  – теплопроводность газа, кДж/т, час, °C;

$D_{н.о}$  – текущий диаметр, м;

$U_g$  – массовый газовый поток, кг/м<sup>2</sup>·час;

$\eta_g$  – динамическая вязкость газа, кг/м·час;

$C_p$  – средняя теплоемкость газа, кДж/нм<sup>3</sup>·K;

$\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Расчет вышеприведенных параметров возможен при знании показателей доменной плавки, которые можно либо определить по прогнозной модели технологического режима (например, расчет Рамма), либо принять в качестве исходных величин показатели конкретной работающей печи.

Предложены два варианта определения положения нижней границы пластичной зоны – линии плавления в печи. При этом



принято допущение о представлении ее линейной зависимостью. В отличие от предложенного Крайбихом подхода, согласно которому линия плавления проходит через точку центра тяжести расплава, предложены два варианта определения одной из точек, через которую проходит линия плавления. Согласно первому варианту – одна из точек, через которую проходит линия плавления, определяется координатой пересечения луча, проведенного из точки пересечения образующей шахты печи с вертикальной ее осью через центр тяжести распределения рудных нагрузок на колошнике печи с вертикальной прямой, проведенной через центр тяжести расплава над уровнем фурм (при допущении, что в этой точке действует средняя температура плавления). Другая точка, через которую может быть проведена прямая, определяющая положение линии плавления (при принятом допущении о линейном характере ее изменения) – это точка, соответствующая перелому профиля печи в нижней части заплечиков, как это предложено в известных публикациях [200, 230].

Координаты центра тяжести рудной нагрузки могут быть определены в соответствии с выражением:

$$l = \frac{\sum R_i \cdot l_i}{\sum R_i}; \quad l_{ц.т.} = l / r_{кол}, \quad (9.19)$$

где  $R_i$  – рудная нагрузка в  $i$ -той кольцевой зоне, т/т;

$r_{кол}$  – радиус колошника, м.

Положение координаты центра тяжести расплава над уровнем фурм (рис. 9.4) может быть определено в соответствии с выражением [228]:

$$H_{cz} = \frac{W_{ж.ф.} \cdot \ln \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T_{max}}}{h_p \cdot A \cdot (1 - \gamma)}, \text{ м} \quad (9.20)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{W_{ж.ф.} + \left( \frac{\Delta H_{nom}}{\Delta T_{str}} \right)}{\frac{W_{газ} \cdot W_{кокс}}{a}}; \quad (9.21)$$

$$a = 0,78;$$

$$W_{ж.ф.} = W_{чугун} + W_{шлак}, \text{ кДж/сут. } ^\circ\text{C};$$

$$W_{чуг} = t_f \cdot q_{чугун}, \text{ кДж/сут. } ^\circ\text{C};$$

$$W_{шл} = Q_{шл} \cdot q_{шлака};$$

$q_{чугун}$ ,  $q_{шлака}$  – соответственно теплоемкости чугуна и шлака;

$W_{газ}$ ,  $W_{кокс}$  – соответственно водяные числа газа и кокса, кДж/сут.°С;

$\Delta T_{min} = T_{изл}^{min} - T_{пл. азл}$ ;

$\Delta T_{max} = 0,81 \cdot T_f - T_{ж.ф.}$  ;

$h_p$  – коэффициент теплопередачи излучением и конвекцией;

$A = A_{эфф} / V_{п.печи}$  – поверхность теплообмена под зоной плавления;

$\Delta H_{ном}$  – тепло реакций прямого восстановления, кДж.

Коэффициент теплопередачи излучением может быть определен из выражения:

$$h_p = \left( K_f / d_s \phi_s \right) \left\{ 2,0 + 0,6 \left[ 9 \cdot (d_s \cdot \phi_s) U_{гг} / \mu_g \right]^{1/2} \left( C_p \mu_f / \lambda_g \right)^{1/3} \right\}, \text{ Вт/м}^2 \text{ К}, \quad (9.22)$$

где  $d_s$  – эквивалентный диаметр кокса;

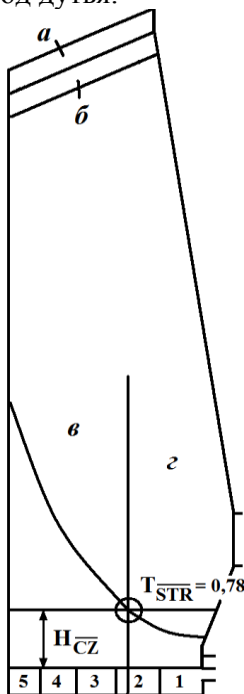
$\phi_s$  – коэффициент формы кокса;

$C_p$  – средняя теплоемкость газа, кДж/н м<sup>3</sup> °К;

$\mu_g$  – динамическая вязкость газа, кг/м час.;

$\lambda_g$  – теплотворность газа, кДж/т час °С;

$U_{гг}$  – массовый расход дутья.



а–железосодержащие; б–кокс; в–линия плавления; г–центр тяжести рудной части шихты.

**Рис. 9.4.** Схема к определению центра тяжести расплава

Для второго варианта, положение одной из точек, через которую проходит линия плавления, может быть определено координатой точки пересечения луча, проведенного из точки пересечения образующей шахты печи с вертикальной осью через центр тяжести рудной части шихтовых материалов, находящихся в сухой зоне печи, с вертикалью, проходящей через центр тяжести расплава над уровнем фурм (при допущении, что в этой точке действует средняя температура плавления). Другая точка, через которую может быть проведена прямая, описывающая положение линии плавления (при принятом допущении о линейном характере ее изменения) – это точка, соответствующая нижней части заплечиков печи.

Координаты центра тяжести рудной части шихтовых материалов могут быть определены, по аналогии с [209], в соответствии с выражением:

$$l_{ц.т.}^p = \frac{\sum M_i^{жкп} \cdot l_i}{\sum M_i^{жкп}}, \quad (9.23)$$

где  $M_i^{жкп}$  – рудная часть шихтовых материалов в  $i$ -ой кольцевой зоне на колошнике, т/т;  $l_i$  – радиальная координата середины  $i$ -ой кольцевой равновеликой зоны, м.

Величины поверхности плавления в значительной степени зависят от температурно-тепловых свойств железорудных материалов. Их можно рассчитать в соответствии с моделями “состав–свойства”, разработанными в ИЧМ и позволяющими по исходному химическому составу прогнозировать восстановимость материалов, температуры потери газопроницаемости слоя железорудных материалов, начала фильтрации жидких фаз, количество и состав первичных, промежуточных и “зависших” в слое кокса шлаковых и металлоуглеродистых расплавов. В расчетах поверхности плавления принимаем значение температуры плавления смеси железосодержащих материалов, равное  $T_{нф}$ , рассчитанное по статистическим моделям ИЧМ:

$$T_{нф} = 1221,23 + 19,90 MgO + 214,59 Al_2O_3 - 5,60 FeO + 58,58 Ca/SiO_2. \quad (9.24)$$

Для окатышей:

$$T_{нф} = 1420,22 + 3,57 \cdot CaO - 14,77 \cdot SiO_2 + 27,70 \cdot MgO - 14,91 \cdot Al_2O_3 - 1,59 \cdot FeO. \quad (9.25.1)$$

Для агломерата:

$$T_{нф} = 1473,14 + 0,78 \cdot CaO - 9,79 \cdot SiO_2 + 41,11 \cdot MgO -$$

$-38,85 \cdot Al_2O_3 - 1,96 \cdot FeO$ . (9.25.2)

Верхняя граница зоны плавления, в первом приближении, может быть описана прямой, проведенной параллельно линии плавления из точки пересечения образующих распара и заплечиков. При этом положение точки центра масс рудных нагрузок по вертикали определяется по тем же зависимостям, что и для линии плавления, с той разницей, что вместо температуры капельного течения в расчетах используется температура размягчения железосодержащих компонентов.

Таким образом, основанная на предложенном Крайбигом подходе к расчету линии плавления, разработанная математическая модель определения положения пластичной зоны в доменной печи содержит следующие новые положения:

1. Основываясь на допущении о представлении нижней границы пластичной зоны – линии плавления линейной зависимостью, положение ее в печи определяется (по одному из вариантов) координатой пересечения луча, проведенного из точки пересечения образующей шахты печи с вертикальной ее осью через центр тяжести распределения рудных нагрузок на колошнике печи с вертикальной прямой, проведенной через центр тяжести расплава над уровнем фурм, либо (по второму варианту) – координатой точки пересечения луча, проведенного из точки пересечения образующей шахты печи с вертикальной осью через центр тяжести рудной части шихтовых материалов, находящихся в сухой зоне печи, с вертикалью, проходящей через центр тяжести расплава над уровнем фурм. Такой подход позволяет определять положение пластичной зоны во взаимосвязи не только с технологическими параметрами плавки, но и с параметрами распределения шихты.

2. Расчет величины поверхности плавления уточнен путем определения температурно-тепловых свойств железорудных материалов в соответствии с разработанными в ИЧМ моделями "состав–свойства", позволяющими по исходному химическому составу прогнозировать восстановимость материалов, температуры потери газопроницаемости слоя железорудных материалов, начала фильтрации жидких фаз, количество и состав первичных, промежуточных и "зависших" в слое кокса шлаковых и металлоуглеродистых расплавов.

## **9.1.4 Определение геометрических параметров фурменной зоны**

### **9.1.4.1 Функциональные особенности фурменной зоны. Результаты исследований процессов в горне доменной печи**

Фурменная зона, располагаясь в периферийной области горна, является источником образования необходимого количества нагретых газов, тепло и состав которых обеспечивают развитие процессов восстановления оксидов, агрегатных превращений железорудных материалов, формирование жидких продуктов плавки. Оптимизация этих процессов определяется рациональной структурой и динамическим состоянием столба шихтовых материалов, в значительной мере обусловленных геометрическими параметрами и условиями работы фурменной зоны, оказывающими влияние на характер движения материалов в печи, распределение в столбе шихты газового потока, уровень использования его восстановительной и тепловой энергии, на размеры и размещение тесно взаимосвязанных с фурменной зоной таких важных элементов структуры столба шихты, как «малоактивный коксовый конус», коксовая насадка, включающая коксовый канал, зону размягчения – плавления, нижняя граница которой корнем вплотную примыкает к фурменной зоне. Активно протекающие в фурменной зоне процессы окисления топливных компонентов являются источником образования большого количества возгонов с температурой, превышающей теоретическую, и негативно воздействующих на кладку стен, состояние гарнисажа, особенно при высоком расположении корня пластичной зоны, поведение которого, к тому же оказывает существенное влияние на формирование промежуточного и конечного шлака, и этим, в значительной мере, обуславливает эффективность шлакового режима.

По оси горна фурменная зона структурно разделяется на область фурменного очага (зона циркуляции, порозность 0,65–0,7) и разрыхленную за ним (порозность 0,4–0,42) область проникновения, заканчивающуюся более уплотненной (порозность 0,26–0,3) малоподвижной поверхностью, относящейся к «малоактивному коксовому конусу». Фурменная зона и «малоактивный коксовый конус» функционально тесно взаимосвязаны и определяют состояние горна печи (процессы перемещения в нем кокса и жидких фаз, теплообмен фаз и развитие

процессов вторичного восстановления и науглероживания, массообмен между металлом и шлаком и т.д.).

Анализ литературных источников подтверждает, что решающее влияние как на газодинамический, так и тепловой режим плавки оказывают процессы формирования структуры среды в прифурменном поясе и процессы тепло– и массообмена в фурменных зонах [208]. Эти процессы определяют характер движения материалов и газов, размеры и конфигурацию зон горения и газификации углерода кокса, параметры и распределение газового потока и, следовательно, в большой мере определяют протекание всех других процессов доменной плавки.

Как от распределения шихтовых материалов на колошнике печи, так и в нижней части – от количества тепла, вносимого через фурму, в значительной степени зависят форма и строение пластичной зоны [121]. Фурменный очаг доменной печи формирует газовый поток в пластичной зоне и в значительной мере оказывает влияние на ее положение. Различный наклон нижней границы пластичной зоны и ее положение над «малоактивным коксовым конусом» – это существенные факторы, влияющие на ход процесса. Расстояние между нижней границей пластичной зоны и «малоактивным коксовым конусом» и сечение коксовых окон в значительной степени влияют на характер и скорость схода шихты в доменной печи [121].

Экспериментальные и аналитические исследования процессов в горне доменной печи были проведены М. А. Павловым, Н. И. Красавцевым, В. К. Грузиновым, Б. И. Китаевым, И. П. Бардиным, И. А. Соколовым и др. На основе аналитического обзора исследований можно выделить следующее многообразие математических моделей, описывающих процессы в фурменной зоне [231]:

- аэромеханические и гидродинамические, рассматривающие геометрию фурменного очага и его механику, а также параметры истечения газового потока;
- термохимические, в которых рассмотрены физико–химические процессы сжигания кокса и топливных добавок;
- теплоэнергетические, описывающие температурные и энергетические параметры фурменного очага;
- оптимизационные, представляющие собой комбинации элементов различных расчетных моделей фурменного очага.

К последнему классу моделей принадлежит разработанная в ИЧМ на основе системного анализа методология исследования

фурменного очага, включающая разработки по тепловой энергетике, термохимическую модель фурменной зоны и результаты экспериментальных исследований, проведенных на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» [232].

Целью выполняемых исследований явилось установление взаимосвязей нижней границы пластичной зоны с процессами в фурменной зоне печи, что может быть выполнено на основе оценки влияния параметров комбинированного дутья и загружаемой шихты на параметры фурменного очага [233].

Одной из важнейших характеристик фурменной зоны являются ее геометрические размеры. Размеры фурменного очага, прежде всего, протяженность циркуляционной зоны, оказывают существенное влияние практически на все процессы, происходящие в доменной печи. Наиболее значимыми факторами, определяющими размеры фурменной зоны, являются расход дутья, кинетическая энергия его потока при выходе из фурм, а также количество движения потока [231].

#### **9.1.4.2 Выбор модели расчета геометрических параметров фурменной зоны**

Известно, что геометрические параметры очагов разрыхления и глубина проникновения газов к центру печи характеризуются полной энергией (мощностью) потока комбинированного дутья, а также полной энергией (мощностью) потока образованного фурменного газа, причем первая больше влияет на размеры очагов разрыхления, а вторая – на глубину проникновения газов к центру печи [208]. При решении вопросов определения размеров фурменного очага в составе структуры столба шихтовых материалов в печи целесообразно определять геометрические параметры фурменного очага с помощью математической модели, представленной в материалах специального симпозиума в Австралии [192]. В результате расчета определяются также параметры состояния фурменной зоны: теоретическая температура, выход и состав горновых газов, а также количество углерода кокса, газифицируемого в единицу времени. Указанные параметры могут быть определены с помощью приведенных далее выражений, содержащих в качестве исходных данных параметры, толкование которых представлено в табл. 9.1.

Таблица 9.1

**Исходные параметры для расчета фурменной зоны**

Параметр	Размерность	Описание
$P_0$	атм	давление дутья при нормальных условиях
$P_{\text{ф}}$	атм	давление дутья при фактических условиях
$D_{\text{кол}}$	м	диаметр колошника
$D_{\text{расп}}$	м	диаметр распара
$D_{\text{г}}$	м	диаметр горна
$H_{\text{кол}}$	м	высота колошника
$H_{\text{ш}}$	м	высота конической шахты
$H_{\text{расп}}$	м	высота распара
$H_{\text{запл}}$	м	высота заплечиков
$H_{\text{ф}}$	м	расстояние от низа заплечиков до оси воздушных фурм
$l_{\text{ф}}$	м	высов фурмы
$d_{\text{ф}}$	м	диаметр фурмы
$d_{\text{км}}$	м	крупность кокса
$\varepsilon_{\text{к}}$	ед.	порозность кокса в прифурменной области
$\rho_{\text{к}}$	кг/м <sup>3</sup>	кажущаяся плотность кокса
$H_2O$		содержание $H_2O$ в природном газе
$CO_2$	%	содержание $CO_2$ в природном газе
$CO$	%	содержание $CO$ в природном газе
$O_2$	%	содержание $O_2$ в природном газе
$N_2$	%	содержание $N_2$ в природном газе
$H_2$	%	содержание $H_2$ в природном газе
$CH_4$	%	содержание $CH_4$ в природном газе
$C_2H_6$	%	содержание $C_2H_6$ в природном газе
$C_3H_8$	%	содержание $C_3H_8$ в природном газе
$C_4H_{10}$	%	содержание $C_4H_{10}$ в природном газе
$C_5H_{12}$	%	содержание $C_5H_{12}$ в природном газе
$\rho_{\text{пг}}$	кг/м <sup>3</sup>	плотность природного газа
$q_{\text{пг}}$	ккал/м <sup>3</sup>	теплотворность природного газа
$Пр$	т. чугу/сут	среднесуточное производство чугуна
$\omega$	ед	концентрация кислорода в дутье
$\varphi$	г/нм <sup>3</sup>	влажность дутья
$Q_{\text{д}}$	м <sup>3</sup> /мин	расход дутья
$D$	ед	объемная доля природного газа
$T_{\text{д}}$	°С	температура дутья
$\rho_{\text{д}}$	кг/м <sup>3</sup>	плотность дутья
$\varepsilon_{\text{к}}$	ед	порозность материала в орошаемой коксовой насадке
$\varepsilon_{\text{г}}$	ед	порозность материала в малоактивном коксовом конусе
$t_{\text{с}}$	°С	температура кокса
$i_{\text{к}}$	ккал/кг	теплоемкость кокса
$q_{\text{с}}$	ккал/кг	теплота горения кокса у фурм
$Re$		критерий Рейнольдса
$T_{\text{а}}$	°С	температура в оси печи
$P_{\text{к}}$	атм	давление колошникового газа
$\Delta P_{\text{общ}}$	атм	общий перепад давления



Расход природного газа

$$V_{III1} = V_D \cdot D, \quad (9.26)$$

его величина на тонну чугуна

$$V_{III} = \frac{V_{III1} \cdot 60 \cdot 24}{Pr} \quad (9.27)$$

1. Определение элементарного состава природного газа,  $\text{нм}^3/\text{нм}^3$

$$C = 0,01(CO_2 + CO + CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} + 5 \cdot C_5H_{12}) \quad (9.28)$$

$$H = 0,01(H_2O + H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12}) \quad (9.29)$$

$$O = 0,01(O_2 + CO_2 + 0,5CO + 0,5H_2O) \quad (9.30)$$

$$N = 0,01 \cdot N_2 \quad (9.31)$$

2. Теплота горения природного газа

$$W_S = 3,8 \cdot CH_4 + 14,5 \cdot C_2H_6 + 24,2 \cdot C_3H_8 + 33 \cdot C_4H_{10} + 43 \cdot C_5H_{12} \quad (9.32)$$

3. Расход дутья и выход горнового газа.

