

А.В.Бородулин, А.Л.Чайка, А.А.Сохацкий, Б.В.Корнилов, А.И.Швачка

ВОПРОСЫ СИСТЕМНОЙ НАДЕЖНОСТИ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Цель работы состоит в совершенствовании теплового режима доменной плавки. Разработаны основы базового мониторинга системной надежности доменного производства; развиты методы расчета и выполнен выбор оптимальных режимов тепловой и газодинамической работы системы «турбовоздуходувка – блок воздухо – газонагревателей – металлоприемник – фурменная зона – шахта – колошник – газовые утилизационные безкомпрессорные турбины». Учтены ограничения, наложенные на систему по объему производства, расходу и качеству энергетических и сырьевых ресурсов, безопасности эксплуатации, степени износа, конструкции основных агрегатов доменного цеха.

доменное производство, системная надежность, ограничения, расход энергоресурсов

Состояние вопроса. Уже на заре бурного развития тяжелой промышленности в начале XX века производственники, передовые инженерно-технические работники России, других стран мира видели и разрешали те комплексные проблемы, которые стояли перед металлургами и перед развитием техники и технологии, повышением уровня техники безопасности, облегчения труд, механизации, экономическими вопросам (табл. 1) [1–4].

Таблица 1. Проблемы по обеспечению промышленной безопасности производства чугуна

М.К. Курако, начальник доменных цехов	В.И. Гулыга, главный инженер металлургических заводов	Ф.Г. Вилькоккс, вице президент инженерной компании «Фрейн»
Наибольшая производительность и наименьший расход топлива	Уменьшение расхода топлива на пуд проката	В доменном производстве эксплуатационные вопросы тесно связаны с вопросами техники безопасности
Облегчения труда	Механизация производства, условия труда	Отдел охраны и оздоровление труда
Безопасность рабочих	Увеличение производительности труда	Техника безопасности и экономическая необходимость
И.П. Бардин, 1936, В.И. Гулыга, 1933	Г. Володин, 1967, Д. Гулыга, 1993,	Ф. Вилькоккс, 1915, М. Павлов, 1933

Сложность и необходимость комплексного разрешения проблемы системной надежности производства чугуна очевидна. В этом аспекте объединяются несколько проблем. В настоящее время эти вопросы имеет всеобъемлющий характер. Результирующей составляющей по принятию оптимального решения может быть получена на основании решения нескольких задач, каждая из которых имеет свой критерий оптимальности.

Создание и практическая реализация концепции системной надежности при производстве чугуна представляет собой важную задачу, без научной постановки и без решения которой нельзя говорить об экономичности и оптимальной надежности ни в конструкциях и режимах работы печей и агрегатов ее обслуживающих, ни предприятия, ни в отрасли в целом.

Доменное производство с уникальными мощностями и малой серийностью конструкций, обладает рядом свойств, которые существенно отличают их от объектов, традиционных для теории надежности, таких как радиотехнические устройства, аппараты и машины. Цена ошибки в доменном производстве огромная и оно, более чем какое – либо другое, нуждается в крепкой налаженной работе коллективов не только производственников, но и исследователей, и проектировщиков.

Расход энергетических и сырьевых ресурсов, производительность, качество выплавляемого чугуна и межремонтный срок работы доменных печей взаимно обусловлены. Они приобретают конкретные значения под воздействием компромиссных управляющих решений, которые в идеале должны обеспечить системную надежность доменного производства: т.е. выплавку требуемого количества чугуна заданного качества при минимальных затратах энергоресурсов, безопасной и длительной эксплуатации доменной печи [5–9].

Методика исследования. Анализ подходов к решению задачи на концептуальном уровне показал, что структуру проблемы по системной надежности доменного производства можно представить в виде поиска компромиссных решений трех видов составляющих задач по определению оптимальных условий по получению максимальной производительности печи, максимальной экономичности плавки и выполнения условий по обеспечению безопасной и безаварийной работе доменной печи и агрегатов ее обслуживающих. Системно–техническая надежность агрегата и производства чугуна схематически показана на рис. 1.

Перспективным направлением научной поддержки выбора компромиссных решений по планированию и организации рационального режима работы доменной печи в сложившихся и перспективных условиях, является разработка и использование математических моделей, формализованных методов прогноза технико–экономических показателей и тепло–газодинамических режимов доменной плавки с учетом ограничений, накладываемых рабочими возможностями комплекса агрегатов обслуживающих работу доменной печи [5].

Данный подход требует изучения параметров и процессов в инфраструктуре доменного производства, выбора формализованными методами оптимальных параметров работы энерготехнологического комплекса ТВД – блок воздушно–газонагревателей – металлоприемник – фурменная зона – шахта – колошник – ГУБТ с учетом ограничений на объем производства, расход и качество энергетических и сырьевых ресурсов, безопасность эксплуатации, степень износа оборудования и агрегата в целом. Схемати-

чески это показано на рис.2.



Рис.1. Архитектура системной надежности доменного производства и принятия компромиссных решений по ее обеспечению



Рис.2. Схема поиска компромиссных решений обеспечивающих системную надежность доменного производства

Центральное место в решении задачи системной надежности доменного производства занимает достижение требуемых технико-экономических показателей доменной плавки в существующих дутьевых, энергетических и шихтовых условиях с учетом технических ограничений связанных с состоянием доменной печи, воздухонагревателей, парка ТВД и потребностью комбината в доменном газе.