Расход дутья в  $\text{нм}^3/\text{кг}$  углерода кокса, сгорающего у фурм

$$v_D^1 = \frac{0,9333}{\omega + 0,5\phi} \quad (9.33)$$

Расход дутья в  $\text{нм}^3/\text{нм}^3$  на вдуваемое топливо

$$v_D = \frac{0,5 \cdot C - O}{\omega + 0,5\phi} \quad (9.34)$$

Выход фурменного газа,  $\text{нм}^3/\text{кг}$  углерода, сгорающего у фурм

$$v_G^1 = 1,8667 + v_D^1 \cdot (1 - \omega + \phi) \quad (9.35)$$

Выход фурменного газа в  $\text{нм}^3/\text{нм}^3$  природного газа, сгорающего у фурм

$$v_G = C + H = N = v_D \cdot (1 - \omega + \phi) \quad (9.36)$$

Расход вдуваемого топлива в  $\text{нм}^3$  на 1 кг углерода кокса, сгорающего у фурм

$$\sigma = \frac{v_D^1 \cdot D}{1 - v_D \cdot D} \quad (9.37)$$

Количество дутья на 1 т чугуна,  $\text{м}^3/\text{т.чуг}$

$$V_{DT} = \frac{V_D \cdot 60 \cdot 24}{Pr} \quad (9.38)$$

Количество углерода кокса, сгорающего у фурм,  $\text{кг}/\text{т}$  чугуна,

$$C_\phi = \frac{V_{DT} - V_{III} \cdot v_D}{v_{1D}} \quad (9.39)$$

$$C_{\phi}^1 = \frac{\Pi p}{24 \cdot 60} \cdot C_{\phi} \cdot \quad (9.40)$$

Суммарный расход дутья и выход фурменного газа в  $\text{нм}^3$  на 1 кг углерода кокса, сгорающего у фурм

$$v_{\Sigma Д} = v_{Д}^1 + \sigma \cdot v_{Д} \quad (9.41)$$

$$v_{\Sigma \phi \Gamma} = v_{\Gamma}^1 + \sigma \cdot v_{\Gamma} \quad (9.42)$$

$$v_{\phi \Gamma} = v_{\Sigma \phi \Gamma} \cdot C_{\phi} \cdot \quad (9.43)$$

Состав фурменного газа:

$$v_{\phi \Gamma}^1 = \frac{v_{\phi \Gamma} \cdot \Pi p}{1440} \text{ м}^3 / \text{мин} \quad (9.44)$$

$$v_{CO} = 1,8667 + \sigma \cdot C \quad (9.45)$$

$$v_{H_2} = v_{\Sigma Д} \cdot \phi + \sigma \cdot H \quad (9.46)$$

$$v_{N_2} = v_{\Sigma Д} \cdot (1 - \omega) + \sigma \cdot N \quad (9.47)$$

Плотность фурменного газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$

$$\rho_0 = 1,25 - 1,16 \frac{v_{H_2}}{v_{\Sigma \phi \Gamma}} \cdot \quad (9.48)$$

Тепло, вносимое в фурменную зону нагретым коксом, ккал,

$$i_c = 0,394 \cdot t_c \quad (9.49)$$

$$\dot{i}_{N_2} = -42 + 0,38 T_{Д} \quad (9.50)$$

$$i_{H_2O} = -105,64 + 0,52182 \cdot T_{Д} \quad (9.51)$$

$$i_{Д} = (0,3762 \cdot T_{Д} - 42) - \phi \cdot [2580 - (0,4896 \cdot T_{Д} - 75)] \quad (9.52)$$

Теплота горения углерода кокса у фурм, ккал/кг

$$C_o T_f = \frac{\omega_c + i_c + v_{Д}^1 \cdot i_{Д} + \sigma \cdot (1\omega_s + cst_s + v_{Д} \cdot i_{Д})}{v_{\Gamma}^1 + \sigma \cdot v_{\Gamma}} \quad (9.53)$$

$$T_f = \frac{C_o T_f + 42}{0,38} \quad (9.54)$$

4. Определение параметров фурменной зоны

Выход горнового газа

$$V_{ГГ} = \frac{v_{\phi \Gamma} \cdot \Pi p}{1440} \quad (9.55)$$

На одну фурму

$$V_{ГГ}^1 = \frac{V_{ГГ}}{60 \cdot N_{\phi}} \quad (9.56)$$

Длина фурменной зоны

$$L_{\phi 3} = 0,315 \cdot d_{\phi} \cdot \left\{ \left[ \rho_o \cdot \left[ \left( \frac{4V_{ГГ}}{\pi \cdot d_{\phi}^2} \right)^2 \frac{T_f + T_o}{T_o} \cdot \frac{1}{1 + P_D} \cdot \frac{1}{g \cdot 0,001 d_{PK} \cdot \rho_{KK}} \right]^{0,587} \right] \right\} \quad (9.57)$$

Ширина фурменной зоны

$$B_{\phi 3} = 2,631 \cdot d_{\phi} \left( \frac{L_{\phi 3}}{d_{\phi}} \right)^{0,331} \quad (9.58)$$

Высота фурменной зоны

$$H_{\phi 3} = \frac{-b + \sqrt{(b)^2 - 4a(c)}}{2a}; \quad (9.59)$$

$$b = -23,1 \cdot \left( \frac{L_{\phi 3}}{d_{\phi}} \right)^{1,052} \cdot \frac{d_{\phi}^2}{B_{\phi 3}}; \quad (9.60)$$

$$c = (L_{\phi 3})^2. \quad (9.61)$$

Объем фурменной зоны:

$$V_{\phi 3} = 0,534 \cdot L_{\phi 3} \cdot B_{\phi 3} \cdot H_{\phi 3} \quad (9.62)$$

Фурменная зона, в которой происходит горение кокса, переходит в коксовый канал, распространяющийся вдоль поверхности «малоактивного коксового конуса» до оси печи. Через него газ из фурменного очага поступает в коксовые окна пластичной зоны. Имеющаяся в настоящее время в литературных источниках информация о параметрах «малоактивного коксового конуса» неоднозначна, так как приведенные возможные пределы изменения отношения высоты «малоактивного коксового конуса» к диаметру горна могут изменяться от 0,1 до 1,2. Известен также вариант расчета параметров «малоактивного коксового конуса», приведенный в статье немецких исследователей [207]. Параметры «малоактивного коксового конуса» могут быть также определены по предложенной в материалах австралийского симпозиума методике. Ниже приведена последовательность расчета параметров «малоактивного коксового конуса» с использованием представленных в табл. 9.1 исходных данных.

Высот фурмы  $b=0,001 \cdot l_{\phi}$ .

Диаметр горна  $d_T=0,001 \cdot D_T$ .

Диаметр основания «малоактивного коксового конуса»

$$d_T = d_G - 2(L_{\phi 3} + b). \quad (9.63)$$

Высота «малоактивного коксового конуса»

$$h_T = 0,534 \cdot d_G \cdot \left( \frac{d_G - d_T}{d_G} \right)^{-356}. \quad (9.64)$$

Площадь фурменного очага

$$S_{\phi O} = 0,5\pi \cdot L_{\phi 3} \cdot B_{\phi 3}. \quad (9.65)$$

Отношение площади фурменных очагов к площади горна,  $m^2/m^2$

$$A = \frac{4N_{\phi} \cdot S_{\phi O}}{\pi \cdot d_G^2}. \quad (9.66)$$

Отношение площади фурменных очагов к площади основания «малоактивного коксового конуса»,  $m^2/m^2$

$$C = \frac{4N_{\phi} \cdot S_{\phi O}}{\pi \cdot (d_T^2)}. \quad (9.67)$$

Объем «малоактивного коксового конуса»

$$V_T = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot d_T^2}{4} h_T. \quad (9.68)$$

Рассмотренный вариант расчета геометрических параметров фурменного очага в доменной печи, основанный на известной математической модели, приведенной в материалах специального симпозиума в Австралии [192], в совокупности с установленными балансовым методом расходом дутья и выходом горнового газа, может быть использован при комплексных исследованиях структуры столба шихтовых материалов.

## 9.2 Разработка аналитического метода оценки газодинамического режима доменной плавки

### 9.2.1 Математическое моделирование газодинамических процессов в сухой зоне печи

Содержательным показателем, отражающим особенности газодинамических процессов в доменной печи, является перепад давления газа на уровнях фурмы – колошник. Для оценки развития газодинамических процессов, на печах постоянно измеряют разницу давлений газа между фурмами и серединой шахты печи (нижний перепад), и между серединой шахты и колошником (верхний перепад) [150, 233]. В отдельных случаях [219] точки измерения давления газа располагают по всей высоте печи (порядка 30 точек через 1 метр). Информация, полученная в результате измерения давления, позволяет прогнозировать состояние шихты на разных горизонтах, расположение пластичной зоны, выявлять критические, с точки зрения пропускной способности газа, зоны печи, в том числе возможные места формирования настывлей, поведение гарнисажа и др.

На основе исследований, выполненных проф. Таракановым А. К. и Ефименко Г. Г. [234], установлена взаимосвязь величины перепада давления  $\Delta P$  от параметров доменной плавки (табл. 9.2).

Проф. А.Н. Похвисневым и его коллегами установлена тесная связь перепада давления в печи с содержанием кремния в чугуне [235]. Кроме того, исследования показали надежную связь перепада давления и коэффициента теплопередачи (теплоиспользования) в печи

$$\alpha_v = K + \sqrt[3]{\Delta P}. \quad (9.69)$$

В общем виде величина перепада давления газа в печи может быть определена исходя из насыпного веса шихты согласно следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{\phi} - P_{\kappa}; \\ P_{\phi} &= P_{\kappa} + \alpha \gamma_{ш} \cdot H; \\ P_{\phi} &= (P_{\phi} + P_{\kappa}) / 2, \end{aligned}$$

где  $\Delta P$  – перепад давления между осью фурм ( $P_{\phi}$ ) и колошником ( $P_{\kappa}$ ), ати;  $\alpha$  – коэффициент газодинамической устойчивости столба шихты (степень уравновешивания шихты газом, изменяющимся в пределах 0,5–0,65, ед. [236];

$\gamma_{III} = \frac{\gamma_{pyd} \cdot \gamma_k (1 + R_H)}{\gamma_{pyd} + \gamma_k \cdot R_H}$  – насыпной вес шихты, кг/м<sup>3</sup>; Н – высота столба шихты, м;  $\gamma_{руд}$ ,  $\gamma_k$  – насыпные веса рудных материалов и кокса, кг/м<sup>3</sup>;  $R_H$  – рудная нагрузка, ед.

Таблица 9.2

**Статистические связи перепадов давления газа по высоте ДП №9 с параметрами плавки**

Уравнение регрессии	$\eta$	$K_\eta$
$\Delta P_B = -0,103 + 0,910 \cdot 10^{-3} V_{п.г.} = -0,567 \cdot 10^{-6} V_{п.г.}^2$	0,272	3,12
$\Delta P_B = -0,140 + 0,576 \cdot 10^{-2} t_k - 0,211 \cdot 10^{-4} t_k^2$	0,246	2,79
$\Delta P_B = 0,953 \cdot 10^{-2} + 0,490 \cdot 10^{-6} V_{к.г.} - 0,187 \cdot 10^{-12} V_{к.г.}^2$	0,356	4,29
$\Delta P_H = -40,734 + 90,238 \cdot 10^{-3} V_{к.г.} - 48,351 \cdot 10^{-6} V_{к.г.}^2$	0,476	6,56
$\Delta P_H = 26,862 - 70,243 \cdot 10^{-4} V_{д.} + 48,280 \cdot 10^{-8} V_{д.}^2$	0,334	3,99
$\Delta P_H = 17,233 - 1,162\omega + 2,118 \cdot 10^{-2} \omega^2$	0,302	3,53
$\Delta P_H = -5,491 + 2,006 \cdot 10^{-2} V_{п.г.} - 0,147 \cdot 10^{-4} V_{п.г.}^2$	0,353	4,28
$\Delta P_H = 84,804 - 3,840\eta_{co} + 4,413 \cdot 10^{-2} \eta_{co}^2$	0,630	11,09
$\Delta P_\Sigma = -44,61 + 98,83 \cdot 10^{-2} V_{к.г.} - 5,278 \cdot 10^{-5} V_{к.г.}^2$	0,468	6,37
$\Delta P_\Sigma = 28,93 - 7,47 \cdot 10^{-2} V_{д.} + 5,108 \cdot 10^{-7} V_{д.}^2$	0,304	3,56
$\Delta P_\Sigma = 13,88 - 0,912\omega + 16,883 \cdot 10^{-4} \omega^2$	0,317	3,74
$\Delta P_\Sigma = -2,64 + 12,17 \cdot 10^{-3} V_{п.г.} - 8,62 \cdot 10^{-6} V_{п.г.}^2$	0,379	4,70
$\Delta P_\Sigma = 1,713 - 32,88 \cdot 10^{-4} t_k + 19,72 \cdot 10^{-4} t_k^2$	0,401	5,07
$\Delta P_\Sigma = 96,77 - 4,365\eta_{co} + 5,003 \cdot 10^{-2} \eta_{co}^2$	0,660	12,44
$\Delta P_\Sigma = -0,536 + 2,267 \Delta P_H - 0,486 - \Delta P_H^2$	0,972	188,38

\*Корреляционное отношение ( $\eta$ ) и коэффициент надежности связи ( $K_\eta$ )

Известны выражения, связывающие перепад давления газа с отдельными параметрами процессов плавки [169, 237]. Из литературных источников известен ряд выражений, позволяющих определить величины потери напора  $\Delta P$  в сухой части столба шихты [170, 238, 239], а также выражений, позволяющих описать перепад давления в слое шихты, зависящий от плотности укладки слоев на колошнике, толщины слоев железорудных материалов и кокса [169, 170, 203, 240].

Для описания газодинамических процессов в сухой зоне печи принято известное уравнение Эгона:

$$\Delta P = \psi \cdot \frac{H \cdot (1 - \varepsilon) \cdot P_0 \cdot T \cdot \rho_{Г0} \cdot \omega_0^2}{d_{э.кв.} \cdot \varepsilon^3 \cdot P \cdot T_0}, \quad (9.70)$$

где  $\psi$  – коэффициент сопротивления;  $T$ ,  $T_0$  – соответственно, температура газа при реальных и нормальных условиях, °С;  $P$ ,  $P_0$  – соответственно, давление газа при реальных и нормальных условиях, Па;  $\varepsilon$  – порозность, ед;  $H$  – высота

столба шихты, м;  $\omega_0 = \frac{V_{\Gamma}}{S_i}$  – скорость газа при нормальных условиях на пустую шахту, м/с;  $V_{\Gamma}$  – количество газа (м<sup>3</sup>/с), протекающего между исследуемыми горизонтами соответствующих сечений, в частности:

$$\omega_o^{зори} = \frac{V_{\phi.z.}}{S_{зори}};$$

$$\omega_o^{расп} = \frac{V_{\phi.z.} + \Delta V_{восст.}}{S_{расп}};$$

$$\omega_o^{\phi.шахт} = \frac{V_{\phi.z.} + \Delta V_{восст.}}{(S_{расп.} + S_{кол.})/2};$$

$$\omega_o^{кол.z} = \frac{V_{кол.z.}}{S_{кол.}};$$

$\Delta V_{восст}$  – дополнительное количество газа, образующееся вследствие восстановления оксидов;

$d_{экр}$  – эквивалентный диаметр канала, м;

$\rho_{го}$  – плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

Как следует из анализа известных выражений, одним из основных факторов, определяющих движение газового потока через слой шихтовых материалов, являются его газодинамические характеристики, а именно, порозность, эквивалентный диаметр каналов, по которым движется газ, и коэффициент сопротивления.

Полученные к настоящему времени данные показывают, что наиболее правильно эквивалентный диаметр может быть рассчитан исходя из точно установленного ситового состава материалов, по которому определяется свернутый диаметр частиц неправильной формы [203, 240]. Для определения газодинамических характеристик слоя шихтовых материалов использованы следующие зависимости [203, 239, 240]:

$$d = 1 / \sum_{i=1}^n (a_i / d_i), \text{ мм}, \quad (9.71)$$

где  $a_i$  – объемная доля фракции, размером  $d_i$ , %.

По величине  $d$  определяется вероятная величина эквивалентного диаметра каналов, образующихся в смеси частиц с учетом фактора их формы.

Из большого числа известных выражений, позволяющих определить эквивалентный диаметр каналов, может быть принято

наиболее приемлемое и достоверно описывающее условия формирования столба шихты в доменной печи следующее выражение:

$$d_{эка.} = \frac{2}{3} d \cdot \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}, \text{ мм}, \quad (9.72)$$

где  $\varepsilon$  – порозность слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

2/3 – соответствует средней величине фактора формы.

Другим важнейшим фактором, определяющим газопроницаемость шихты, является порозность слоя, определяемая как [241]:

$$\varepsilon = 1 - \gamma_n / \gamma_{каж.} = 1 - \frac{4}{\pi D^2 H} \cdot \frac{m}{\gamma_{каж.}}, \quad (9.73)$$

где  $\gamma_n$ ,  $\gamma_{каж.}$  – насыпная и кажущаяся плотность материала, кг/м<sup>3</sup> (трудности определения  $\gamma_{каж.}$  обуславливают принятие этой величины постоянной для агломерата 3,34, для окатышей в среднем 3,11 кг/м<sup>3</sup> при допустимых пределах изменения 2,9–3,4);

$\frac{4}{\pi D^2 H}$  – величина обратная объему исследуемого элемента, 1/м<sup>3</sup>;

$m$  – масса материала в объеме элемента, кг.

Порозность окатышей в большинстве случаев определяют по насыпному весу с использованием вышеприведенной формулы (9.73), принимая постоянной величину  $\gamma_{каж.}$ . Ввиду округлой формы и чувствительности состояния массы окатышей к количеству в них мелочи 0–5 мм (величина  $m$ ) для расчета используют эмпирические зависимости:

$$\gamma_{нас}^{ок} = 1,67 + 0,019m, \quad (9.74)$$

$$\text{Откуда } \varepsilon_{ок} = 1 - \frac{1,67 + 0,0191m}{3,11} = 0,464 - 0,00614m. \quad (9.75)$$

$$\text{Либо } \varepsilon_{ок} = 0,4 - 0,0029m. \quad (9.76)$$

Сведения об экспериментально определенных показателях свойств окатышей приведены в источнике [96].

Порозность агломерата может быть определена по ряду зависимостей [239, 241, 242–246]:

$$\varepsilon_{агл.} = 1,05 d_{rd}^{0,1921} = 1,05 \left[ 1 / \sum_1^n (a_i / d_i) \right]^{0,1921} \quad (9.77)$$

$$\varepsilon_{агл.} = 0,403 (d/10)^{0,14}, \quad (9.78)$$

где  $a_k$  – доля крупной фракции и ее порозность  $\varepsilon_k$ , ед;

$a_i$  – доля  $i$ -ой фракции с порозностью  $\varepsilon_i$ , ед;



$d_k$  и  $d_i$  – диаметры крупной и текущих фракций слоя, м.

Порозность кокса определяется по зависимостям, приведенным в зарубежной литературе [247]:

$$\varepsilon_k = 0,153 \log d + 0,727; \quad (9.79)$$

$$\varepsilon_k = 0,222d^{0,252}, \quad (9.80)$$

где  $d$  – средний размер куска, м.

Порозность шихты, представляющей собой смесь рудных компонентов (агломерата ( $A\%$ ) и окатышей ( $O_k\%$ )) и кокса, может быть определена, как

$$\varepsilon_{ш} = \frac{\varepsilon_{agl} \cdot V_{agl} + \varepsilon_{ок} \cdot V_{ок} + \varepsilon_k V_k}{V_{ш}}, \text{ ед.} \quad (9.81)$$

Для расчетов были приняты следующие два варианта определения порозности с учетом допущения, согласно которому слои рудных материалов и кокса не перемешиваются. Для первого варианта были приняты выражения (9.75), (9.77) и (9.79). По второму варианту расчет производился в соответствии с выражениями (9.76), (9.78) и (9.80). Порозность шихты в объеме сухой зоны определялась согласно (9.81).

Фигурирующий во всех выражениях определения перепада давления коэффициент сопротивления  $\psi$  учитывает режим движения газа в разных каналах шихты, как усредненной геометрической структуре слоя с местными сопротивлениями, извилистостью межкусковых каналов.

Состояние и характер движения газа в слое характеризуется критерием Рейнольдса, связанного с коэффициентом сопротивления зависимостью:  $\psi = A/Re^n$ , ед. Классическое определение критерия Рейнольдса представляется выражением [81, 96, 170, 203]:

$$Re = \frac{\omega_0 d \gamma_0 \phi}{g \cdot \mu (1 - \varepsilon)}, \quad (9.82)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость газа;

$\omega_0$  – скорость газового потока в пустой шахте, м/с;

$\phi$  – коэффициент формы.

Для определения величины коэффициента сопротивления использовано выражение [170, 203, 233, 240]:

$$\psi = 150 / Re + 1,75 \quad (9.83)$$

Важными факторами, определяющими величину перепада давления, являются состав, свойства и состояние (скорость) газового потока. Формируясь у фурм, состав газового потока и его

температура (от теоретически предельных, обусловленных параметрами комбинированного дутья) изменяются, достигают на колошнике характерных для данного технологического режима величин.

Состав фурменного и колошникового газа поддается точному термодинамическому расчету по известным моделям [203]. Определить расчетным путем состояние газового потока на разных горизонтах печи затруднительно, поэтому его изменение определяется упрощенно пропорционально высоте (от уровня фурм до колошника), либо обратно пропорционально площади сечения соответствующих горизонтов.

Расчетное состояние (скорость  $\omega_o$ , плотность  $\gamma_o$ ) газовой фазы при нормальных условиях первоначально относят к пустой шахте, в дальнейшем вводя поправки ( $m$ ) на температуру и давление в реальных условиях:

$$m = \left( \frac{1+t_{\Gamma}}{\alpha} \right) \cdot \frac{P_o}{P_i} \text{ или } m = \theta/P_i,$$

где  $\theta = (273+t_{\Gamma})/273$ ;

$P_i$  – давление в  $i$ -м слое;

$\alpha = 273$ ;

$P_o$  – атмосферное давление (ати, или КПа).

В состав соответствующих формул часто вводят в виде произведения отношений поправочные коэффициенты  $\frac{273+t_{\Gamma}^{oc}}{273} \cdot \frac{1}{P_o}$

либо  $\frac{273+t_{\Gamma}}{273} \cdot \frac{98}{P_o}$  в зависимости от выражения величины давления газа в печи ( $P_o$ ).

Скорость газа в каналах при этом определяется по выражению  $U = \frac{\omega_o}{\varepsilon} \cdot m$  или

$$U = \frac{\omega_o}{\varepsilon} \cdot \frac{273+t_{\Gamma}}{273} \cdot \frac{1}{P_o}. \quad (9.84)$$

Плотность газа при нормальных условиях ( $\gamma_o$ ), рассчитывается по моделям [234], или определяется по его составу с учетом табличных значений плотности каждого газового компонента ( $\Sigma\gamma_i$ ), или по молекулярному весу газа ( $M$ ):  $\gamma_o^c = M/22,4$ .

В расчетах принимается реальная плотность газа с учетом температуры и давления:

$$\rho^{\Gamma} = \rho_o^{\Gamma} \cdot \frac{P}{(273+t_{\Gamma}) \cdot 273} \quad (9.85)$$

Динамическая вязкость потока газа, учитывающая соответствующие показатели газовых составляющих, может быть определена по эмпирической зависимости Хеннинга и Ципперера [248]:

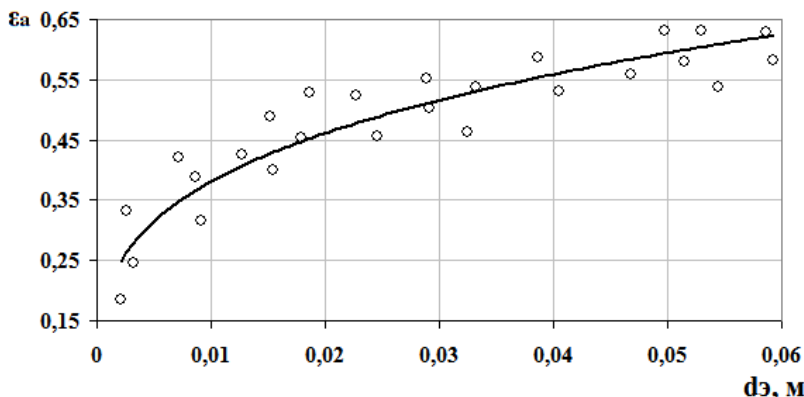
$$\mu_{см} = \frac{X_1 \mu_1 \sqrt{M_1 T_{кр1}} + X_2 \mu_2 \sqrt{M_2 T_{кр2}} + \dots}{X_1 \sqrt{M_1 T_{кр1}} + X_2 \sqrt{M_2 T_{кр2}} + \dots}, \quad (9.86)$$

где  $X_i$  – объемные доли отдельных составляющих продуктов сгорания,  $i=1, 2, \dots$ , ед;  $\mu_i$  – коэффициенты динамической вязкости при данной температуре,  $i=1, 2, \dots$ , Па/с;  $\sqrt{M_i T_{крi}}$  – коэффициенты, значения которых характерны для каждого из газовых составляющих,  $i=1, 2, \dots$ .

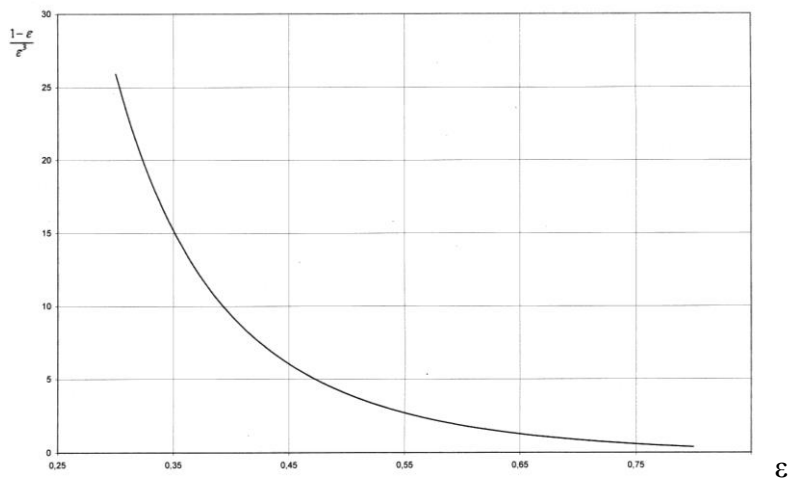
Анализ приведенных выражений показывает, что основными факторами, определяющими потери напора газового потока в столбе шихтовых материалов доменной печи, являются газодинамические параметры слоя материалов: диаметр частиц и их форма, образующих эквивалентный размер каналов, порозность и коэффициент сопротивления. От величин этих параметров, а также от свойств газов, зависит скорость движения газового потока через слои шихтовых материалов. Следовательно, для достоверного аналитического описания газодинамических процессов в доменной печи требуется тщательный анализ характеристик слоя шихтовых материалов. Достоверность расчета во многом определяется правильностью определения эквивалентного диаметра частиц, который обусловлен качественным определением исходного ситового состава шихтовых материалов. На рис. 9.5 представлена зависимость [239, 249] порозности агломерата от величины эквивалентного диаметра его куска, с помощью которой могут быть уточнены расчетные значения порозности.

Сопротивление газовому потоку определяется порозностью слоя материала. Свидетельством этого является представленная на рис. 9.6 зависимость параметра  $(1-\varepsilon/\varepsilon^3)$ , входящего в приведенные выше выражения для  $\Delta P$ , от величины порозности, представленная экспоненциальной функцией. Небольшое изменение величины  $\varepsilon$ , вызванной, например, спонтанным случайным увеличением окисленности агломерата и более активным его разрушением, резко увеличивает величину параметра  $(1-\varepsilon/\varepsilon^3)$  и, следовательно,

сопротивление потоку газа. К другим факторам, влияющим на порозность слоя шихтовых материалов, можно отнести низкую стабильность диапазона агрегатных превращений, трудно учитываемое разрушение железорудных материалов и кокса в транспортных потоках, агрегирование мелочи в определенных температурных интервалах, кострение (подстои) шихты при опускании в печи, сосредоточение мелочи (пыли), выдуваемой газовым потоком, с концентрацией ее в определенных зонах и др.



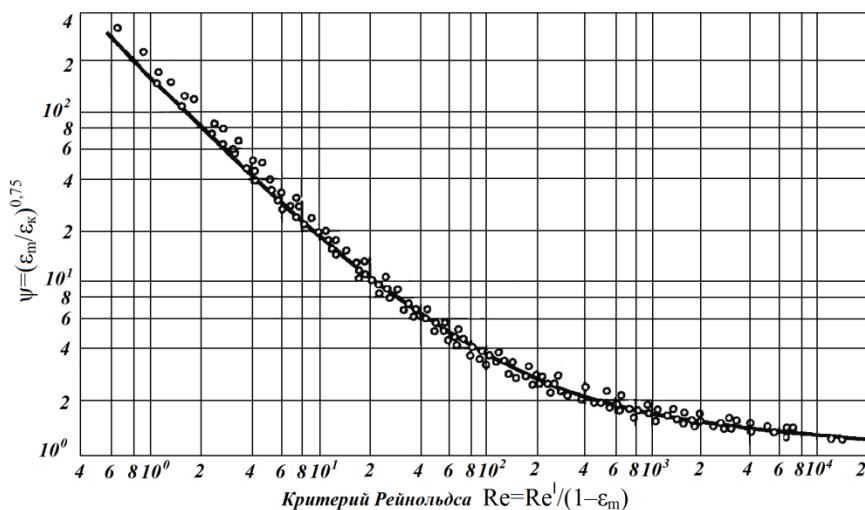
**Рис. 9.5.** Зависимость порозности  $\epsilon$  от эквивалентного диаметра куска агломерата в слое  $d_{э}$



**Рис. 9.6.** Зависимость коэффициента  $(1-\epsilon)/\epsilon^3$  от порозности  $\epsilon$

Третьим параметром, определяющим перепад давления газа в слое, является коэффициент сопротивления  $\psi$ , величина которого зависит как от качества формирующейся газовой фазы в доменной печи (параметры комбинированного дутья, геометрия фурменных устройств), так и порозности слоя шихты. Зависимость  $\psi$  от критерия Рейнольдса, характеризующего состояние газового потока (ламинарное, турбулентное движение), представляется в виде близкой к экспоненциальной функции (рис. 9.7) [203, 240], вследствие чего отражает высокую чувствительность сопротивления газу от величины скорости его в слое [250].

Необходимость установления рациональных величин вышеперечисленных физических характеристик шихтовых материалов обусловлена заметным влиянием их на уровень интенсивности плавки, тесно связанной со степенью использования газового потока в печи.



**Рис. 9.7.** Зависимость коэффициента сопротивления многокомпонентного слоя от критерия Рейнольдса по данным Ешара

Исходным параметром при расчете газодинамических процессов в печи является также состав горнового и колошникового газов. При расчете усредненного состава колошникового и горнового газов в печи определяется процентное содержание в них  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  и  $N_2$  в соответствии с выражениями:

$$CO = \frac{CO_{горн} \cdot V_{горн} + CO_{кол} \cdot V_{кол}}{V_{горн} + V_{кол}}; \quad (9.87)$$

$$CO_2 = \frac{CO_{2, кол} \cdot V_{кол}}{V_{горн} + V_{кол}}; \quad (9.88)$$

$$H_2 = \frac{H_{2, горн} \cdot V_{горн} + H_{2, кол} \cdot V_{кол}}{V_{горн} + V_{кол}}; \quad (9.89)$$

$$N_2 = \frac{N_{2, горн} \cdot V_{горн} + N_{2, кол} \cdot V_{кол}}{V_{горн} + V_{кол}}; \quad (9.90)$$

$V_{горн}$ ,  $V_{кол}$  – объемные расходы горнового и колошниковога газова соответственно м<sup>3</sup>/с;

$CO_{горн}$ ,  $CO_{кол}$ ,  $CO_{2, кол}$ ,  $H_{2, горн}$ ,  $H_{2, кол}$ ,  $N_{2, горн}$ ,  $N_{2, кол}$  – содержание соответствующих компонентов в горновом и колошниковом газе, ед.

Плотность усредненного газа

$$\rho = \frac{\rho_{CO} \cdot CO + \rho_{CO_2} \cdot CO_2 + \rho_{H_2} \cdot H_2 + \rho_{N_2} \cdot N_2}{100}, \text{ кг/м}^3, \quad (9.91)$$

где  $\rho_{CO}$ ,  $\rho_{CO_2}$ ,  $\rho_{H_2}$ ,  $\rho_{N_2}$  – плотности компонентов газа, кг/м<sup>3</sup>.

Для определения значений критерия Рейнольдса было использовано выражение (9.82), коэффициента сопротивления газовому потоку – выражение (9.83). Перепад давления в сухой зоне был определен в соответствии с выражениями (9.70).

При использовании приведенных выше зависимостей может быть рассмотрен характер перемещения газов в общем объеме сухой зоны печи. Для описания газодинамических процессов в сухой зоне печи необходимым является учет неравномерности распределения шихтовых материалов по различным кольцевым зонам.

Рациональное с точки зрения газодинамики формирование структуры столба шихтовых материалов, обеспечивающее развитие сухой зоны и, следовательно, рост степени использования газового потока, обусловлено распределением шихтовых материалов на колошнике, соответствующими свойствами сырья (крупность, порозность и др.), а также уровнем генерации и качества газа, образующегося в фурменном очаге (выход газа, его состав, параметры). В зависимости от сформированной структуры столба шихты происходит и распределение газа по равновеликим зонам. Поэтому важной является оценка взаимосвязи показателей,

характеризующих газодинамическое состояние столба шихты, которые могут быть определены с помощью математических зависимостей [251, 252], приведенных ранее, с распределением горнового и колошниковогаз по зонам. При этом за основу принят ряд положений, согласующихся с приведенными в литературе [203, 233, 253]:

- распределение газового потока по сечению печи обратно пропорционально распределению рудных нагрузок ( $R_i$ ), а с учетом масс кокса в равновеликих зонах – коэффициентам газопроницаемости ( $\xi_i$ );
- распределение рудных нагрузок для данных условий плавки определяется с помощью модели радиального распределения шихты;
- распределение рудных нагрузок по сечению печи прямо пропорционально распределению  $\text{CO}_2$  в газе по сечению колошника и обратно пропорционально распределению температуры колошниковогаза;
- перепад давления газа по высоте печи при данной гранулометрии железорудных материалов и ее распределении в равновеликих зонах зависит от количества и качества комбинированного дутья (выход горнового газа). Величина последнего ограничена свойствами кокса, интенсивно разрушающегося при превышении критической скорости дутья (газа), истекающего из фурмы;
- скорость схода материалов в печи зависит от перепада давления газового потока и активного веса сырья в данной зоне, характеризуемого, в частности, относительным объемом материалов.

На основании исследований газодинамических процессов в сухой зоне доменной печи определены математические зависимости, позволяющие описывать процессы движения газов в сухой зоне [254]. Газопроницаемость в поперечном сечении печи не является равномерной и в значительной степени зависит от радиального распределения шихтовых материалов [80, 255], влияние которого по высоте печи распространяется вплоть до зоны размягчения материалов. Разработанная в ИЧМ модель радиального распределения шихтовых материалов предусматривает для этого определение массы и объема каждого шихтового материала в равновеликих кольцевых зонах, на которые условно разбивается колошник доменной печи. Расчет

относительных объемов шихтовых материалов в равновеликих кольцевых зонах осуществляется в соответствии с выражениями:

$$- \text{агломерата} \quad v_{ai} = \frac{R_i \cdot \omega_{ai}}{\gamma_a \left[ R_i \left( \frac{\omega_{ai}}{\gamma_a} + \frac{\omega_{oi}}{\gamma_o} \right) + \frac{1}{\gamma_\kappa} \right]}; \quad (9.92)$$

$$- \text{окатышей} \quad v_{oi} = \frac{R_i \cdot \omega_{oi}}{\gamma_o \left[ R_i \left( \frac{\omega_{ai}}{\gamma_a} + \frac{\omega_{oi}}{\gamma_o} \right) + \frac{1}{\gamma_\kappa} \right]}; \quad (9.93)$$

$$- \text{кокса} \quad v_{\kappa i} = \frac{1}{\gamma_\kappa \left[ R_i \left( \frac{\omega_{ai}}{\gamma_a} + \frac{\omega_{oi}}{\gamma_o} \right) + \frac{1}{\gamma_\kappa} \right]}, \quad (9.94)$$

где  $\gamma_a$ ,  $\gamma_o$ ,  $\gamma_\kappa$  – насыпные массы агломерата, окатышей и кокса соответственно, т/м<sup>3</sup>;  $\omega_{ai}$ ,  $\omega_{oi}$  – относительное содержание (доля) агломерата и окатышей железорудной части шихты в  $i$ -ой зоне, ед;  $R_i$  – рудная нагрузка, т/т.