Прогнозировать технико-экономические показатели работы с учетом износа ограждения доменных печей (внешних тепловых потерь) позволяет балансовый зональный теплоэнергетический метод расчета доменной плавки, предложенный И.Д.Семикиным [5].

В 2009 году по инициативе ИЧМ НАНУ на доменной печи №9 ПАО «АМКР» объемом 5000 м³ организован автоматизированный контроль суммарных тепловых потерь в системе ее водяного охлаждения. В 2011 году в составе АСУ ТП ДП №9 ПАО «АМКР» реализована подсистема «Контроль внешних тепловых потерь и расход кокса на их покрытие», которая включает так же автоматизированный контроль тепловых мощностей печи (общей, усвоенной, холостой) и коэффициентов использования теплоты топлива (КИТ), теплового дефицита. Освоение этой информации позволяет анализировать причинно-следственные связи внесения изменений в технологический режим работы печи, более оперативно принимать меры по исключению аварийных ситуаций и оптимизации хода печи, что приводит к экономии кокса и увеличению стойкости ограждения печи [5,10–12].

Для анализа тепловой работы периферийной зоны и печи в целом, использована балансовая теплоэнергетическая модель расчета доменной плавки И.Д.Семикина и термографический метод мониторинга температурно-тепловых нагрузок на ограждение печи [5,10–15]. В целом, при описании тепловой работы по зонам доменной печи используются следующие комплексные теплоэнергетические параметры [5, 10–12]:

- 1) общая тепловая мощность печи ($M_{\text{общ}}$), МВт;
- 2) коэффициент использования теплоты топлива (КИТ – η);
- 3) рабочая тепловая мощность ($M_{\text{раб}}$), МВт;
- 4) мощность холостого хода ($M_{\text{х.х}}$), МВт;
- 5) усвоенная тепловая мощность ($M_{\text{усв}}$), МВт;
- 6) тепловой дефицит чугуна (ΔI), МДж/ т (чуг);
- 7) внешние потери теплоты рабочего пространства печи ($Q_{\text{п.р.п.}}$), МВт.

Основными из них являются четыре: общая тепловая мощность печи, КИТ, тепловой дефицит чугуна и потери теплоты рабочего пространства печи, которые использовались в разработке подсистемы АСУ ТП ДП №9 «Контроль внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие» По терминологии, предложенной И.Г.Товаровским величина $Q_{\text{п.р.п.}}$ —это коксовый эквивалент внешних тепловых потерь домны.

На систему охлаждения доменной печи приходится 90–95 % всех тепловых потерь рабочего пространства печи. Поэтому тепловая нагрузка на охлаждаемые элементы является одним из интегральных параметров работы, как доменной печи в целом, так и отдельных ее периферийных зон [5].

Учет внешних тепловых потерь, полученных калориметрическим методом, позволяет повысить точность расчета теплоэнергетических пара-

метров и технико-экономических показателей доменной плавки на 2–10%, оценить нестабильность изменения во времени внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие, вычисленного по зависимости И.Д.Семикина:

$$K_{\text{ПТП}} \cong \frac{100}{Q_H^p \cdot C_K} \cdot \frac{Q_{\text{ПТП}} \cdot 3600}{\eta_C \cdot P} \cdot 1000, \text{ кг/т чугуна,}$$

где $Q_{\text{ПТП}}$ – внешние тепловые потери рабочего пространства печи, МВт; η_C – КИТ углерода кокса в печи; $Q_H^p = 33412$ кДж/кг полная теплота сгорания углерода кокса; C_K – содержание углерода в коксе, %; P – производительность печи, т/ч.

Оценить динамику отклонения в расходе кокса на покрытие внешних тепловых потерь позволяет обобщенная зависимость этой величины от удельных тепловых потерь $K_{\text{ПТП}} = f(q)$, которая как видно из рис.3 является универсальной для доменных печей разного объема, работающих в широком диапазоне дутьевых, шихтовых условий, состояния ограждения печи и при выплавке различных марок чугуна.

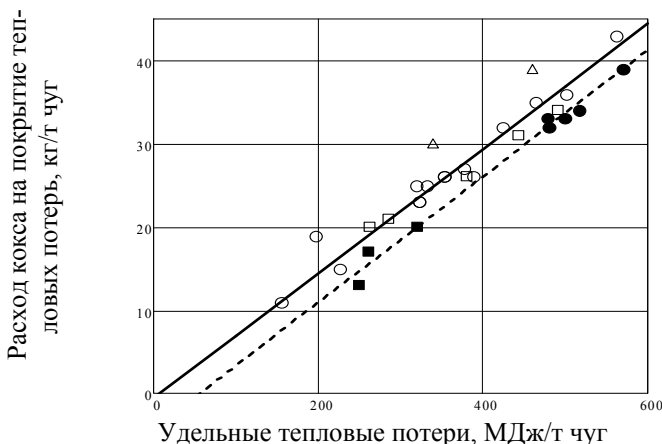


Рис.3. Зависимость расхода кокса на покрытие тепловых потерь ($K_{\text{пот}}$) от удельных потерь теплоты (q): □– ДП $V=1000\text{ м}^3$, ○– ДП $V=2000\text{ м}^3$, △– ДП $V=2500\text{ м}^3$, ■– ДП $V=5000\text{ м}^3$ (2007г.), ●– ДП $V=5000\text{ м}^3$ (2011г.), (—) – статистическая обработка информации по печам различного объема: $K_{\text{ном}}(q) = -0,583 + 0,075 \cdot q$, $R^2 = 0,962$, (---) – статистическая обработка информации по ДП9: $K_{\text{ном}}(q) = -4,272 + 0,076 \cdot q$, $R^2 = 0,988$

Распределение газового потока в шахте и искажение профиля печи отражают результаты термографического метода обследования тепловой работы шахты, выполненные на основании измерений радиационным пирометром температур кожуха, обработки показаний стационарных термометров, установленных в кожухе по специальной методике [10–12]. Эта ин-

формация позволяет так же учесть величину внешних тепловых потерь излучением и конвективным теплообменом между доменной печью и окружающим ее пространством, которые составляют до 5 % и выше от общей величины внешних тепловых потерь [16].