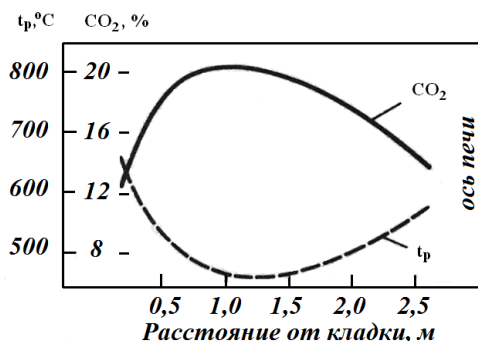
Газодинамическая характеристика сухой зоны предопределяет необходимость знания распределения температур по сечению печи. Оценка его возможна с использованием хорошо проверенной зависимости распределения  $\text{CO}_2$  (а следовательно  $R_i$ ) и температуры. Из анализа проведенных исследований [255] также следует, что между скоростью газового потока и его температурой существует тесная взаимосвязь. Правомочность описанных связей подтверждается приведенными в работе [80] результатами исследований, проведенных на Енакиевской доменной печи, согласно которым характер изменения температуры газа по радиусу колошника может быть описан кривой, приведенной на рис. 9.8. При расчете исходным явилось среднее значение температуры колошникового газа, принятого равным 180°C, от которого обратно пропорционально рудной нагрузке производится пересчет значений температур в каждой кольцевой зоне.

Температура колошникового газа в  $i$ -ой кольцевой зоне может быть определена из выражения:

$$T_i = \frac{T \cdot n}{R_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}, \quad (9.95)$$

$T$  – средняя температура колошникового газа, °C.





**Рис. 9.8.** Изменение температуры колошникового газа.

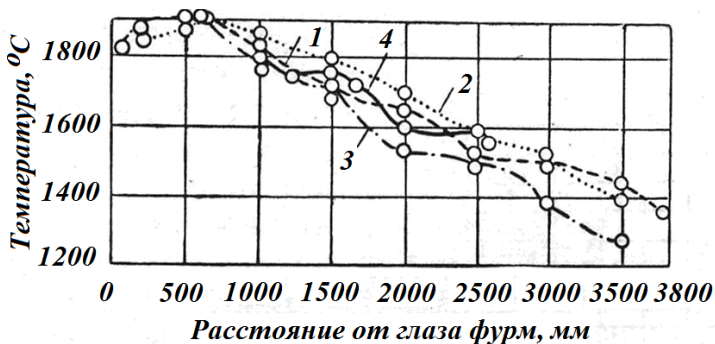
Оценка газодинамического состояния сухой зоны в среднем сечении печи предопределяет необходимость знания распределения здесь температур. Последние принято определять как среднее между температурами на колошнике и температурами в горне по оси фурменной зоны. Распределение здесь температур определяется экспериментально или с помощью адаптации известных данных к исследуемым условиям.

Как показано в работе Готлиба А. Д. [81], температура горнового газа в кольцевых зонах определяется линейной зависимостью и уменьшается от температуры на фурмах до величины порядка 1350–1400 °C в оси печи. Принятая величина температуры в центре печи объясняется тем, что она не должна быть ниже того значения, при котором шлак и чугун сохраняются в жидком виде. На рис. 9.9 приведены характерные кривые изменения температур по радиусу печи по данным [81]. Максимальная величина температуры у фурм (теоретическая температура горения) определяется известным способом [203].

Температура горнового газа в равновеликих зонах по сечению горна доменной печи определяется по эмпирической зависимости:

$$T_{22}^i = 8,5539 \cdot k^2 + 120,52 \cdot k + 1308, \quad (9.96)$$

где коэффициент  $k$  подбирается таким образом, чтобы обеспечить температуру горнового газа в оси печи 1300–1310 °C, а на периферии –  $0,85 \cdot T_f$ .



**Рис. 9.9.** Распределение температуры газа по радиусу горна доменной печи

Количество горнового и колошникового газа определяется для данных условий плавки по известным моделям [81]. Выход газа в  $i$ -ой зоне (для колошникового и горнового газов) может быть определен с помощью выражения:

$$V_i = \frac{V}{R_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}, \quad (9.97)$$

где  $n$  – количество равновеликих кольцевых зон, ед.;

$V$  – общий выход газа, м<sup>3</sup>/мин;

$R_i$  – рудная нагрузка в  $i$ -ой кольцевой зоне печи, т/т.

Таким образом, с использованием приведенных положений могут быть описаны газодинамические процессы в кольцевых зонах сечения печи.

### 9.2.2 Исследования газодинамики пластичной зоны

Уровень газопроницаемости столба шихты обуславливает интенсивность потока газов в слое материалов и при направленном его распределении за счет рационального режима загрузки активизирует протекание химических реакций, рост степени использования газов, оптимизирует тепло- и массообмен в верхней и нижней части доменной печи. Решающее влияние на эти процессы оказывает пластичная зона. Знание закономерностей изменения газопроницаемости в этой зоне, путей и способов управления ею является важным фактором достижения высоких технико – экономических результатов доменной плавки, снижения расхода топлива и роста производительности печи [253].

### 9.2.2.1 Общие представления о движении газового потока в пластичной зоне

При исследовании замороженных доменных печей получены данные, подтверждающие послойное формирование и опускание составляющих шихты и присутствие в печах пластичной зоны, состоящей из чередующихся слоев кокса и размягченных пластичных железистых масс. Слои кокса в зоне пластичности в достаточной степени газопроницаемы, в сумме их можно считать областью, определяющей распределение газа в печи. Поток газа, испытывая большое сопротивление отдельных пластичных слоев, проходит в основном через заполненные коксом промежутки – коксовые окна. Считается, что в пластичной зоне газовые потоки движутся преимущественно в радиальном направлении только через слои кокса. В виду отмеченных особенностей формирования структуры столба шихты, потери напора в пластичной зоне оказываются наибольшими и составляют 50% от суммарных, тогда как потери в сухой зоне – 20%, а потери между фурмами и пластичной зоной – 30%. [215].

Движущиеся через нижние коксовые окна пластичной зоны и поднимающиеся вверх у стенки печи потоки газа–восстановителя, по сравнению с газовыми потоками в осевой зоне печи, совершают не только более длинный путь, что уменьшает интенсивность процесса нагрева нисходящих шихтовых материалов [218]. Следует учесть, что скорость газа в осевой зоне печи вследствие, как правило, меньшего здесь сопротивления газовому потоку по сечению печи больше, поэтому количество газа, реагирующего с отдаваемым рудой кислородом, в направлении от периферии к оси печи тоже различно.

Исследования с помощью математических моделей показали [200], что в случае наиболее распространенной формы пластичной зоны с относительно широким основанием и умеренной высотой, поток газа может быть более интенсивным. Однако, если высота пластичной зоны уменьшается, то площадь проходов газового потока уменьшится и сопротивление движению газов значительно возрастет. При этом резко увеличится давление под пластичной зоной (нижний перепад) и уменьшится давление колошниковога газа (верхний перепад). Причиной этого является возрастание сопротивления проходу газа сквозь пластичную зону вследствие уменьшения ее площади. В этом случае, через нижние коксовые окна может проходить большее количество газа, чем через верхние. Вышеприведенное свидетельствует о

существовании объективной закономерной связи формы пластичной зоны, количества и размеров коксовых окон в ней и скорости движения газа, газопроницаемости материалов шихты, перепадов давления по высоте столба, его структуры. В этой связи для осмысления таких взаимосвязей исходили из следующих положений:

- при низком расположении основания пластичной зоны возрастает газовый поток у стенок печи;
- увеличение скорости газа может приводить к уменьшению коэффициента его использования;
- при перемещении вершины пластичной зоны вверх к колошнику количество и скорость газа, проходящего в осевой зоне печи, возрастают, в то время как степень его использования уменьшается.

Изучению газопроницаемости шихты в доменной печи и определяющих ее параметров (скорость газа, перепад давления и др.) отечественными исследователями всегда уделялось должное внимание в рассмотрении, главным образом, состояния столба шихты в целом [150, 256]. За рубежом исследования газопроницаемости столба шихты с учетом пластичной зоны проводились как с использованием методов математического моделирования, так и моделированием с помощью электрической аналоговой модели (с электрочувствительной бумагой) [257]. Было установлено, что потенциальные модельные несжимаемые ламинарные потоки соответствуют реальным сжимаемым турбулентным газовым потокам в доменной печи. При этом показано, что при сжимаемом потоке, перепад давления в верхней части печи значительно больше, чем при несжимаемом. Это обусловлено уменьшением плотности газового потока в направлении к колошнику. Количество газа, проходящего через коксовые окна, при сжимаемом и несжимаемом потоках различно, поэтому в реальной доменной печи можно лишь качественно применять данные, определенные на модели. В первом приближении, газопроницаемость может быть оценена по величине отношения  $\chi_l/\chi_d$  сопротивления газовому потоку в области кусковых материалов ( $\chi_l$ ) и в области стекания жидких продуктов плавки ( $\chi_d$ ). Отношение  $\chi_l/\chi_d$  зависит от гранулометрического состава, прочности кокса и железосодержащей части шихты, а также от количеств этих материалов в подаче. При высоких значениях этого отношения, газ проходит через верхние коксовые окна пластичной зоны, что приводит к установлению центрального

хода печи. При  $\chi_l = \chi_d$  газ проходит, в основном, через нижние коксовые окна, и ход печи становится периферийным.

### 9.2.2.2 Разработка математической модели газодинамики пластичной зоны

Для определения расхода газа через коксовые окна воспользовались приведенными в работе [198] результатами исследований. Выражения для определения количества проходящего через коксовые окна газа получены авторами работы при следующих допущениях:

1. Распределение газа по коксовым окнам определяется свойствами примыкающей к ним шихты в сухой зоне и поведением коксовой насадки на внутренней поверхности пластичной зоны.

2. Линии тока в области стекания жидких продуктов плавки параллельны оси печи, в пластичной зоне перпендикулярны оси печи, а в области кусковых материалов – параллельны стенке печи.

3. Сопротивление газовому потоку в пластичной зоне и в области выше и ниже нее (рис. 9.10) является равномерным. Для упрощения, пластичная зона рассматривается как однородная зона со средним сопротивлением газовому потоку. Принимается также, что толщины слоев кокса и жидкой фазы равны между собой. При условии, что сопротивление коксового слоя равно сопротивлению коксового конуса (области стекания жидких продуктов плавки), горизонтальные потоки будут проходить из коксового конуса через коксовые окна. Можно принять, что  $\chi_{cz} = 2\chi_d$  ( $\chi_{cz}$  – сопротивление пластичной зоны).

4. Высота зоны печи, на которой осуществляются перетоки газа, считается от заплечиков до вершины пластичной зоны.

В отличие от принятого авторами допущения об однородности рассматриваемой пластичной зоны, предлагаемая модель основана на представлении пластичной зоны в виде чередующихся слоев железосодержащих материалов и кокса, сформированных программой загрузки. Основываясь на таком представлении пластичной зоны и приведенных допущениях, можно рассчитать расход газа через коксовые окна при трех различных отношениях  $\chi_l/\chi_d$ .

Вначале определяется общее сопротивление для окна  $k$  ( $r_k$ ), которое равно сумме отдельных сопротивлений для трех областей:

$$r_k = \chi_d \frac{H_{tb}(1-x)}{(R_b - W_b)} + \chi_{cz} \frac{W_b \cdot x + W_t(1-x)}{H_{tb}} + \chi_l \frac{H_{tb} \cdot x / \sin \beta}{R_b - W_t - H_{tb} / \operatorname{tg} \beta} \quad (9.98)$$

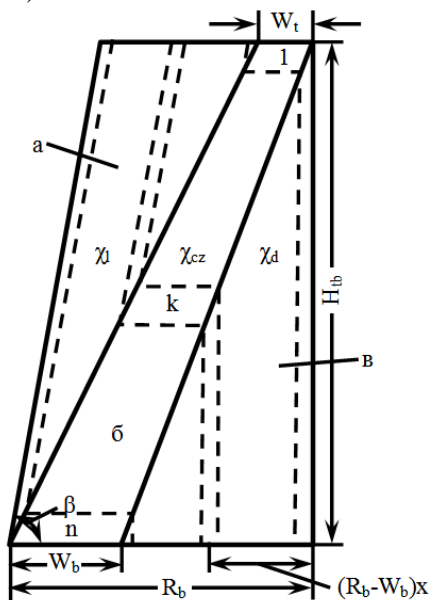
где  $x = \frac{X_k}{R_b - W_b}$  (9.99)

$X_k$  – расстояние от оси до середины окна, м.

$$R_0 = \chi_d \frac{H_{tb}}{R_b - W_b} + \chi_{cz} \frac{W_t}{H_{tb}} \quad (9.100)$$

$$R_k = \chi_{cz} \frac{W_b}{H_{tb}} + \chi_l \frac{H_{tb} / \sin \beta}{R_b - W_t - H_{tb} / \tan \beta} \quad (9.101)$$

$$r_k = (R_0(1-x) + R_k \cdot x) \quad (9.102)$$



**Рис. 9.10.** Схема к расчету расхода газа, проходящего через коксовые окна: а – область кусковых материалов; б – пластичная зона; в – область стекания жидких продуктов плавки

Площадь участка поверхности  $k$ -го коксового окна на поверхности размягчения определяется из выражения:

$$A_k = \pi \cdot (r_n \cdot (l_k^{обп} + l_k) - r_\delta \cdot l_k^{обп}) \quad (9.103)$$

где  $r_e$  и  $r_n$  – соответственно верхний и нижний радиусы  $k$ -го коксового окна, м;

$l_k = \sqrt{H_k^2 + (r_n - r_e)^2}$  – длина коксового окна, м;

$H_k$  – высота коксового окна, м;

$l_k^{обр} = \sqrt{r_e^2 + \frac{r_e^2 H_k^2}{(r_n - r_e)^2}}$  – длина образующей конуса с радиусом

основания  $r_e$  и углом наклона образующей, равной углу наклона границы коксового окна.

Доля количества газа  $V_k$  для любого  $k$  – го окна определена следующим образом:

$$V_k = \frac{A_k / r_k}{\sum_{i=1}^n A_i / r_i}, \text{ ед.} \quad (9.104)$$

В выражениях (9.98)–(9.104) и на схеме (рис. 9.10) использованы следующие условные обозначения:

$H_{тб}$  – высота зоны влияния горизонтальных потоков (газовых потоков, проходящих через коксовые окна), м;

$W_t$  – ширина верхнего слоя пластичной зоны, м;

$W_b$  – ширина верхнего корневого слоя (примыкающего к стенке печи), м;

$R_b$  – радиус распара, м;

$\beta$  – угол наклона шахты, рад.;

$r_k$  – безразмерное общее сопротивление газовому потоку для окна  $k$ , ед.;

$R_k$  – отдельные сопротивления, ед.;

$A_i$  – площадь участка поверхности  $i$ -го коксового окна;

$n$  – количество коксовых окон в пластичной зоне.

Общее количество газа, проходящего через коксовые окна зоны пластичности, определяется суммой элементарных расходов газа через все коксовые окна.

Потерю напора (перепад давления) в пластичной зоне можно определить согласно, предложенному для высоких чисел Рейнольдса, выражению Эгона:

$$\Delta P = L \cdot \frac{\psi \cdot U^2 \cdot \rho}{D_9} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\theta}{P_H}, \text{ Па,} \quad (9.105)$$

где  $\varepsilon$  – порозность, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$L$  – длина коксового окна, м;

$U$  – скорость газа на выходе из коксового окна, м/с;

$\psi$  – коэффициент сопротивления, ед.;

$D_p$  – эквивалентный диаметр канала, мм;

$\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Для определения перепада давления в пластичной зоне предложен следующий алгоритм:

1. Давление газа на входе в пластичную зону задается с учетом его потерь после прохождения им фурменной зоны.

2. Количество газа в  $i$ -ой зоне определяется суммой его расходов через коксовые окна, проекция которых на горизонтальную плоскость попадает в границы этой зоны.

3. Скорость газа на выходе из коксового окна определяется отношением расхода газа в  $i$ -ой зоне к площади сечения, через которую он проходит. Причем, при определении скорости газа, проходящего через коксовое окно, учитывается проекция площади этого окна на горизонтальную плоскость, проходящую через верх пластичной зоны.

4. Перепад давления в каждой равновеликой зоне определяется с учетом скорости газа на выходе из коксового окна, рассчитанной согласно п.3, и газодинамическому сопротивлению коксового окна, рассчитанного по формуле 9.83. Порозность материала в пластичной зоне задается  $\varepsilon_{пз} = 0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$  [258].

На основе приведенных выше положений разработана математическая модель оценки газодинамики пластичной зоны, позволяющая определять расход горнового газа, проходящего через коксовые окна пластичной зоны, сформированные программой загрузки шихты, а также рассчитывать перепады давления в равновеликих кольцевых зонах печи.

Выполненные аналитические исследования особенностей структуры столба шихты, а также формирования ею соответствующего распределения газового потока по сечению доменной печи позволили разработать метод оценки газодинамики плавки [13]. Метод основан на системном представлении структуры столба шихтовых материалов, использовании математических моделей для описания положения элементов структуры и особенностей движения газового потока, а также экспериментальных данных, полученных на основе информации системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике о границе сухой зоны доменной печи и характере опускания шихтовых материалов. Результаты выполненных с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи шихты



экспериментальных исследований характера опускания шихтовых материалов в шахте печи приведены во втором разделе работы.

Таким образом, выполненные аналитические исследования структуры столба шихтовых материалов в доменной печи позволили усовершенствовать известные и разработать новые методы расчета положения элементов структуры и оценки газодинамических особенностей ее функционирования. Получаемая с помощью профилемера информация о параметрах распределения шихтовых материалов на колошнике, границе сухой зоны, а также скоростях опускания шихты по сечению печи позволяет адаптировать математические модели и методы расчета структуры столба к конкретным объектам исследований, что повышает достоверность определения искомым параметров. А так как управление формированием структуры столба осуществляется на основе математического моделирования отдельных составляющих структуру элементов, то повышение достоверности их расчета позволит устанавливать их взаимосочетание, обеспечивающее рациональную структуру столба, что может быть выполнено в дальнейших исследованиях.

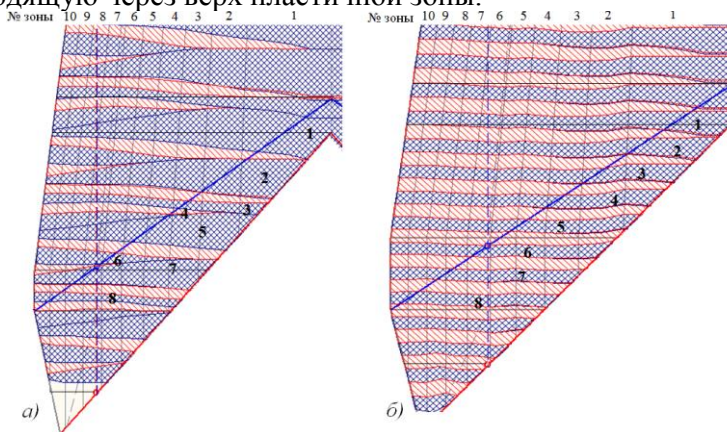
### **9.3 Результаты аналитических исследований с помощью разработанных алгоритмов и математических моделей**

В качестве примера использования усовершенствованных и разработанных алгоритмов, математических моделей и экспериментальных исследований опускания шихтовых материалов в шахте доменной печи, ниже приведены в кратком изложении результаты аналитических исследований элементов структуры столба шихты и газодинамического режима доменной плавки двух крупнейших печей СНГ – №5 ОАО «Северсталь» и №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

С помощью разработанного алгоритма на основе экспериментальных исследований опускания поверхности шихтовых материалов в шахте доменной печи рассчитаны положения слоев шихтовых материалов по мере их опускания в сухой зоне доменных печей №5 и №9. При этом, цикл загрузки шихтовых материалов для ДП №5 представляет собой две порции шихты, а для ДП №9 – состоит из 10-ти последовательно выгружаемых порций. Показано, что характер опускания слоев шихтовых материалов в шахте печи определяет положение и структуру элементов столба шихты, особенно пластичной зоны. На основе разработанной математической модели определены форма и

положение пластичной зоны для условий работы доменных печей №5 ОАО «Северсталь» и №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Установлено, что точка пересечения линией размягчения оси печи - верхняя граница пластичной зоны для двух отличающихся программ загрузки ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» расположена на расстоянии 11,8–13,1 м от оси воздушных фурм, а для программы загрузки ДП №5 ОАО «Северсталь» это расстояние составляет 14,6 м.

С помощью алгоритма расчета опускания шихтовых материалов в сухой зоне определены количество и форма чередующихся слоев железорудной части шихты и кокса, составляющих пластичную зону, границы расположения которой рассчитаны с помощью предложенной математической модели. Установлено, что в зависимости от сформированной структуры столба шихты происходит и распределение газа по равновеликим зонам. С учетом расположения слоев шихтовых материалов, находящихся в пределах рассчитанных границ пластичной зоны (рис. 9.11), определен структурный состав образующих ее слоев, что впервые позволило рассчитать расход и скорость проходящего через коксовые окна пластичной зоны газа. Определен расход газа, проходящего через каждую равновеликую кольцевую зону, а также скорости газа, проходящего через эти кольцевые зоны, определяемые отношением расхода дутья к площади проекций выходных сечений коксовых окон на горизонтальную плоскость, проходящую через верх пластичной зоны.



**Рис. 9.11.** Распределение коксовых окон в пластичной зоне ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (а) и ДП №5 ОАО «Северсталь» (б)

С использованием предложенного математического аппарата рассчитаны газодинамические характеристики слоев шихтовых материалов и величины перепада давления в равновеликих кольцевых зонах печи. Выполненные с помощью разработанного математического аппарата исследования позволили установить и количественно определить влияние параметров распределения шихтовых материалов в совокупности с дутьевым режимом на газодинамические процессы в сухой зоне печи, оцениваемые по перепадам давления.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный математический аппарат позволяет удовлетворительно описать условия дискретизации сухой зоны печи на отдельные кольцевые зоны при расчете газодинамических процессов, что позволит в дальнейшем осуществлять прогнозную оценку изменения газодинамического режима при изменении состава шихтовых материалов, дутьевых параметров и параметров распределения шихты.

С помощью разработанной модели определены значения перепадов давления в равновеликих кольцевых зонах при прохождении газов через пластичную зону для двух анализируемых программ загрузки ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и №5 ОАО «Северсталь».

Выполнен расчет геометрических параметров фурменной зоны – ее длины, ширины и высоты, а также определены параметры «малоактивного коксового конуса» для ДП №9 и ДП №5. Выполнена количественная оценка газодинамических процессов в фурменной зоне для двух вариантов, в одном из которых принимается условие, что весь выходящий из фурменного очага газ движется в коксовом канале по направлению к коксовым окнам, причем, те из них, которые находятся в корневой части пластичной зоны и «упираются» в заплечики шахты печи, закрыты для прохода газа. Для другого варианта расчета принимается условие, что выходящий из фурменного очага газ проходит через все коксовые окна, находящиеся в пластичной зоне. Полученные по второму варианту расчета значения перепада давления соответствуют представлениям о распределении газа в коксовом канале и «малоактивном коксовом конусе» и могут быть приняты для дальнейших исследований. Выполненная количественная оценка газодинамических процессов в фурменной зоне является базой для описания газодинамических процессов во всем объеме структуры столба шихтовых материалов в доменной печи.

С учетом полученного неравномерного распределения скоростей газового потока по сечению печи, выходящего из коксовых окон пластичной зоны, выполнен расчет газодинамических характеристик слоев материалов и перепадов давления в кольцевых зонах сечения сухой зоны ДП №9 и ДП №5.

В результате определения суммарных потерь давления газового потока установлено, что наибольшие потери характерны для пластичной зоны, что удовлетворительно согласуется с известными из литературных источников данными, согласно которым потери напора при прохождении газа через пластичную зону могут достигать 60%. Причем, при определении перепадов давления в каждом структурном элементе по высоте столба шихты, величина давления задавалась с учетом потерь давления газа, выходящего из предыдущего элемента. Сопоставление расчетных параметров перепадов давления в элементах структуры столба шихтовых материалов с измеренными на ДП №9 и ДП №5, свидетельствует об их высокой сходимости. Например, для ДП №9, полученные в результате расчетов значения верхнего и нижнего перепадов давления: верхнего – 0,038 МПа и нижнего – 0,171 МПа, близки к измеренным на печи значениям, составляющим, соответственно, верхний – 0,024 МПа и нижний – 0,160 МПа. Высокая сходимость расчетных значений перепадов давления в элементах структуры столба шихты с измеренными в исследуемые периоды работы ДП №9 и ДП №5 позволяет использовать разработанный метод для оценки газодинамики доменной плавки в изменяющихся шихтовых и технологических условиях.

Получаемая с помощью стационарных систем контроля поверхности засыпи шихты информация открывает перспективы развития научной базы об особенностях строения и изменений структуры столба шихты в доменной печи (при условии рассмотрения элементов структуры как частей единой взаимосвязанной системы) путем совершенствования и разработки новых алгоритмов и математических моделей с возможностью их адаптации к конкретным условиям плавки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении более чем 10 лет в составе АСУ ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» функционирует установленная в соответствии с технологическим заданием ИЧМ система контроля поверхности засыпи шихты на колошнике. Стационарная система контроля поверхности засыпи установлена также на ДП №8 этого же Комбината. Продолжительная эксплуатация этой системы, не требующая для поддержания работоспособности никаких материальных затрат, свидетельствует о целесообразности использования аналогичных систем в условиях доменной плавки. К большому сожалению авторов данной работы, не все представленные в ней разработки реализованы в составе АСУ ДП, причиной чего стало прекращение творческих связей с Комбинатом.

Представленные в книге результаты исследований, выполненных сотрудниками ИЧМ за последние десять лет, являются базой для дальнейшей разработки новых технологических способов контроля, прогноза и управления доменной плавкой на основе информации, получаемой стационарными системами измерения профиля поверхности засыпи.

Большие перспективы использования информации профилемеров в принятии обоснованных управляющих воздействий на ход доменной плавки с целью минимизации энергозатрат на выплавку чугуна открываются на доменных печах, в составе АСУ ТП которых реализованы автоматизированные системы распределения дутья и природного газа по фурмам, контроля разгара и теплового состояния металлоприемника, контроля и прогноза шлакового режима. Такими объектами являются ДП №9 и ДП №8 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», на которых реализованы разработанные ИЧМ автоматизированные системы [12, 259–263].

На основе установления взаимосвязи параметров распределения шихтовых материалов, определяемых с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи, распределением дутья по фурмам, с расходом кокса и качеством готовых продуктов плавки могут быть разработаны комплексные критерии оценки хода процессов плавки, на основе которых может быть создана интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой, предназначенная для оценки состояния процесса доменной плавки, а также прогноза ее

изменений при колебаниях топливно-сырьевых условий и требований к химическому составу продуктов плавки. Целевой функцией системы будет являться формирование и стабилизация режимов доменной плавки, позволяющих минимизировать энергозатраты на выплавку чугуна и направленных на увеличение стойкости футеровки и продление кампании доменной печи.

Перспективным является использование информации профиломеров при выполнении научных исследований, направленных на разработку математических моделей процессов в доменной печи с целью определения рациональных режимов ее работы [12]. Полученная с помощью профиломеров информация может являться исходной для использования в математических моделях. Кроме того, разрабатываемые модели могут быть адаптированы к условиям реальных объектов на основе информации профиломера.

Многолетний опыт успешной эксплуатации радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» открывает перспективы расширения эффективного использования информации о параметрах поверхности засыпи шихты, включая разработку новых способов контроля, прогноза и управления процессом доменной плавки, а также проведения исследований по определению особенностей формирования поверхности шихтовых материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / Большаков В. И. – К.: Наук.думка, 2007. – 412 с.
2. *Совершенствование управления распределением шихты и газа в доменных печах* / [Большаков В. И., Шутылев Ф. М., Гладков Н. А., Муравьева И. Г., Шулико С. Т.] – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2002. – № 12. – С. 19–24.
3. *Тараканов А.К.* Оценка приоритетов в развитии автоматизированных систем управления доменным процессом / Тараканов А. К., Иващенко В.П., Лялюк В. П. – Новини науки Придніпров'я, збірка наукових доповідей до науково-практичної конференції, присвяченої 100-річчю Г. А. Воловіка, 2010. – С. 15–22.
4. *Использование информации профилемера для выбора управляющих воздействий на ход доменной плавки* / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шулико С. Т., Листопадов В. С., Дмитренко К. А., Орел Г. И.] – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2006. – № 5. – С. 29–34.
5. *Радиолокационный контроль металлургических процессов* / [Головки В.И., Кукушкин О.Н., Михайловский Н.В., Потапов А.В., Смоктий В.В., Хасянов А.Ф.] – Днепропетровск, 2010. - 388 с.
6. *Доменное производство “Криворожстали”*. Монография под ред. чл. корр. НАНУ В. И. Большакова. КГГМК, ИЧМ. Днепропетровск. 2004. – 378 с.
7. *Большаков В.И.* Средства контроля профиля поверхности засыпи шихты в доменной печи / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева. – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2002. – № 2. – С. 91–94.
8. *Перспективы использования профилемеров в управлении распределением шихтовых материалов в доменной печи* / [Большаков В.И., Муравьева И. Г., Шулико С. Т., Семенов Ю. С., Листопадов В. С.] – Теория и практика производства чугуна, труды международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК “Криворожсталь”, 2004. – С. 404–408.
9. *Технологические требования к установке радиолокационного профилемера на колошнике доменной печи* / [И. Г. Муравьева, В. И. Большаков, С. Т. Шулико и др.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2002.–№4.–С. 109–112.
10. *Особенности представления информации, полученной радиолокационным профилемером* / [В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов, С. Т. Шулико, Е. А. Белошарпа] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2004. – Вып. 9. – С. 45–50.
11. *Большаков В.И.* Эффективность использования радиолокационных устройств для контроля уровня и профиля засыпи в доменных печах /

- Большаков В. И. – *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2012. – № 5. – С. 9–10.
12. *Муравьева И.Г.* Новые возможности автоматизированного управления ходом доменной печи / Муравьева И. Г. – *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2010. – № 3. – С. 126–129.
13. *Муравьева И.Г.* Повышение эффективности доменной плавки с использованием информации стационарных систем измерения профиля поверхности засыпи шихты / Муравьева И. Г. – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», Вып. 18, 2008. – С. 16–20.
14. *Курунов И.Ф.* К вопросу об эффективности применения на доменных печах различных загрузочных устройств / Курунов И. Ф. – *Металлург*, 2009. – №11. – С. 34–41.
15. *Патент UA 82305 C2.* Способ прогнозирования содержания кремния в чугуне / Большаков В. И., Шулико С. Т., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Жучков С. М. – опубл. 25.03.08, Бюл. №6, 2008 г.
16. *Прогнозирование* теплового состояния горна доменной печи / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шулико С. Т., Шумельчик Е. И.] – *Сталь*, 2009. – №5. – С. 7–9.
17. *Патент UA 91799 C2* на изобретение. Способ определения положения пластичной зоны в доменной печи / Большаков В. И., Муравьева И. Г., Шулико С. Т., Семенов Ю. С., Гладков Н. А., Пинчук Д. В., Дмитренко К.А. – заявл. 30.06.09; опубл. 25.08.10, Бюл. № 16, 2010 г.
18. *Метод* оценки газодинамического режима доменной плавки, основанный на информации радиолокационного профилемера / [Муравьева И.Г., Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И.] – «Известия вузов. Черная металлургия», 2012. –№. 3, С. 29–35.
19. *Ефремов Д.В.* Движение материалов в шахте большой доменной печи / Ефремов Д. В.– М.: Металлургия, 1938. (Научные труды Ленинградского индустриального института, вып. 2), С. 15.
20. *Development and application of measuring equipment for burden distribution in the blast furnace* / [Iizuka Motohiko, Kajikawa Syuji, Nakatani Genji, Wakimoto Kazumasa, Matsumura Katsumi] – *Nippon Kokan Techn. Rept*, 1980. – № 30. – P. 13–23.
21. *Контроль* распределения шихты на колошнике посредством профилемера в период работы доменной печи только на коксе / [Komietani Akiyoshi, e. a.] – *Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan*, 1982, 68, № 11, P. 693.
22. *Utilisation de la sonde de talutage à l'intérieur du haut fourneau. Expériences françaises* / [Nicolle R., Loubert J. P., Mosser F., Thirion C.] – *Rev. mét.*, 1984, 81, № 2, P. 101–107, II, IV.
23. *Большаков В.И.* Совершенствование способов загрузки доменных печей в СССР и за рубежом / [Большаков В. И., Покрышкин В. Л., Шутылев Ф. М.] – *Черная металлургия*, сер. Подготовка сырьевых



- материалов к металлургическому переделу и производство чугуна, обзорная информация, Москва 1983. – вып. 2 – 33 с.
24. *Пугачев А.В.* Контроль доменного процесса гамма-лучами / Пугачев А. В. – М.: Металлургия, 1969. – 240 с.
25. *Методы* контроля профиля поверхности засыпи шихты / [Базалинский Ю. И., Гришкова А. А., Френкель М. М., Белашов В. Г., Докукина Е. В.] – Черная металлургия, сер. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна, обзорная информация, Москва 1987. – вып. 1 – 21 с.
26. *Разработка* устройства для измерения профиля засыпи на колошнике доменной печи с использованием лазера / [Nangai Takashi, e.a.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1982, 68, № 4, P. 64.
27. *Исследование* характера распределения шихты. Изучение состояния распределения шихты с помощью лазерного профилемера / [Matsusaki Shinroku, e. a.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1983, 69, № 12, P. 728.
28. *Профилемер* на основе лазера / [Inazaki Koji, Nangai Takashi, Fujimori Yasutomo, Kimura Hirokazu] – Toshiba Rev., 1983, 38, № 8. P. 721–724.
29. *Blast furnace burden profile measurement by a giant pulse YAG laser* / [Inazaki Koji, Nangai Takashi, Kusano Yoshiaki, Okuno Yoshio, Fujimori Yasutoho, Kimura Hirokazu] – Iron and Steel Eng., 1984, 61, № 1, 28–34.
30. *Measurement of burden profile in blast furnaces and analysis of measured results* / [Tadaaki Iwamura, Hiroshi Sakimura, Mikio Kondoh, Yuichiro Asano, Keiichi Akimoto, Yunosuke Maki, Tomio Haru, Hiroshi Obata] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1984, 70, № 9. P. 1059–1065.
31. *Разработка* оборудования для определения профиля шихты в доменной печи / [Asaito Yuichirou, e. a.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1980, 66, № 11, 81.
32. *Method and system for determining shape in plane to be determined in atmosphere of scattering materials* / [Yuichiro Asano, Akira Hirahashi, Suehisa Ohga, Tadashi Yabe, Kunio Kurita, Atsushi Momose] – Kawasaki Steel Corp. Пат. 4492472, США. Заявл. 19.07.82, №399847, опубли. 08.01.85. Приор. 27.07.81, №56–117247, Япония. МКИ С 21 В 7/24, НКИ 356/376.
33. *Датчики* для измерения распределения потока газов в доменной печи [Ивамура Тадасаки и др.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1981, 67, № 9, A121–A124.
34. *Метод* определения профиля шихты в доменной печи / [Окумура Кадзуо] – Kawasaki сэйтэцу к. к., Япон. пат., кл. 10 А 524, (С 21 В 7/24), № 52–35603, заявл. 08.04.75, № 50–42576, опубли. 10.09.77.
35. *Procedé et dispositif de détermination en continu du profil des charges dans un haut fourneau.* Bobillon Jean – Paul. [IRSID]. Франц. заявка, кл. С 21 В 7/24, № 2447967, заявл. 31.01.79, № 7902830, опубли. 29.08.80.
36. *Masuy I.M.* Rev. C. N. R. M., 1965. – № 2. – P. 9–17.
37. *Автоматизированная* система контроля профиля шихтовых материалов доменной печи / [Гудовских В. А., Данильченко В. Д.,

- Косарев В. Д., Шамай И. В., Лозовой Л. Н.] – Приборы и системы управления, 1986. – №9. – С. 7–9.
38. *Гольдин М.Л.* Автоматический контроль уровня гамма-лучами / Гольдин М. Л. – Атомиздат, 1963.
39. *Гайдучик В.О.* Контроль профиля поверхности засыпи шихты в доменной печи с помощью отраженного гамма-излучения / Гайдучик В. О. – Сб. трудов ЦНИИЧМ, 1967. – Вып. 55. – С. 124–129.
40. *Пугачев А.В.* Влияние положения воронки засыпи шихты на производительность доменной печи / А. В. Пугачев, Ю. Г. Воронов – Сталь, 1966. – №10. – С. 883–884.
41. *Пугачев А.В.* Радиоизотопная техника в доменном производстве / Пугачев А. В. – М.: Атомиздат, 1969. – 172 с.
42. *Гуденко В.Н.* Определение некоторых параметров поверхности засыпи шихты радиоизотопным измерителем профиля / Гуденко В. Н. – Сталь, 1974. – №8. С. 682–686.
43. *Контроль уровня и профиля засыпи в доменной печи* / [Смоляк В. А., Щербицкий Б. В., Евсеева Н. Т., Василенко В. И.] – Metallurg, 1975. – №2. – С. 11–12.
44. *А.с. 237411 СССР*, G 01 b 15/04. Способ определения рельефа и уровня поверхности / В. Н. Афанасьев, П. Л. Грузин, В. О. Гайдучик (СССР). – № 1005052/26–25; заявл. 30.04.65; опубл. 04.09.72, Бюл. № 26.
45. *А.с. 1065686 СССР*, G 01 B 15/04. Способ определения рельефа и уровня поверхности / А. С. Головченко, Б. Е. Халецкий, М. А. Цейтлин, И. Ш. Туктамышев, В. П. Таран, Г. К. Польшинкин (СССР). – № 3484149/18–28; заявл. 07.07.82; опубл. 07.01.84, Бюл. № 1.
46. *Пухов А.П.* Управление загрузкой доменной печи с использованием радиоизотопного профилера / Пухов А.П., Халецкий Б.Е. – Сталь, 1990. – №8.– С.13–14.
47. *А.с. 1807309 СССР*, G 01 B 15/04. Способ определения рельефа и уровня поверхности материалов / Б. Е. Халецкий, А. П. Пухов, М. А. Цейтлин, В. П. Таран, Г. К. Польшинкин, А. С. Головченко, А. С. Белкин, Н. Х. Маулетов (СССР). – № 4907343/28; заявл. 30.11.90; опубл. 07.04.93, Бюл. № 13.
48. *Злобинский Б.М.* Радиоактивные изотопы в доменном производстве / Злобинский Б. М., Немцов Н. С. – Metallurgizdat, 1963.
49. *Поверхность засыпи шихты и ее связь с параметрами доменной плавки* / [Бадин С. А., Бузоверя М. Т., Воронин Г. Ю., Шулико С. Т.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 1995. – С.77–85.
50. *Анализ результатов эксплуатации профиломеров на доменных печах* / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Шулико С. Т., Семенов Ю. С.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003. – №4. – С. 123–127.
51. *Kusunoki Mitsuhiro.* Микроволновый датчик для измерения уровня шихты в доменной печи / Kusunoki Mitsuhiro – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1981, 67, № 4, P. 16.