Видеокадры результатов контроля внешних тепловых потерь в автоматизированном режиме ДП №9 ПАО «АМКР», показаны на рис.4. Иллюстрированное на видеокадрах уменьшение (увеличение) внешних тепловых потерь на ДП №9 связано с ее остановкой (раздувкой). Информация об изменении внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие архивируется и хранится в базе данных АСУ (рис.4). Экстремумы внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие на рис.4 соответствуют остановке и раздувки печи.

Интегральными величинами, которые более четко, отражают вектор изменения характеристик и показателей тепловой работы являются, удельная величина внешних тепловых потерь, на тонну выплавляемого чугуна, и расход кокса на их покрытие, которые связаны прямой пропорциональной линейной зависимостью.

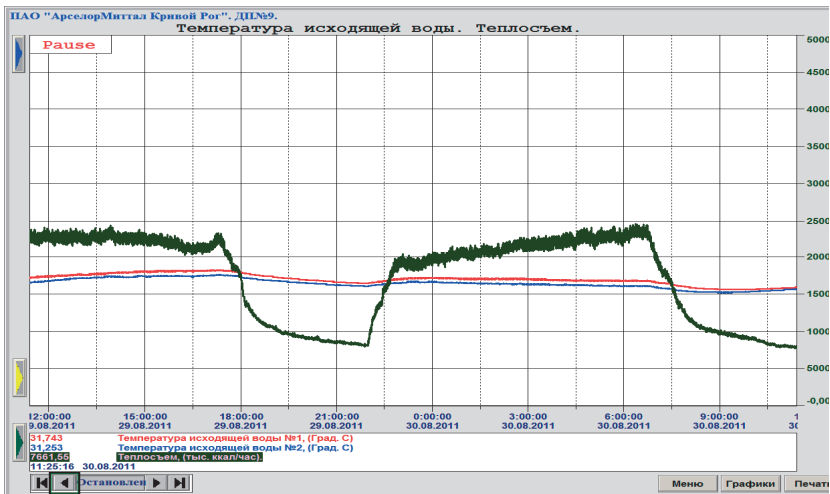


Рис.4. Видеокадры измерения внешних тепловых потерь в системе охлаждения ДП №9 ПАО «АМКР» в автоматизированном режиме

Результаты выполненных исследований показывают, что информацию о тепловых потерях в системе охлаждения доменных печей можно использовать не только для определения эффективности распределения газового потока и расхода кокса на покрытие внешних тепловых потерь, но и для получения своевременных предупреждений о расстройствах тепловой работы доменной печи.

Интегральными параметрами, которые показали себя наиболее на-

дежными и чувствительными к изменению технико–экономических показателей доменной плавки, являются тепловые потери в системе охлаждения, расход кокса на их покрытие и температура колошникового газа в газоотводах. Эти параметры являются неотъемлемой составной частью расчета теплового баланса доменной плавки. Влияние величины тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие, на тепловую работу доменной печи и показатели доменной плавки в теплоэнергетической модели рассчитываются с использованием понятий тепловой и усвоенной мощности, коэффициента использования теплоты топлива, теплового дефицита чугуна [5,13–15]. Перечисленные величины имеют четкий физический смысл, рассчитываются через параметры и состав дутья, учитывают изменения в составе шихты и колошникового газа, радиального распределения газового потока и, следовательно, открывают новые возможности в принятии научно обоснованных решений для оперативного управления ходом доменной плавки.

С этой целью в состав АСУ ТП ДП №9 внедрена подсистема «Контроль внешних тепловых потерь и расход кокса на их покрытие». Основными направлениями применения подсистемы «Внешние тепловые потери и расход кокса на их покрытие» являются:

1. Учет величины внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие в технико–экономических расчетах.

2. Использование информации, поступающей из подсистемы для поиска рационального и оценки эффективности выбранного тепло–газодинамического режима при изменении параметров и состава дутья, давления в колошниковом пространстве, программы загрузки печи.

3. Использование информации о внешних тепловых потерях и расходе кокса на их покрытие для выявления «расстройств» в работе печи.

4. Реализация (в перспективе) в составе АСУ ТП ДП №9 подсистемы «Контроль тепловой работы печи», работающей в режиме советчика–мастера по выбору рациональных управляющих решений, корректирующих тепловой и газодинамический режим ведения доменной плавки.

В ходе опытно–промышленной апробации подсистемы в нестабильных условиях работы ДП №9 в 2011 году и на основании выполненных аналитических исследований выявлены следующие факторы, которые могут указывать на «расстройство» в работе печи (рис.5):

- резкое увеличение или уменьшение внешних тепловых потерь;
- скачкообразное среднечасовое изменение расхода кокса на покрытие внешних тепловых потерь;
- одновременная тенденция увеличения и уменьшения величины внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие.