52. *Sakimura Hiroshi*. Микроволновый датчик для измерения уровня шихты в доменной печи / Sakimura Hiroshi – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1981, 67, № 4, P. 17.
53. *Анализ средств и результатов измерения профилей поверхности засыпи шихты в доменных печах* / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Шулико С. Т., Семенов Ю. С.] – Новости науки Приднепровья, 2004. – №1. – С. 27–38.
54. *A burden profile meter in blast furnace using a new type of microwave radar* – Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan, 1986.– V. 26. – № 11, P. 1009.
55. *Лакман Х.Г.* Измерение уровня засыпи в доменной печи радарным зондом / Лакман Х. Г., Вишневецки Б. – Черные металлы, 1992. – №3. – С. 22–25.
56. *Radar technology for use in metallurgy* / Metallurgical Plant and Technology, 1991. – № 6. – С. 88.
57. *Sensor and signal quantification for blast furnace gas distribution control* / [Tadaaki Iwamura, Hiroshi Sakimura, Yunosuke Maki, Takanari Kawai, Yuichiro Asano] – Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan, 1982. – V. 22. – № 10, P. 764–773.
58. *Использование системы зондов для измерения распределения шихты в доменной печи* / [Бухвалдер Й., Хунгер Й., Клеппель М., Доброскок В., Данго Р., Кройц Х.-О.] – Черные металлы, 2001. – №5. – С. 22–26.
59. *Hague M.J.* Blast furnace burden level and profile measurements using microwave devices / Hague M. J., Ditcher T. M. – 4- th European Coke and Ironmaking Congress, Paris, 19-21, 2000. – P. 315–320.
60. *Головко В.И.* Научное обоснование и применение микроволновой техники для информационного обеспечения АСУ ТП в металлургии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Днепропетровск, НГУ, 2005. – 473 с.
61. *Основные решения профилометрии засыпи шихты на доменной печи №9 объемом 5000 м<sup>3</sup> ОАО КГМК «Криворожсталь»* / [Гитлин Л. Д., Выбиванец О. А., Шишканов С. Ю., Головко В. И., Дударенко А. А., Михайловский Н. В., Кукушкин О. Н., Радченко В. П., Листопадов В. С., Шеремет В. А.] – Теория и практика металлургии, 2004. – №3–4. – С. 25–29.
62. *Технологические особенности автоматизированного измерения профиля засыпи шихты в доменной печи, оснащенной БЗУ* / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Шулико С. Т., Семенов Ю. С., Листопадов В. С., Орел Г. И.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003. –№2.–С. 112–114.
63. *Состояние и перспективы создания радиолокационных профиломеров для доменных печей* / [Головко В. И., Кукушкин О. Н., Михайловский Н. В., Муравьева И. Г., Тараканов А. К., Тригуб И. Г.] – Сучасні проблеми металургії, Том 3, Матеріали наук.-практ. конференції «Проблеми і перспективи одержання конкурентноздатної продукції в

- гірничо-металургійному комплексі України». НМетАУ, 24–25.10.2000р. – Дніпропетровськ: "Системні технології", 2001. – С. 173–191.
64. *Оценка* изменения профиля засыпи шихты в доменной печи радиолокационным уровнемером / [Большаков В. И., Шулико С. Т., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Листопадов В. С., Дударенко А. А. и др.] – *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2004. – №2. – С.117–121.
65. *Экспресс-оценка* обобщенных показателей рельефа поверхности доменной шихты по показаниям гамма-локатора профиля / [Халецкий Б. Е., Головченко А. С., Цейтлин М. А., Туктамышев И. Ш.] – *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 1983. – №1. – С. 64–65.
66. *А.П. Пухов*, Б.Е. Халецкий. Управление загрузкой доменной печи с использованием радиоизотопного профилемера. – *Сталь*, №8, 1990.– С. 13–14.
67. *Контроль* работы доменной печи с использованием радиоизотопного профилемера / [Шулико С. Т., Воронин Г. Ю., Бузоверя М. Т., Хомяков Э. С.] – *Металл и литье Украины*, 1994. – № 9–10. – С. 6–8.
68. *Integrated Use of Burden Profile Probe and In-Burden Probe for Gas Flow Control in the Blast Furnace* / [F. Bordemann, W.H.Hartig, H.-I.Grisse et al.] – *Ironmaking Conference Proceedings*, 1995. – № 54. – P.259–270.
69. *Эволюция* современного доменного производства и внедрение прогрессивных инженерных решений / [Кармайкл Я., Тирьон К., Гоффин Р. и др.] – *Сталь*, 2006. – №12. – С. 8–14.
70. *Курунов И.Ф.* Новые средства контроля и управления доменным процессом (по материалам 4–го Европейского конгресса по коксохимическому и аглодоменному производству) / Курунов И. Ф. – *Сталь*, 2001. – №8. – С. 58–62.
71. *Друкентанер Г.* Система оптимизации работы доменной печи «VAIRON» – экспертная система / Друкентанер Г., Шюрц Б., Шалер М. – *Черные металлы*, 2000. – №6. – С. 64–72.
72. *The fully automatic blast furnace: only a vision?* / [G. Brunnbauer, B. Rummer, J. Mauhart, H. Nograthig, F. Lasinger, H. Druckenthaner, B. Schürz, M. Schaler, A. Klinger and G. Pillmair] – *Ironmaking Conference Proceedings*, 2001. – №3. – P.677–688.
73. *Инкала П.* Опыт эксплуатации экспертной системы в управлении доменными печами в фирме «Раутаруукки» / Инкала П., Карппинен А., Сеппянен М. – *Сталь*, 1994. – №9. – С. 7–12.
74. *Технологические аспекты* работы доменных печей с БЗУ “Paul Wurth” / [Тахаутдинов Р. С., Ушаков С. Н., Сединкин В. И. и др.] – *Сталь*, 2008. – №11. – С. 15–17.
75. *Экспертные системы* – новый уровень оптимизации работы доменных печей / [Херл Й., Шалер М., Штоль К. и др.] – *Черные металлы*, 2007. – №9. – С. 37–43.

76. Смоляк В.И. Радиоизотопный контроль и автоматика в черной металлургии / В. И. Смоляк, В. И. Василенко. – М.: Атомиздат, 1972. – 119 с.
77. Бабарькин Н.Н. Закономерности распределения материалов на колошнике / Бабарькин Н. Н. – Доменный процесс по новейшим исследованиям. Сборник статей. – М.: Металлургиздат, 1963. – С.84–102.
78. Федулов Ю.В. Механика формирования слоя материалов на колошнике доменной печи / Федулов Ю. В. – Сталь, 1991. – №3. – С. 9–14.
79. Hiroaki Nishio. Analysis on Formation Processes of Burden Distribution in Blast Furnace / Hiroaki Nishio, Tatsuro Ariyama – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1982. – v. 68. – №15. – P. 266–273.
80. Автоматическое управление газодинамическим режимом доменной печи / [Шумилов К. А., Довгаль А. М., Мельничук В. Л., Удовенко К. И.] – М: Металлургия, 1982. – 104 с.
81. Готлиб А.Д. Доменный процесс / Готлиб А.Д. – М.: Металлургия, 1966. – 503 с.
82. Ефименко Г.Г. Металлургия чугуна / Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В. Е. – Киев: Вища школа, 1980. – 499 с.
83. Маханек И.Г. Изменение структуры слоя шихтовых материалов под влиянием потока газов / И. Г. Маханек, О. П. Онорин. – Сталь, 1972, – № 11.–С. 75–77.
84. Большаков В.И. Управление загрузкой и распределением шихты на колошнике и эффективность доменной плавки / Большаков В. И. – Познание процессов доменной плавки: Коллективный труд под редакцией Большакова В. И., Товаровского И. Г. – Днепропетровск: “Пороги”. 2006. – С. 87–109.
85. Фиалков Б.С. Кинетика движения и характер горения кокса в доменной печи / Б. С. Фиалков, В. Т. Плицын. – М.: Металлургия, 1971. – 288 с.
86. Красавцев Н.И. Работа мастера на современной доменной печи / Н. И. Красавцев, М. Я. Остроухов. – Москва, 1949. – 544 с.
87. Доменный процесс по экспериментальным данным / Труды Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина, 1949, – №2 – 346 с.
88. Исследование формирования профиля поверхности засыпи и структуры столба шихты в доменной печи / [Смоляк В. А., Щербицкий Б. В., Евсеева Н. Т., Василенко В. И.] – Сталь, 1974. – №2. – С. 100–103.
89. Логинов В.И. Влияние структуры столба шихтовых материалов на ход доменной плавки / Логинов В. И., Мусиенко К. А., Кучеров В. И. – Сталь, 1986, – № 8. – С. 11–14.
90. Фогельпот Г.Б. Исследование процесса стекания чугуна в доменной печи / Фогельпот Г. Б., Стилл Г., Петерс М. – Черные металлы, 1985, – №8. – С. 21–27.
91. Monitoring of burden distribution with profile-meter for all-coke operation

- of a blast furnace [Haratou Shouichi, e. a.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1981. – V. 67. – № 12. – S. 711.
92. *Ходак Л.З.* О скорости движения шихты в доменной печи / Л. З. Ходак, Ю. И. Борисов. – Сталь, 1971. – №3. – С. 199–203.
93. *Гришкова А.А.* Работа доменной печи в форсированном режиме / А. А. Гришкова, В. М. Клемперт. – Сталь, 1987. – № 9. – С. 17–22.
94. *Hiroaki Nishio.* Influence of gas flow on burden distribution in blast furnace / Hiroaki Nishio, Tatsuro Ariyama – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1980. – V. 66. – P. 98–107.
95. *Клемперт В.М.* Автоматизация доменной печи / Клемперт В. М. – М.: Металлургия, 1965. – 216 с.
96. *Стефанович М.А.* Анализ хода доменного процесса / Стефанович М. А. – Свердловск: Металлургия, 1960. – 286 с.
97. *Пыжов В.Г.* Характер схода шихты в доменной печи / Пыжов В. Г. – Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1984. – №4. – С. 5–9.
98. *Клемперт В.М.* Контроль и управление газораспределением доменной печи/ Клемперт В. М., Френкель М. М., Гришкова А. А. – М.: Металлургия, 1993.–142 с.
99. *Анализ скорости схода шихты в шахте доменной печи* / [Гришкова А. А., Рубинштейн Д. С., Рылов И. А., Френкель М. М.] – Сталь, 1980. – №2. – С. 86–88.
100. *Никитин Г.М.* Формирование вязкопластичной зоны – как способ эффективного управления доменным процессом: диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук: 05.16.02 / Геннадий Михайлович Никитин. – Екатеринбург. – 1996. – 306 с.
101. *Гордон Я.М.* Механика движения столба шихты в доменной печи / Гордон Я. М. – Познание процессов доменной плавки. Под редакцией Большакова В. И., Товаровского И. Г., 2006. – С. 133–139.
102. *Анализ результатов исследований скоростей опускания шихты в доменных печах* / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шулико С. Т.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2006. – Вып. 12. – С. 109–117.
103. *Трекало С.К.* Доменный процесс по новейшим исследованиям. Сборник статей / Трекало С. К. – М.:Металлургиздат, 1963. – С. 175–183.
104. *Половченко И.Г.* Движение шихтовых материалов и газов в доменной печи / Половченко И. Г. – Харьков, 1958. – 162 с.
105. *Половченко И.Г.* Исследование движения поверхности материалов в колошниковой части печи с помощью радиометрического уровнемера / И. Г. Половченко, В. И. Узлюк – Сталь, 1964. – №5. – С. 396–400.
106. *Изучение движения материалов в доменной печи с помощью радиоактивных индикаторов* / [Лукашев Г. Г. и др.] – Сталь, 1958. – №8. – С.682–687.
107. *Павлов М.А.* Металлургия чугуна: Ч.3. Доменная печь.-2-е изд., доп. / Павлов М. А. – М.: Металлургиздат, 1951. – 320 с.
108. *Малахов Г.М.* Теория и практика выпуска руды / Малахов Г. М., Безух В. Р., Петренко П. Д. – М.: Недра, 1968. – 311 с.

109. *Дубынин Н.Г.* Выпуск руды при подземной разработке / Дубынин Н. Г. – М.: Недра, 1965. – 267 с.
110. *Сорокин В.А.* В сб. «Доменное производство» / В. А. Сорокин, Н. Н. Попов – Научные труды металлургического факультета. Донецкий индустриальный институт, 1955. – вып. 4. – С. 130–148.
111. *Максимов Е.В.* Механика движения материалов и газов в шахтных печах / Максимов Е. В., Гордон Я. М., Швыдкий В. С. – Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1989. – 144 с.
112. *Фиалков Б.С.* Влияние расположения зоны горения на работу доменной печи / Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов – Сталь, 1958. – №6. – С. 495–502.
113. *Соколовский В.В.* Статика сыпучей среды / Соколовский В. В. – М.: Физматгиз, 1968. – 276 с.
114. *Механика сыпучих материалов.* Тезисы докладов Всесоюзной конференции. – Одесса: ИТИПП, 1975. – 358 с.
115. *Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем* / [Гордон Я. М., Боковиков Б. А., Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г.] – М.: Металлургия, 1989. – 121 с.
116. *Дружков В.Г.* Очертания осевой зоны малоподвижных материалов и траектории движения составляющих шихты в моделях доменных печей / Дружков В. Г., Ведешкин М. В., Подборных О. М. – Сталь, 1988. – №12. – С.11–15.
117. *Гулыга Д.В.* Изучение движения шихтовых материалов в доменной печи при плавке камышбурунского агломерата / Гулыга Д. В., Горбачев Я. С., Черепивский А. А. – Сталь, 1963. – № 8. – С. 686–689.
118. *Фиалков Б.С.* О скорости выхода сыпучих материалов из отверстия и форме зоны разрыхления / Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов – Известия вузов. Черная металлургия, 1960. – № 12. – С. 17–22.
119. *Определение углов откоса поверхности засыпи шихтовых материалов в доменной печи* / [Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шулико С. Т., Шумельчик Е. И.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2007. – Вып. 14. – С. 40–50.
120. *Оценка положения центра воронки поверхности засыпи шихты относительно оси печи* / [Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Шулико С. Т.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2006. – №2. – С. 106–111.
121. *Петерс К.Х.* Исследование причин нарушения газопроницаемости в доменной печи / Петерс К. Х., Пот Г., Петерс М. – Черные металлы, 1986. – №22. – С. 10–20.
122. *Повышение производительности доменных печей* / [В. Хартиг, К. Лангнер, Г. Б. Люнген, К. П. Штрикер] – Черные металлы, 1996. – №12. – С. 17–25.
123. *Регулирование газового потока в доменной печи с использованием измерителя профиля засыпи и горизонтального зонда в столбе шихты* / [F. Bordemann, W. H. Hartig, H.-I. Grisse, e. a.] – Новости черной металлургии, 1996. – №4. – С. 35–40.

124. *Радиолокационный контроль металлургических процессов* / [В. И. Головки, О. Н. Кукушкин, Н. В. Михайловский, А. В. Потапов, В. В. Смоктий, А. Ф. Хасянов] – Днепропетровск, 2010. – 388 с.
125. *Головки В.И.* Радарный контроль распределения шихты на колошнике доменной печи / Головки В. И. – Контроль и автоматизация доменной плавки. Труды V Международного конгресса доменщиков. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 425–428.
126. *Большаков В.И.* Оценка информации, полученной стационарным профилемером / Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С. – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2008. – Вып. 16. – С. 372–379.
127. *Декларационный пат.* на полезную модель Украина, UA 9308U 7C21B7/00. Способ определения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике доменной печи / В. А. Шеремет, В. С. Листопад, В. И. Большаков, С. Т. Шулико, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов. / Бюл., № 9, 2005. Заявл. 17.03.05. Опубл. 15.09.05.
128. *Методика* определения скоростей опускания шихты по сечению колошника в доменной печи / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шулико С. Т., Шумельчик Е. И.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2008. – №2. – С. 114–118.
129. *Оценка* формирования слоев шихты на колошнике доменной печи с помощью радиолокационного профилемера / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шулико С. Т.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2006. – №3. – С. 5–10.
130. *Метод* определения объема вытесненного кокса при выгрузке на него железосодержащих компонентов шихты / [Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шутылев Ф. М., Шумельчик Е. И., Шулико С. Т., Богачев Ю. А.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2009. – Вып. 19. – С. 80–89.
131. *Большаков В.И.* Новые металлургические технологии и научно-технические разработки Института черной металлургии в 2007 году / Большаков В. И., Жучков С. М., Муравьева И. Г. – Труды IV Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании». Том 1. Варна, Болгария, 2008. – С. 14–28.
132. *Оценка* окружного распределения шихты в доменной печи радиолокационным профилемером / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шулико С. Т.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», Вып. 17, 2008. – С. 74–85.
133. *Семенов Ю.С.* Совершенствование управления доменной плавкой на основе контроля поверхности засыпи шихты: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.16.02 / Юрий Станиславович Семенов. – Днепропетровск. – 2009. – 192 с.
134. *Технологические* особенности выдувки доменных печей при остановке на капитальный ремонт / [Большаков В. И., Можаренко Н. М., Муравьева И. Г., Голубых Г. Н.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», Вып. 19, 2009. – С. 40–49.