Оценить связаны или нет разогрев (похолодание) печи с изменением тепло–газодинамического режима ведения доменной плавки позволяют вспомогательные видеокадры (рис.6–7):

- увеличение (уменьшение) тепловой мощности печи соответствует

увеличению (уменьшению) количества кислорода, поступающего в доменную печь и, как следствие, при нормальном режиме работы печи сопровождается увеличением (снижением) производства;

- динамика изменения величин КИТ отражает стабильность распределения и использования теплоты топлива в доменной печи;
- динамика изменения давлений и температур по высоте печи позволяет оценить причинно–следственные связи перераспределения теплоты по высоте печи при увеличении (уменьшении) величины внешних тепловых потерь.

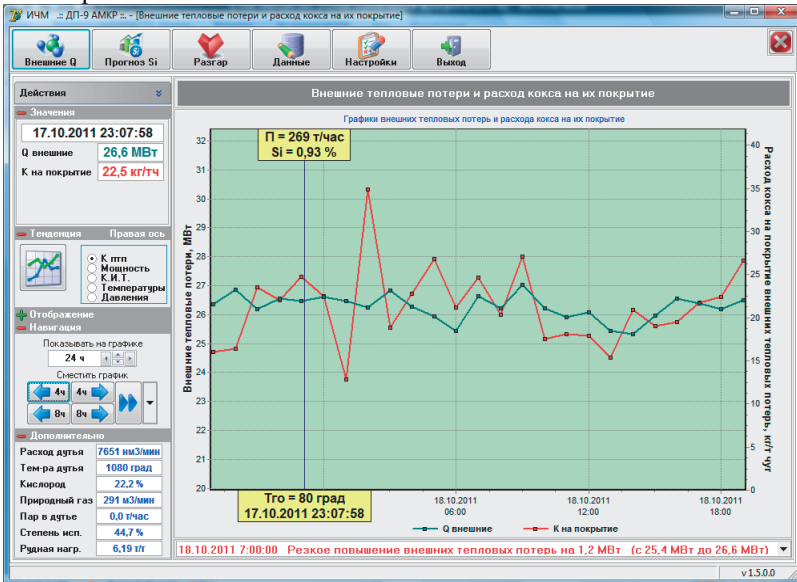


Рис.5. Пример предупреждающего сигнала о резком увеличении (уменьшении) внешних тепловых потерь на видеокadre внешние тепловые потери и расхода кокса на их покрытие.

При выходе на стабильный режим работы ДП №9 подсистема «Внешние тепловые потери и расход кокса на их покрытие» может быть использована в следующих направлениях:

- определение для заданного производства рационального диапазона величины внешних тепловых потерь;
- использование информации о длительной тенденции увеличения (уменьшения) величины внешних тепловых потерь как сигнала об износе шахты и запечников (образования излишнего гарнисажа);
- использование информации о резком увеличении (уменьшении) величины внешних тепловых потерь как сигнала о нарушении в тепловой и газодинамической работе печи: сход гарнисажа, разогрев (похолодание) печи, перераспределения газового потока к периферии (оси), каналный

ход печи;

- использованием информации о величине внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие для оценки эффективности существующего и поиска рационального технологического режима ведения доменной плавки.

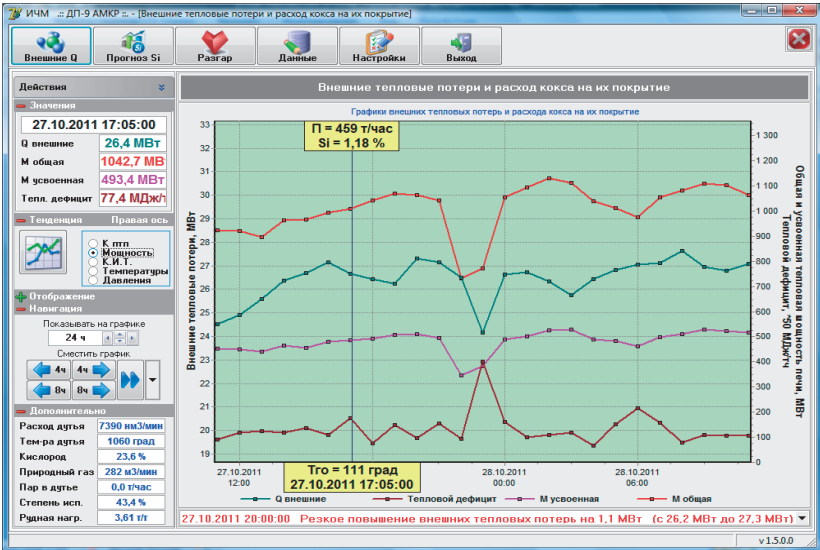


Рис.6. Пример видеокadra «Общая и усвоенная тепловая мощность, тепловой дефицит».

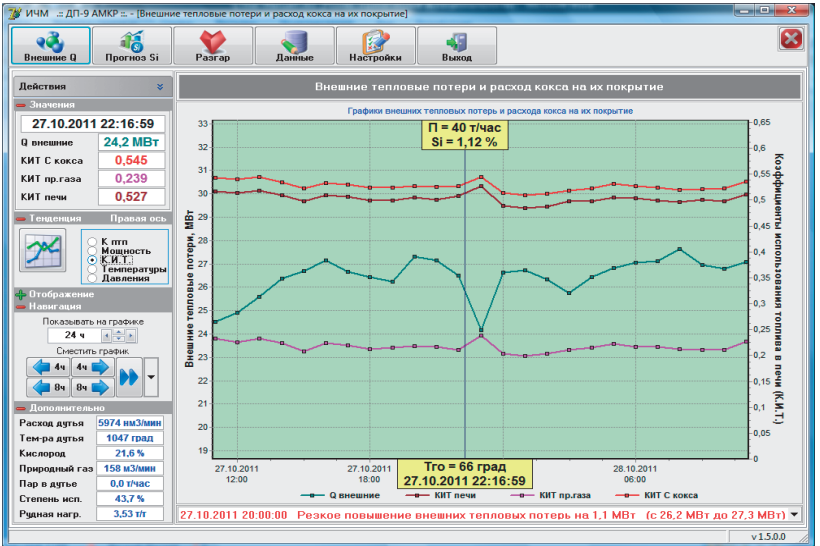
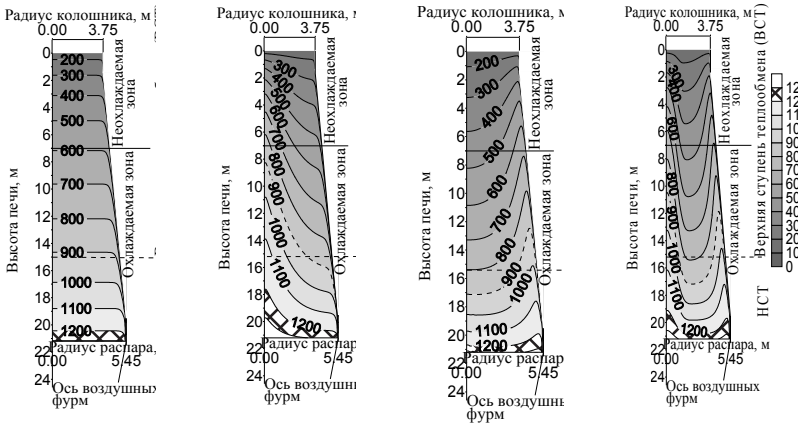


Рис.7. Пример видеокadra «Коэффициент использования теплоты топлива (КИТ)».

Оценить возможность экономичной (снижение тепловых потерь), безопасной (температурные поля колошниковогаза и ограждения печи), и устойчивой (перепады давления, скорости, температуры) термогазодинамической работы работ печи при заданных параметрах и составе дутья позволяет использование теплогазодинамических моделей фурменной и сухой зоны печи [5,17–19]. С использованием теплогазодинамической модели «сухой» зоны шахты уточняются закономерности и дана количественная оценка процессов теплообмена и газодинамики в шахте ДП в зависимости от расхода и температуры шахтного газа, давления колошниковогаза, порозности и крупности кусков шихты (рис.8).



а – равномерное б – центральное в – периферийное г – фактическое

Рис.8. Распределение изотерм шихты в шахте ДП объемом 2000 м³ при различном газораспределении

Результаты исследования. На основании выполненных численных расчетов с учетом развития процессов теплообмена в периферийной зоне ДП получено распределение температуры шихты от уровня засыпи по высоте шахты ДП на различных расстояниях от стенки (рис.9). Установлено, что ниже границы неохлаждаемой и охлаждаемой зон существует инверсия температурного поля – скачкообразное изменение температуры, обозначенное кружком А кривой 1 (рис.9), величина, которого зависит от параметров газового потока, его распределения, свойств шихтовых материалов, состояния ограждения, наличия выступов (сапожка) и тепловой работы системы охлаждения. Инверсии температурного поля могут наблюдаться не только на стыке охлаждаемой и неохлаждаемой части шахты, но и в любой другой зоне, где существуют интенсивные стоки теплоты. Например, кружками Б и В кривой 1 (рис.9) обозначены выступы холодильных плит (сапожки). Иллюстрированное на рис.9 распределение температур способствует налипанию расплавов и образованию настыли в

зоне инверсии температурного поля, особенно в районе границы охлаждаемой и неохлаждаемой зон, которая была выявлена на этой печи во время ее останова и выдувки до 6–7 ряда холодильников шахты.



Рис.9. Изменение температуры шихты по высоте шахты ДП объемом 2000 м^3 . Расстояние от стенки в мм: 1 – 10; 2 – 50; 3 – 100; 4 – ось печи

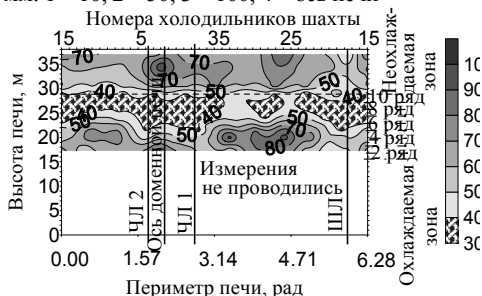


Рис.10. Термограмма кожуха ДП объемом 2000 м^3

Указанная настыль до выдувки была спрогнозирована при исследовании состояния ограждения ДП термографическим методом с использованием данных ручного замера температур кожуха и тепловых потерь в системе охлаждения печи. На термограмме, спрогнозированная настыль отмечена заштрихованной областью (рис.10).

Методы прогноза температурно-теплового состояния шахты и ее периферийной зоны в составе АСУ ТП доменной печи позволяет контролировать износ профиля шахты, принимать научно-обоснованные решения, в режиме советчика, по изменению тепло-

газодинамического режима работы печи с целью снижения затрат кокса на покрытие внешних тепловых потерь и предупреждения расстройств теплогазодинамического режима печи.