135. *Выдувка* доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> на капитальный ремонт 1-го разряда / [Можаренко Н. М., Шулико С. Т., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Орел Г. И., Листопадов В. С., Дмитренко К. А.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2004. – Вып. 8. – С. 130–138.
136. *Большаков В.И.* Оценка перераспределения слоя кокса после выгрузки на него рудной порции / В. И. Большаков, В. И. Вишняков – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2007. – Вып. 14. – С. 60–73.
137. *Application of simulation model for burden distribution to actual operations* / [Y. Kajiwara, T. Jimbo, A. Kometani, Y. Shimoda] – Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan, 1984. – №5. – P. 378–386.
138. *Развитие* математической модели распределения под действием нагрузки с разрушением слоя кокса / [Камисака Е., Окуно Т., Ирита Т., Мацузаки С., Исояма Т., Кунитомо К.] – Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan, 1984. – №24. – P. 327.
139. *Влияние* явления обрушения слоя кокса на распределение шихты на колошнике доменной печи / [Окуно Е., Кунитомо К., Ирита Т., Мацузаки С.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1986. – Т. 72.–№7.–С. 75–82.
140. *Development of Mathematical Model to Estimate Burden Distribution in Bell-less Charging for Blast Furnace* / [Okuno Y., Matsuzaki S., Kunitomo K., Isoyama M., Kusano Y.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1987. – Т. 73. – №1. – P. 91–98.
141. *Волков Ю.П.* Технолог-доменщик / Волков Ю. П., Шпарбер Л. Я., Гусаров А. К. – М.: Металлургия, 1986. – 121 с.
142. *Полтавец В.В.* Доменное производство / Полтавец В. В. – М.: Металлургия, 1972. – 139 с.
143. *Богдашкин Н.Н.* Феноменологические модели и нелинейная динамика металлургических процессов / Н. Н. Богдашкин, С. А. Дубровский. – Липецк: ЛГТУ, 2003. – 151 с.
144. *Особенности* выбора рабочих углов наклона распределительного лотка БЗУ с использованием информации профилемера / [Большаков В. И., Лебедь В. В., Семенов Ю. С., Шулико С. Т.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2008. – № 3. – С. 4–9.
145. *Модель* радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, оборудованной БЗУ / [Большаков В. И., Семенов Ю. С., Лебедь В. В., Шумельчик Е. И., Вишняков В. И.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2011. – Вып. 23. – С. 52–62.
146. *Семенов Ю.С.* Исследование формирования поверхности засыпи шихтовых материалов / Ю. С. Семенов – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2011. – Вып. 24. – С. 59–69.

147. *Исследование* движения шихтовых материалов в шахте доменной печи. / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С. Шулико С. Т.] – Металлург, 2010. – № 8. – С. 65–70.
148. *Современные методы* сбережения энергии в доменном производстве [Ковшов В. Н., Бочка В. В., Сулименко Е. И., Петренко В. А.] / Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2008. – №16. – С. 177–186.
149. *Любан А.Н.* Анализ явлений доменного процесса / Любан А. Н. – Металлургиздат, 1955. – 47 с.
150. *Гиммельфарб А.А.* Автоматическое управление доменным процессом / А. А. Гиммельфарб, Г. Г. Ефименко – Металлургия, 1969. – 309 с.
151. *Похвиснев А.Н.* О критерии теплового состояния горна в связи с вопросом регулирования теплового состояния доменной печи / А. Н. Похвиснев, И. Ф. Курунов. – Сталь, 1966. – №4. – С. 300–303.
152. *Нестационарные* процессы и повышение эффективности доменной плавки / [Овчинников Ю. Н., Мойкин В. И., Спиринов Н. А., Боковиков Б. А.] – Челябинск: Металлургия, 1989. – 120 с.
153. *Контроль* теплового состояния горна доменной печи по теплосъему на фурмах / [Дик М. И, Товаровский И. Г., Гусев А. Ю. и др.] – Металл и литье Украины, 1995. – № 11–12. – С. 26–27.
154. *Фазовые превращения* материалов в доменной печи / [Балон И. Д., Буклан И. З., Муравьев В. Н., Никулин Ю. Ф.]–М.: Металлургия, 1984.– 152с.
155. *Металлургия* чугуна: Учебник для вузов. 3–е изд. перераб. и доп. / Под редакцией Ю. С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
156. *Жеребин Б.Н.* Практика ведения доменной печи / Жеребин Б. Н. – М.: Металлургия, 1980. – 248 с.
157. *А.с. СССР 827545.* Способ ведения доменной плавки / Некрасов З. И., Бузоверя М. Т., Хомич И. Т. / Опубликовано 07.05.81, бюллетень №17.
158. *Бузоверя М.Т.* Влияние повышенного давления колошниковога газа на работу горна доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> / Бузоверя М. Т., Шулико С. Т., Попов В. Н. – Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Вып. 5. К.: Наукова думка, 1986. – С.36–39.
159. *Работа* доменной печи с рациональным газодинамическим режимом в шахте / [Бузоверя М. Т., Ульянов А. Г., Почакайло Н. Е. и др.] / Бюл. “Черная металлургия”, 1985. – № 12. – С.47–48.
160. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Монография. 2-е издание / Товаровский И. Г. – Днепропетровск: изд. «Пороги», 2009. – 768 с.
161. *Некоторые* особенности работы доменной печи при повышении интенсивности плавки / [Бочка В. В., Иващенко В. П., Ковшов В. Н., Сулименко Е. И., Куприков Р. А.] – Новини науки Придніпров’я, збірка наукових доповідей до науково-практичної конференції, присвяченої 100-річчю Г. А. Воловіка, 2010. – С. 50–53.

162. *Бочка В.В.* Некоторые особенности влияния интенсивности плавки на показатели работы доменных печей / Бочка В. В. – Сталь, 1999. – №3. – С. 4–7.
163. *Рамм А.Н.* О влиянии интенсивности плавки на производительность доменных печей и относительный расход кокса / Рамм А.Н. – Сб. Исследование доменного процесса, АН СССР-М: Изд. АН СССР, 1957. – С.85–87.
164. *Патент UA 93975 C2* на изобретение. Способ ведения доменной плавки / Большаков В. И., Шулико С. Т., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Листопадов В. С., Дмитренко К. А., Пинчук Д. В. – заявл. 06.04.10; опубл. 25.03.11, Бюл. № 6, 2011 г.
165. *Метод оперативной оценки распределения материалов в зонах сечения колошника на основе данных профилемера* / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шутылев Ф. М.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2010. – Вып. 20. – С. 45–52.
166. *Муравьева И.Г.* Развитие научных основ совершенствования технологии доменной плавки с использованием стационарных систем контроля поверхности засыпи шихты: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.02 / И. Г. Муравьева. – Днепропетровск. – 2010. – 386 с.
167. *Эффективная загрузка дополнительного кокса для регулирования теплового состояния горна доменной печи* / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2013. – Вып. 27.
168. *Большаков В.И.* Теория и практика загрузки доменных печей / Большаков В. И. – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.
169. *Грузинов В.К.* Управление газовым потоком в доменной печи программной загрузкой / Грузинов В. К. – Свердловск: Металлургиздат, 1960. – 216 с.
170. *Тарасов В.П.* Газодинамика доменного процесса / Тарасов В. П. – М.: Металлургия, изд.1, 1982. – 224 с.; изд.2, 1990. – 258с.
171. *Пути улучшения распределения дутья в доменной печи* / [Большаков В. И., Шулико С. Т., Шутылев Ф. М. и др.] – Сталь, 2006. – №5. – С. 11–14.
172. *Большаков В.И.* Рациональный режим работы вращающегося распределителя шихты бесконусного загрузочного устройства / В. И. Большаков, Ф. М. Шутылев – Сталь, 1993. – №3. – С. 17–20.
173. *АСУ тепловыми и газодинамическими режимами доменной плавки* / [Шумилов К. А., Богаенко И. М. и др.] – К.: Техника, 2000. – 228 с.
174. *Большаков В.И.* Исследование неравномерности окружного распределения материалов в доменной печи лотковым распределителем / В. И. Большаков, Н. А. Рослик – Металлургическая и горнорудная промышленность, 1997.–№1.–С.10–12.

175. *Большаков В.И.* Управление окружным распределением в доменной печи / Большаков В. И., Богачев Ю. А., БузOVERЯ М. Т. – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии» – К.: Наук. думка, 1999. – Вып. 3. – С. 58–63.
176. *Ковшов В.Н.* Исследование окружного распределения шихты бесконусным засыпным устройством с вращающимся лотком / Ковшов В. Н., Чистяков В. Г., Зозуля Г. С. – Металлургия и коксохимия. – К.: Техника, 1979. – № 62. – С. 34–37.
177. *Сторожик Д.А.* О критериях оценки окружного распределения шихты / Сторожик Д. А., Зозуля Г. С., Сергиенко В. Д. – Металлургия и коксохимия. – К.: Техника, 1978. – № 59. – С. 34–38.
178. *Исследование* распределения дутья в доменной печи большого объема / [Большаков В. И., Шулико С. Т., Канаев В. В. и др.] – Сталь, 1999.–№ 12. – С. 5–8.
179. *Большаков В.И.* Оценка распределения шихты ротором при загрузке доменной печи перед задувкой / Большаков В. И. – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2000. – №1. – С. 68–72.
180. *Распределение* дутья по окружности в доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> при ее работе и выдувке / [Большаков В. И., Шулико С. Т., Лебедь В. В., Семенов Ю. С., Дмитренко К. А., Попов В. Н.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2005. – №2. – С. 10–13.
181. *Большаков В.И.* Взаимосвязь распределения шихты и дутья в доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> / Большаков В. И., Шулико С. Т., Листопадов В. С. – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003. – №6. – С. 3–8.
182. *Comparative Analysis of the Burden Distribution Patterns as Executed by Charging of various Designs* / [B. M. Boranbaev, V. I. Bol'shakov, A. V. Koshel-nikov, P. Yu. Kadochnikov] – ISS Tech, 2003. Conference Proceedings, Indian-apolis, Publ. of the Iron and Steel Society. – 2003. – P. 131–139.
183. *Галаганов А.И.* Исследование изменения окружной неравномерности распределения шихты при загрузке в доменную печь / Галаганов А. И. – Металлургия и коксохимия. – К.: Техника, 1979. – № 62. – С. 37–41.
184. *Влияние* равномерного распределения гранулометрического состава шихты по окружности колошника на работу доменной печи / [Коробов И. И., Ковшов В. Н., Котов К. И., Васюченко А. И., Ровенский М. И.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 1968. – № 5. – С. 1–4.
185. *Распределение* шихты и газового потока в доменной печи большого объема / [Большаков В. И., Варивода И. Е., Шулико С. Т., Шутылев Ф. М., Васинев Г. К.] – Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства. Материалы первой Международной науч.-техн. конференции – Череповец: ЧГУ, 1998. – С. 15–18.

186. *Шумилов К.А.* Контроль и управление процессами по окружности доменной печи / Шумилов К. А. – Познание процессов доменной плавки: Коллективный труд под редакцией Большакова В. И., Товаровского И. Г. – Днепропетровск: “Пороги”. 2006. – С. 344–365.
187. *Патент UA 88848 C2* на изобретение. Способ управления окружным распределением шихтовых материалов на колошнике доменной печи / Большаков В. И., Шутылев Ф. М., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С. – заявл. 29.09.08; опубл. 25.11.09, Бюл. № 22, 2009 г.
188. *Аналитические* исследования положения пластичной зоны и связи ее параметров с поверхностью засыпи шихтовых материалов в доменной печи / [Большаков В. И., Товаровский И. Г., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С.] – Теория и практика металлургии, 2011. – Вып. 1-2. – С. 3–8.
189. *Теплотехника* доменного процесса / [Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Суханов Е. Л., Овчинников Ю. Н., Швыдкий В. С.] – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
190. *Гуденау Г.В.* Влияние пластичной зоны на распределение газового потока в доменной печи / Гуденау Г. В., Крайбих К., Номия Е. – Черные металлы, 1979. – № 22. – С. 7–13.
191. *Метод* оперативного контроля положения пластичной зоны в доменной печи / [Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Гладков Н. А., Белошапка Е. А., Наследов А. В.] – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2011. – № 8. – С. 38–44.
192. *The extent of Raceway in a Blast Furnace and its Dependence on Combined Blast Parameters* / [Parshakov V. M., Fedotov P. B., Shkylar F. R., Golubkov O. L.] – International Blast Furnace Hearth and Raceway Symposium. Newcastle, Australia, 1981. – P. 5–1 – 5–4.
193. *Influence of ore to coke ratio distribution on descending and melting behavior of burden in the blast furnace* / [Ichida M, Nishihara K, Tamura K, Sugata M, Ono H.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1991. – v.77. – №.10. – P. 79–86.
194. *Иберла К.* Факторный анализ. Пер. с нем. В. М. Ивановой. – М. Статистика. – 1980. – 399 с.
195. *Факторный* анализ влияния технологических условий на положение пластичной зоны в доменной печи / [Муравьева И. Г., Тогобицкая Д. Н., Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И., Белошапка Е. А.] – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2011. – № 9. – С. 20–24.
196. *Патент UA 99056 C2* на изобретение. Способ прогнозирования содержания кремния в чугуна / Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И., Пинчук Д. В. – заявл. 18.04.11; опубл. 10.07.12, Бюл. № 13, 2012 г.
197. *Гуденау Г.В.* Оптимизация профиля пластичной зоны доменной печи / Гуденау Г. В., Крайбих К., Петерс К. Х. – Черные металлы, 1981. – №3. – С. 13–18.

198. Гуденау Г.В. Влияние пластичной зоны на газопроницаемость столба шихты в доменной печи / Гуденау Г. В., Крайбих К., Номия Е. – Черные металлы, 1980. – №25/26. – С. 7–14.
199. *Gudonau H.W.* On the Cohesive Zone Phenomene in the Blast Furnace / Н. W. Gudonau, К. Kreibich – Scandinavion journal of Metallurge, 1982. – 11. – P.107–114.
200. Гуденау Г.В. Физические условия в области пластической зоны доменной печи. Часть 1. Основные принципы модели / Гуденау Г. В., Стендиш Н., Герлах В. – Черные металлы, 1992. – №8. – С. 34–41.
201. *А.с. СССР 1638172.* Способ определения положения зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов в доменной печи / Никитин Г. М., Захаров А. Г., Иванцов В. И. и др. Опубл. 30.03.91, Бюл. №12.
202. *Определение* границ пластичной зоны в доменной печи / [Большаков В. И., Гладков Н. А., Муравьев И. Г., Белошапка Е. А.] – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2006. – № 12. – С. 29–33.
203. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс / Рамм А. Н. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
204. *О возможности* математического описания распределения газа в доменной печи с целью экономии топлива / [Ковшов В. Н., Бочка В. В., Сулименко Е. И., Петренко В. А.] – Металл и литее Украины, 2006. – №5. – С. 17–20.
205. *Роль* структуры столба шихты в достижении высокой эффективности доменной плавки. / [Большаков В. И., Гладков Н. А., Шутылев Ф. М., Муравьева И. Г.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2002. – Вып. 5. – С. 27–38.
206. *Структура* нижней части столба шихты и роль ее элементов в организации процессов плавки / [Большаков В. И., Гладков Н. А., Муравьева И. Г., Шулико С. Т., Лебедь В. В.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2004. – Вып. 8. – С. 113–120.
207. *Нисио Х.* Значение тотермана в доменной печи / Нисио Х., Венцель В., Гуденау Г. В. – Черные металлы, 1977.– №8. – С.9–15.
208. *Лялюк В.П.* Влияние процессов в фурменных очагах на ход доменной плавки / Лялюк В. П. – Познание процессов доменной плавки. Днепропетровск, Пороги, 2006. – С. 277–295.
209. *Критерий* режима загрузки доменной печи / [Большаков В. И., Гладков Н. А., Шутылев Ф. М., Шулико С. Т.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2001. – №6. – С. 1–4.
210. *Дружков В.Г.* Особенности характера схода материалов и очертание зоны когезии в доменных печах различного объема / Дружков В. Г., Сысоев Н. П., Павлов А. В. – Труды V международного конгресса доменщиков, Дн-ск – Кривой Рог, 7-12 июня, 1999 г. – Пороги, 1999. – С. 266–269.

211. *Физические* параметры пластичной зоны, определенные на охлажденной азотом доменной печи / [Гуденау Х. В., Линднер К.-Х., Герлах В., Коэрфер М.] – Черные металлы, 1987. – №17. – С. 31–36.
212. *Моделирование* опускания шихты в сухой зоне доменной печи / [Большаков В. И., Гладков Н. А., Шутылев Ф. М., Муравьева И. Г., Белошапка Е. А.] – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2004. – № 8. – С. 31–34.
213. *Металлургия* чугуна / [Вегман Е. Ф., Жеребин Б. Н., Похвиснев А. Н. и др.] – М.: Металлургия, 1989. – 512 с.
214. *Тараканов А.К.* Математическое моделирование скоростей опускания шихты по радиусу доменной печи / Тараканов А. К., Дугинец Е. Ф., Томасик Ц. Э. – Металлургия и коксохимия, вып. 95. Киев: Техника, 1988.–С. 103–107.
215. *Борц Ю.М.* Контроль и управление зоной плавления в доменных печах / Ю. М. Борц, Ю. В. Серов – Бюллетень. Черная металлургия, 1988. – №13. – С.18–32.
216. *Хосидэ Й.* Совершенствование технологии доменной плавки в Японии / Хосидэ Й., Такаги С., Юономура А. – Черные металлы, 1980, №25 –26.–С. 3–7.
217. *Опыт* эксплуатации оптимизированной системы управления процессом доменной плавки в Швельгерне / [Петерс К. Х, Альтпетер В., Бахховен Г. Ю., Гюнтер Г., Крайбих К. Х.] – Черные металлы, 1984. – №14. – С. 27–30.
218. *Шюрман Э.* Динамическое изменение формы и положения пластичной зоны в доменной печи / Шюрман Э., Гуденау Г. В., Петерс К. Х. – Черные металлы, 1982. – № 15–16. – С. 17–20.
219. *Шюрман Э.* Исследование пластичной зоны на доменной печи завода в Швельгерне / Шюрман Э., Гуденау Г. В., Петерс К. Х. – Черные металлы, 1982. – №6-7. – С. 9–14.
220. *Инада С.* Разработка и применение математической модели пластичной зоны доменной печи / Инада С., Кабаяси И., Исабэ М. – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1984. – Т. 34. – №4. – С. 59–64.
221. *Непрерывное* определение профиля зоны когезии в доменной печи / [С. Хатига, Р. Оно, К. Фусэ и др.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1986. – Т. 36. – №3. – С. 77–80.
222. *Федоров И.П.* Автоматизированная система прогнозирования зоны вязкопластического состояния в доменной печи / Федоров И. П., Никитин Л. Д., Бугаев С. Ф. – Металлург, 2006. – №2. – С. 32–34.
223. *Vecehida G.* Amelioration realisees pour la deuxieme campagne du haut fourneau 5 de Tarente / G.Vecehida, M. Giuli – Revue de Metallurgie – CIT, 1984. – v. 81. – №5. – P. 369–383.
224. *Betriebsverfahren* mit dem Prozedsteuerungs und Optimierungssystem für den Hochofen Schweigern / [К.Н. Peters, W. Alpeter, Н.У. Bachhofen et al] – Stahl and Eisen, 1984. – Bd. 104. – № 14. – С. 59–62.