Рациональный газодинамический режим в свободной от шихтовых материалов области колошника доменной печи обеспечивает увеличение ресурса эксплуатации загрузочного оборудования и экономию энергетических ресурсов за счет уменьшения потерь давления и температурно-тепловых нагрузок на загрузочное оборудование с учетом параметров и распределения газового потока в печи, количества газов идущих на охлаждение БЗУ, геометрии и условий зарастания гарнисажем колошника [5].

С использованием результатов теплогазодинамической модели «сухой» зоны доменной печи и разработанной газодинамической модели свободной от шихты области колошника разработаны направления на совершенствование конструкции колошника и согласованности газодинамической работы воздухоудвухных машин верха и низа печи, ее дроссельных механизмов.

Разработанная двухмерная газодинамическая модель свободной от шихты области колошника позволила установить закономерности изменения давлений, скоростей в колошнике в зависимости от его конструкции, расхода, скорости, распределения и температуры колошникового газа, расхода газа идущего на охлаждение загрузочного устройства и давления на колошнике.

Наиболее рациональным для газодинамической работы колошника является центральное газораспределение. При его реализации осуществляются наименьшие потери давления, в два раза уменьшаются горизонтальные составляющие скорости колошникового газа в пристеночной области, что уменьшается вынос пыли из печи, вероятность зарастания гарнисажем газоотводов печи, температурно–тепловые нагрузки на стенки (рис.11).

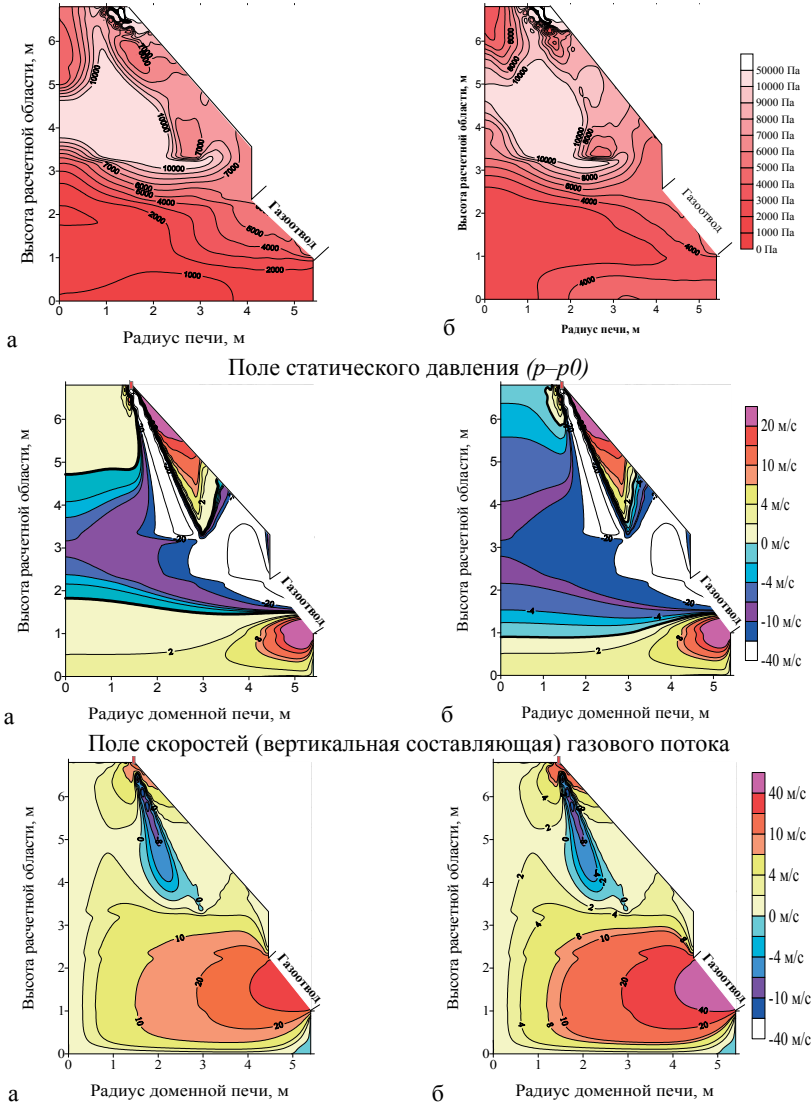
Возможность обеспечения необходимого давления и расхода дутья парком ТВД для устойчивой работы доменной печи в планируемых дутьевых и шихтовых условиях будет определена с использованием газодинамических характеристик компрессор–доменная печь и теории помпажа [20,21].

Результаты выполненных исследований показали, что при изменении качества шихтовых материалов, параметров и состава дутья, распределения шихтовых материалов на колошнике необходимо учитывать мощность воздуходувных машин и характеристику сети ТВД – доменная печь (рис.12).

Например, в случае, вдувания природного газа характеристика доменной печи более пологая (кривая 1, рис.12), а газодинамический режим устойчив, что объясняется меньшим содержанием FeO в первичном шлаке. При вдувании ПУТ газодинамическое сопротивление доменной печи растет за счет увеличения содержания закиси железа и количества первичного шлака, его вспенивания (кривая 3, рис.12). Как следствие, возрастают колебательные процессы в газодинамической системе «ТВД – домна». В случае возмущения, например, в виде обрушения шихты в фурменную зону появляются колебания с небольшой амплитудой. Это отрицательно сказывается на устойчивости работы печи и на ресурсе работы турбокомпрессора. Компромиссным вариантом, является совместное вдувание в горн доменной печи ПУТ и природного газа (кривая 2, рис.12).

При изменении конъюнктуры рынка энергоносителей, для поддержания производства чугуна на заданном уровне или форсирования работы печи, необходимо поддерживать рациональные сочетания имеющихся в наличии резервов, кислорода, нагрева дутья, ПУТ, природного газа и кокса с учетом технических характеристик воздуходувных машин и газопроницаемости столба шихты.

Выполнить анализ рационального использования энергетических ресурсов в системе блок воздухо–газонагревателей – доменная печь позволяет метод покомпонентного баланса [5].

Поле статического давления ($p-p_0$)

Поле скоростей (вертикальная составляющая) газового потока

Поле скоростей (горизонтальная составляющая) газового потока

Рис.11. Поля статического давления ($p-p_0$), горизонтальной и вертикальной составляющих газового потока для центрального (а) и периферийного (б) газораспределений с учетом газа идущего на охлаждение БЗУ

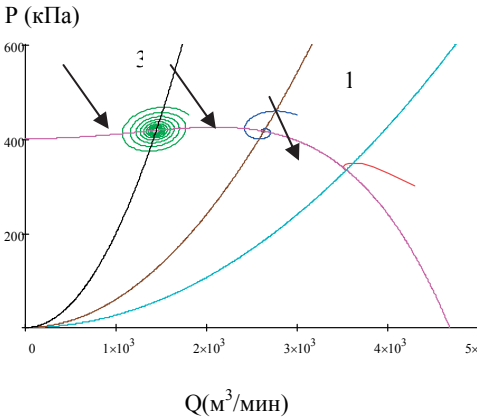


Рис.12. Пример фазового портрета газодинамической системы «турбовоздуходувка – доменная печь» при вдувании в печь природного газа (1), газозольной смеси (2) и ПУТ (3)

Применение блочного метода изучения, синтез балансовых и теплогазодинамических моделей доменной плавки, позволяет исследовать и количественно оценить взаимное влияние теплогазодинамических и теплоэнергетических параметров на показатели работы доменной печи и в дальнейшем перейти к решению оптимизационной задачи системной надежности доменного производства (рис.13).

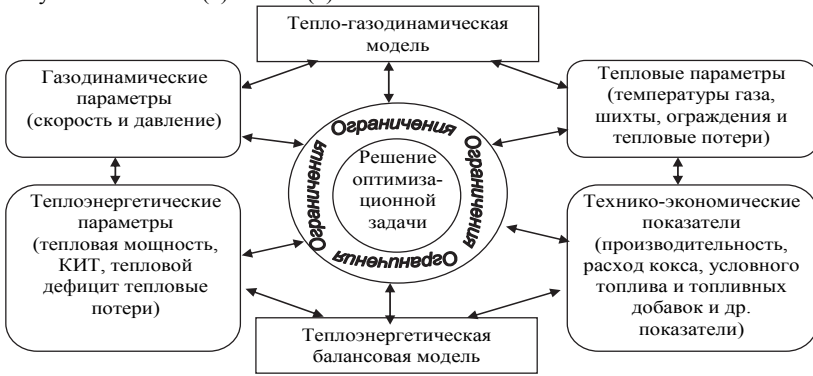


Рис.13. Схема блочного изучения доменной плавки на основе синтеза теплогазодинамической и теплоэнергетической моделей

Задача надежности является составной частью общей проблемы оптимизации их развития и функционирования, т.к. расчетная надежность в системах должна быть экономически целесообразной. На начальной стадии работы можно говорить о корректирующем влиянии фактора надежности на оптимальные решения. В полном же объеме стоит задача нахождения таких оптимальных решений, в которых фактор надежности входит как одна из ограничивающих составляющих расчетов объекта исследования (табл.2) [5,22]. В таблице приведены следующие обозначения: – P – производительность доменной печи, $m/час$; K – удельный расход кокса, $кг/m$ чугу; T – удельный расход условного топлива, $кг/m$ чугу; T_{FZ} – теоретическая температура фурменной зоны, $^{\circ}C$; $T_{дп}$ – температура доменного дутья, $^{\circ}C$; $O_{дп}$ – содержание кислорода в ду-

тье, %; m – доля углерода природного газа от общего количества углерода, сгораемого на фурмах в сухом дутье, доля единицы; n – доля углерода пылеугольного топлива (ПУТ) от общего количества углерода, сгораемого на фурмах в сухом дутье, доля единицы; $T_{\text{бал}}$ – балансовая температура фурменной зоны при вдувании разных марок углей; $^{\circ}\text{C}$; ΔT_{FZ} – среднее значение разниц между теоретической и балансовой температур в фурменной зоне при вдувании разных углей, $^{\circ}\text{C}$; $V_{\text{КГ}}$ – температура колошникового газа, $^{\circ}\text{C}$; ПУТ – удельный расход пылеугольного топлива, ПУТ, $\text{кг}/\text{т чуг.}$; удельный расход природного газа, $\text{м}^3/\text{т чуг.}$; $Q_{\text{РН}}$ – теплота сгорания колошникового газа, $\text{ккал}/\text{м}^3$ $V_{\text{ДГ}}$, – удельный расход дутья, $\text{м}^3/\text{т чуг.}$; $V_{\text{КГ}}$ – удельный выход сухого колошникового газа, $\text{м}^3/\text{т чуг.}$; $V_{\text{ОДТ}}$ – удельный расход технического кислорода, $\text{м}^3/\text{т чуг.}$; rd – степень прямого восстановления железа, показать rd по М. Павлову, %; C_{FZ} – общий расход углерода, сгораемого на фурмах, $\text{кг}/\text{т чуг.}$