225. *Development of monitoring system for lumpy and cohesive zones in the blast furnace* / [T Yamamoto, T. Shokyu, H. Kanoshima et al] – Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1982. – № 10. – P. 774.
226. *Кувабара М.* Оценка формы зоны размягчения и оплавления в доменной печи с помощью математической модели / Кувабара М. – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1981. – Т. 67. – №12. – С. 752.
227. *Kyle I.* Blast furnace model development and application in the British Steel Corp. / Kyle I. – Proceeding Conference September 11–13, 1979. London, 1980. – P. 403–415.
228. *Schmelzlinienbestimmungsmodell zur vergleichenden Leistungsbeurteilung von Hochofenperioden* / [K. Kreibich, Aachen, Yotaro Ohno et.ctr.] – Arch Eisenhüttenwes 53, 1982. – № 1. – P. 21–28.
229. *Investigation of Mely-down of Softening-Melting Zone in Blast Furnace* / [Y. Tagino, M. Sugata, I. Abe et.ctr.] – Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1979. – v. 65. – P. 28–35.
230. *Phenomena in a Blast Furnace Operated at Extremely Low Fuel Rate* / [S. Kafikawa, R. Yamamoto and all] – Transaction ISI fop, 1983. – v. 23. – № 9. – P. 738–745.
231. *Системный подход к процессам в фурменной зоне доменной печи. Становление и развитие* / [Абраменков Ю. А., Байбуз А. Г., Бородулин А. В., Чайка А. Л., Цыганков Г. Т.] – *Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов.* – Днепропетровск, 2000. – С. 3 – 20.
232. *Аналитические исследования процессов в фурменной зоне и их применение* / [Чайка А. Л., Ручаевский А. Л., Васильев А. П., Бородулин А. В., Байбуз А. Г.] – *Черные металлы*, 2003. – №12. – С. 8–13.
233. *Информационные системы в металлургии* / [Спирин Н. А., Ипатов Ю. В., Лобанов В. И. и др.] – Екатеринбург: Уральский государственный технический университет. – УПИ, 2001. – 617 с.
234. *Особенности газодинамического режима работы доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup>* / [Тараканов А. К., Ефименко Г. Г., Гринштейн Н. Ш. и др.] – Изв. АН СССР, Металлы, 1982. – №5. – С. 33–37.
235. *Похвиснев А.Н.* Анализ работы доменных печей при критических гидравлических условиях. Сб. Подготовка доменного сырья к плавке / А. Н. Похвиснев, В. М. Клемперт – Lxxix, Металлургия, 1971. – С.111–117.
236. *Кропотов В.К.* Определение давления шихты на жидкие продукты плавки и оптимального режима выпусков. Сб. Производство чугуна / В. К. Кропотов, Г. В. Монетов – МГМИ, 1978. – вып.4. – С.108–113.
237. *Колесанов Ф.Ф.* Движение газов через слой кусковых материалов / Колесанов Ф. Ф. – М. Metallurgizdat, 1956. – 88 с.
238. *Тарасов В.П.* Исследование газодинамики верхних вертикальных зон доменной печи. Сб. Производство чугуна / Тарасов В. П. – МГМИ, 1980. – С.56–65.



239. *Ковшов В.Н.* Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи / В. Н. Ковшов, В. А. Петренко – Институт технологии. Днепропетровск, 1996. – 124 с.
240. *Богданди Л.* Восстановление железных руд / Л. Богданди, Г. Ю. Янгель – М. Metallurgia, 1971. – 520 с.
241. *Исследование порозности многокомпонентной шихты* / [Ковшов В. Н., Галаганов А. И., Чистяков В. Т. и др.] – Сб. *Металлургия чугуна. Metallurgia и коксохимия. Техника*, 1997. – вып. 53. – С.34–37.
242. *Чукин В.В.* Порозность и сопротивление подвижного слоя / В. В. Чукин, Р. Ф. Кузнецов – *Теплотехника подготовки металлургического сырья* – М., 1969. – вып. 16. – С. 60–66.
243. *Греков П.Н.* Об определяющем размере слоя кусковых материалов и величине, характеризующей скорость движения газа в слое / Греков П. Н. – Изв. ВУЗовЧМ, 1963. – № 12. – С. 21–27.
244. *Исследование газодинамики доменного процесса с использованием гелия* / [Копырин И. А., Остроухов М. Я., Белый Л. А. и др.] – Изв. АН СССР, *Металлургия и топливо*, 1962. – №5. – С.22–28.
245. *Исследование распределения скоростей газа в доменных печах ММК* / [Овчинников Ю. Н., Яковлев Ю. В. и др.] – *Сталь*, 1978. – №5. – С. 391–395.
246. *Похвиснев А.Н.* Теоретический расчет порозности шихты и горизонта шлакообразования в доменной печи / А. Н. Похвиснев, В. М. Клемперт – Изв. АН СССР, *Металлы*, 1971. – № 3. – С. 14–17.
247. *Kajiwara J.* Development of Simulation Model for Burden Distribution of Blast Furnace Top / Kajiwara J., Jimbo T., Sakai T. – Tr. ISS Jap., 1983. – v.23. – № 12. – P. 1045–1052.
248. *Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии.* Справочник / [Бабошин В. М., Кричевцов Е. А., Абзалов В. М., Щелоков Я. М.] – М. *Металлургия*, 1982. – 152 с.
249. *Ковшов В.И.* Моделирование доменного процесса / Ковшов В. И., Петренко В. А., Верещак В. И. – Институт технологии. Днепропетровск, 1997. – 109 с.
250. *Тлеугабулов С.М.* Оценка порозности смеси и степени разрыхления движущегося слоя / Тлеугабулов С. М. – *Металлургия черных металлов.* Казахс. ПИ, Алма-Ата, 1979. – С. 6–9.
251. *Курунов И.Ф.* Оценка производительности и интенсивности хода доменных печей различного объема / Курунов И. Ф. – Изв. ВУЗов ЧМ, 1991. – №5. – С. 12–14.
252. *Радешток Ю.* Газодинамические условия в доменной печи / Ю. Радешток, Р. Ешар – *Черные металлы*, 1970. – №22. – С. 60–66.
253. *Бепплер Э.* Факторы, влияющие на радиальное распределение потоков газов в доменной печи, их значение для хода печи / Бепплер Э., Ковальски В., Петерс М. – *Черные металлы*, 1993. – № 11. – С. 49–59.
254. *Исследование газодинамики столба шихты в доменной печи* / [Большаков В. И., Гладков Н. А., Муравьева И. Г., Белошарпа Е. А.] – *Известия ВУЗов. Черная металлургия*, 2007. – № 7. – С. 9–15.

255. *Энгель К.* Газопроницаемость столба шихты в доменной печи при использовании агломерата и окатышей / Энгель К., Майер З., Польтир К. – Черные металлы, 1984. – №1. – С. 3–10.
256. *Стефанович М.А.* Влияние давления на движение газов в доменной печи / Стефанович М. А. – Сталь, 1955. – № 5. – С.398–407.
257. *Гуденау Г.В.* Модель для исследования газопроницаемости столба шихты с пластичной зоной и без нее / Гуденау Г. В., Крайбих К., Номия Е. – Черные металлы, 1980. – № 9. – С. 21–26.
258. *Тарасов В.П.* Влияние соотношения кокс-рудная часть шихты и конфигурации их распределения на порозность зоны плавления / Тарасов В. П., Быков Л. В., Тарасов П. В. – Сталь, 2008. – №9. – С. 6–9.
259. *Стабилизация* шлакового режима доменной плавки в условиях работы ДП №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» на многокомпонентной шихте / [Листопадов В. С., Тогобицкая Д. Н., Муравьева И. Г., Gladkov N. A., Хамхотько А. Ф., Белькова А. И.] – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2008. – № 8. – С. 14–19.
260. *Система* контроля разгара футеровки металлоприемника и формирования продуктов плавки в доменных печах КГГМК "Криворожсталь" / [Можаренко Н. М., Тогобицкая Д. Н., Панчоха Г. В., Орел Г. И., Костенко Г. П., Листопадов В. С., Дубинчук В. Л.] – Теория и практика производства чугуна: Сб. тр. Международной научно-технич. конференции. Кривой Рог, 2004. – С.511–514.
261. *Совершенствование* шлакового режима доменной плавки в сырьевых условиях КГГМК «Криворожсталь» / [Оторвин П. И., Тогобицкая Д. Н., Белькова А. И., Можаренко Н. М.] – Сталь, 2004. – №6. – С.24–28.
262. *Характеристика* жидких продуктов плавки и показатели их формирования из многокомпонентной шихты / [Тогобицкая Д. Н., Gladkov N. A., Муравьева И. Г., Листопадов В. С., Дмитренко К. А.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2007. – Вып. 14. – С. 102–112.
263. *Творческое* сотрудничество ученых ИЧМ и специалистов «Криворожстали» в развитии доменного производства / [Большаков В. И., Шеремет В. А., Муравьева И. Г., Листопадов В. С.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», Вып. 16, 2008. – С. 45–56.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
<b>ГЛАВА 1</b>	
<b>АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ПРОФИЛЕМЕРОВ, РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ НА КОЛОШНИКЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ, А ТАКЖЕ ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОФИЛЕМЕРОВ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ</b>	
	6
1.1 Средства измерения профиля поверхности засыпи шихты в доменной печи	6
1.2 Анализ опыта использования профиломеров для совершенствования технологии доменной плавки	17
1.3 Результаты исследований с помощью профиломеров параметров поверхности засыпи шихты на колошнике доменной печи и особенности их представления	19
1.4 Анализ результатов исследований скоростей опускания шихты на колошнике доменных печей	24
1.5 Исследование движения шихтовых материалов в шахте доменной печи	30
<b>ГЛАВА 2</b>	
<b>ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ И ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВКИ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЗАСЫПИ НА КОЛОШНИКЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ</b>	
	38
2.1 Представление информации о параметрах профиля поверхности засыпи шихты на колошнике доменной печи	38
2.2 Требования к установке систем измерения профиля поверхности засыпи	44
2.2.1 Особенности установки систем на колошнике доменной печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством	44

<b>2.2.2</b>	Особенности установки систем на колошнике доменной печи, оборудованной конусным загрузочным устройством	51
<b>2.2.3</b>	Особенности определения расстояний до поверхности шихты при выдувке печи	57
<b>2.2.4</b>	Контроль уровня засыпи шихтовых материалов при загрузке задувочной шихты	64

### **ГЛАВА 3**

#### **МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ**

<b>3.1</b>	Метод определения профиля поверхности засыпи шихты по измеряемым радиусам сечения колошника печи	66
<b>3.2</b>	Определение углов наклона поверхности шихтовых материалов	70
<b>3.3</b>	Определение глубины и смещения осевой воронки	72
<b>3.4</b>	Метод определения формы, высоты слоев выгруженных порций шихты по измеряемым радиусам колошника и их отношений	73
<b>3.5</b>	Метод определения объема вытесненного кокса при выгрузке на него железосодержащих компонентов шихты с использованием информации о поверхности засыпи	75
<b>3.6</b>	Метод определения скоростей опускания поверхности шихтовых материалов	86
<b>3.6.1</b>	Разработка способа определения скоростей опускания шихтовых материалов по радиусу колошника	86
<b>3.6.2</b>	Обоснование временного интервала расчета скоростей опускания шихтовых материалов	91
<b>3.7</b>	Изменение параметров поверхности засыпи шихты по окружности печи	105

### **ГЛАВА 4**

#### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ**

<b>4.1</b>	Влияние программ загрузки шихтовых материалов и углов наклона лоткового распределителя на формирование профиля поверхности засыпи и скоростей опускания шихты	108
------------	---	-----

4.2	Использование информации радиолокационной системы измерения поверхности засыпи шихты для адаптации математических моделей распределения шихты на колошнике доменной печи	120
4.2.1	Определение углов откоса шихтовых материалов на колошнике доменной печи с помощью радиолокационного профилемера	120
4.2.2	Исследование формирования поверхности засыпи во время выгрузки порций шихтовых материалов	123

## ГЛАВА 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШАХТЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

5.1	Исследование изменения скоростей опускания поверхности шихтовых материалов по диаметрам печи от уровня колошника до верхнего горизонта шахты	130
5.2	Исследование характера опускания шихтовых материалов в доменной печи от верхнего горизонта шахты до распара при ее выдувке	137
5.3	Исследование характера опускания шихтовых материалов по окружности печи на уровне колошника и верхнего горизонта шахты	143

## ГЛАВА 6

### РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗА ХОДА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ПРОФИЛЕМЕРА

6.1	Установление взаимосвязи скоростей опускания шихты с содержанием кремния в чугуна. Разработка метода прогнозирования содержания кремния в чугуна и его последующее усовершенствование	148
6.2	Метод оценки газодинамического режима плавки с использованием информации радиолокационного профилемера	165
6.2.1	Способ оценки стабильности опускания шихты на колошнике печи	165

6.2.2	Оценка взаимосвязи газодинамического режима плавки и коэффициентов неустойчивости опускания поверхности шихты на колошнике доменной печи	169
6.3	Выбор метода оперативной оценки распределения материалов в зонах сечения колошника на основе данных профилемера	176
6.4	Оценка возможностей управления ходом доменной печи с использованием информации профилемера	183
6.5	Использование информации профилемера для эффективной загрузки дополнительного кокса при регулировании теплового состояния горна доменной печи	201

## **ГЛАВА 7**

### **УПРАВЛЕНИЕ ОКРУЖНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КОЛОШНИКЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОФИЛЕМЕРА**

7.1	Приемы управления окружным распределением шихтовых материалов в доменных печах	207
7.2	Оценка окружного распределения шихтовых материалов в доменной печи радиолокационным профилемером	210
7.3	Рекомендации по совершенствованию технологических приемов управления окружным распределением материалов в печи	220
7.4	Разработка приема управления окружным распределением шихтовых материалов на колошнике с использованием показаний системы измерения профиля поверхности засыпи	227

## **ГЛАВА 8**

### **РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТИЧНОЙ ЗОНЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ ПРОФИЛЕМЕРА**

8.1	Аналитическое исследование положения пластичной зоны и связи ее параметров с движением поверхности засыпи шихтовых материалов в доменной печи	238
-----	---	-----

<b>8.2</b>	Разработка метода определения положения пластичной зоны в доменной печи на основе информации профилемера. Анализ факторной структуры показателей, характеризующих опускание поверхности шихтовых материалов в печи. Сопоставление расчетов формы и положения пластичной зоны с технологическими показателями и параметрами доменной плавки	244
<b>8.2.1</b>	Метод контроля положения пластичной зоны в доменной печи	244
<b>8.2.2</b>	Факторный анализ влияния технологических условий на положение пластичной зоны в доменной печи	273

## ГЛАВА 9

<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТОЛБА ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ</b>		284
<b>9.1</b>	Разработка и совершенствование математических моделей структурных элементов столба шихтовых материалов в доменной печи	285
<b>9.1.2</b>	Разработка алгоритма расчета положения слоев шихтовых материалов при их опускании в сухой зоне доменной печи	285
<b>9.1.3</b>	Исследование влияния распределения шихтовых материалов в печи на формирование нижней границы пластичной зоны	292
<b>9.1.3.1</b>	Факторы, определяющие форму и положение пластичной зоны	292
<b>9.1.3.2</b>	Анализ известных методов определения положения пластичной зоны	293
<b>9.1.3.3</b>	Разработка математической модели определения положения пластичной зоны	297
<b>9.1.4</b>	Определение геометрических параметров фурменной зоны	304

9.1.4.1	Функциональные особенности фурменной зоны. Результаты исследований процессов в горне доменной печи	304
9.1.4.2	Выбор модели расчета геометрических параметров фурменной зоны	306
9.2	Разработка аналитического метода оценки газодинамического режима доменной плавки	312
9.2.1	Математическое моделирование газодинамических процессов в сухой зоне печи	312
9.2.2	Исследования газодинамики пластичной зоны	325
9.2.2.1	Общие представления о движении газового потока в пластичной зоне	326
9.2.2.2	Разработка математической модели газодинамики пластичной зоны	328
9.3	Результаты аналитических исследований с помощью разработанных алгоритмов и математических моделей	332
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>336</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>338</b>



---

**Наукове видання**

Большаков Вадим Іванович  
Муравйова Ірина Геннадіївна  
Семенов Юрій Станіславович

**ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ  
ПОВЕРХНІ ЗАСИПУ ШИХТИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ  
ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ**  
(Російською мовою)

Відповідальна за випуск Л. В. Шара

Підписано до друку 17.02.2014. Формат 60x84 1/16. Обл.-вид. Арк. 21,16.

Тираж 100 прим.

Зам. № 4168

Видавництво «Пороги»  
49000, м. Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 60,  
Тел. 745-20-93  
*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 7 від 21.02.2000*



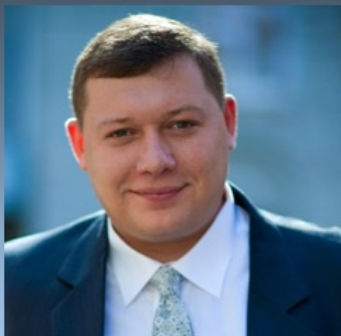
## **Вадим Иванович Большаков**

доктор технических наук, профессор, академик Национальной академии наук Украины, Заслуженный деятель науки и техники, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, директор Института черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, автор более 950 научных работ, в т.ч. 18 монографий, 9 брошюр, 107 изобретений. Направления научной деятельности: анализ и расчет технологических параметров и программ управления распределением шихты и газов в доменных печах, диагностика состояния и автоматизация управления оборудованием.



## **Ирина Геннадиевна Муравьева**

доктор технических наук, старший научный сотрудник Института черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины. Автор более 120 научных работ, в т.ч. монографии, брошюры и 21 изобретения. Направления научной деятельности: оборудование и технология производства сырья для металлургии методом брикетирования, контроль и управление доменной плавкой с использованием информации систем измерения поверхности засыпи шихты.



## **Юрий Станиславович Семенов**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, лауреат Премии Президента Украины для молодых ученых. Автор более 60 научных работ, 7 изобретений. Направления научной деятельности: контроль и управление доменной плавкой с использованием информации систем измерения поверхности засыпи шихты, выбор рациональных режимов загрузки доменной печи.