Таблица 2. Показатели работы печи объемом 3000 м³ по нелинейной модели тепловой работы домы при оптимальных параметрах комбинированного дутья

Показатели лавки	P → max			K → min			Тул → min		
	2100	2200	2300	2100	2200	2300	2100	2200	2300
$T_{\text{FZ}}, ^{\circ}\text{C}$	2100	2200	2300	2100	2200	2300	2100	2200	2300
Целевая функция	310	310	310	261	261	261	485	480	475
Оптимальные параметры дутья при вдувании природного газа и ПУТ									
$T_{\text{ДГ}}, ^{\circ}\text{C}$	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
$O_{\text{ДГ}}, \%$	31	31	31	31	31	31	21,1	21,1	21,1
m , доля единицы.	0,08	0,10	0,11	0,36	0,36	0,36	0	0	0
n , доля единицы	0,26	0,20	0,15	0,31	0,31	0,31	0,08	0,04	0
Расчетные показатели работы доменной печи									
P , $\text{м}/\text{час}$	310	310	310	253	253	253	239	240	242
K , $\text{кг}/\text{т чуг.}$	393	403	413	261	261	261	456	466	475
T , $\text{кг}/\text{т чуг.}$	550	546	541	698	698	698	485	480	475
$T_{\text{FZ}}, ^{\circ}\text{C}$	2100	2200	2300	1900	1900	1900	2100	2200	2287
$T_{\text{бал}}, ^{\circ}\text{C}$:									
– угли газовые	2012	2013	2013	1738	1738	1738	2023	2032	2041
– антрацит	2029	2027	2024	1761	1761	1761	2032	2036	2042
– тощие	2022	2022	2020	1752	1752	1752	2028	2035	2042
$\Delta T_{\text{FZ}}, ^{\circ}\text{C}$	79	179	281	150	150	150	72	166	245
$T_{\text{КГ}}, ^{\circ}\text{C}$	120	120	120	394	394	394	160	150	141
ПУТ, $\text{кг}/\text{т чуг.}$	92	72	52	139	139	139	29	14	2
$V_{\text{ПГ}}, \text{м}^3/\text{т чуг.}$	47	57	66	230	230	230	0	1	1
$Q_{\text{РН}}, \text{ккал}/\text{м}^3$	962	967	973	1216	1216	1216	674	669	666
$V_{\text{ДГ}}, \text{м}^3/\text{т чуг.}$	841	841	840	1041	1041	1041	1086	1079	1073
$V_{\text{КГ}}, \text{м}^3/\text{т чуг.}$	1356	1360	1364	1795	1795	1795	1552	1544	1537
$V_{\text{ОДТ}}, \text{м}^3/\text{т чуг.}$	107	107	107	130	130	130	5	5	5
rd , %	43	42	40	19	19	19	49	49	48
$C_{\text{FZ}}, \text{кг}/\text{т чуг.}$	321	321	320	350	350	350	296	294	293

Закключение. Выполненный комплекс решений задач по доменному производству и их синтез позволяет решать задачу системной надежности в доменной печи по определению оптимальных параметров комбиниро-

ванного дутья и выбора рациональной системы охлаждения печи с учетом работы фурменной зоны, зоны когезии, свойств и распределения шихты и газового потока, выдачи чугуна.

На основе выполненного решения задачи системной надежности в доменной печи разработаны основы базового мониторинга системной надежности при производстве чугуна; развиты методы расчета и выполнен выбор оптимальных режимов тепловой и газодинамической работы системы ТВД – блок воздухо-газонагревателей – металлоприемник – фурменная зона – шахта – колошник – ГУБТ с учетом ограничений, наложенных на объем производства, расход и качество энергетических и сырьевых ресурсов, безопасности эксплуатации, степени износа, конструкцию основных агрегатов доменного цеха.

Разработана информационно–аналитическая база научно обоснованного выбора приоритетных направлений модернизации доменного производства, установлены закономерности и даны рекомендации, направленные на совершенствование теплового режима доменной плавки с учетом особенностей конструкции, технического состояния доменной печи и агрегатов, обеспечивающих ее работу, качества и наличия сырьевых и энергетических ресурсов, конъюнктурных условиях на рынке сбыта металлопродукции.

1. *Бардин И.П.* Жизнь инженера. Ч. 1 – я. Молодая гвардия. 1936. №8, с. 55 – 75; № 9. с. 56 – 64; , №10, с. 132 – 137. Ч. 2 – я. – Молодая гвардия. 1937., 10 – 11, с. 71 – 97. Литературная запись Ильи Заславского.
2. *Гулыга В.И.* Доменное дело. Посвящается М. Курако. Для рабочих доменного цеха. ОНТИ М. – Л. – Свердловск: Металлургиздат. Типография им. Евг. Соколовой в Лгр. 1933. 187 с.
3. *Володин Г.* По следам истории. Очерки из истории Донецкого ордена Ленина металлургического завода им. В.И.Ленина.: Изд – во «Донбасс». 1967. 352 с.
4. *Вилькокс Ф.Г.* Неполадки доменных печей. Побегу чугуна, взрывы газов, обвалы колош – их предупреждение. Перевод с англ. Ю.Н.Кизименко с добавлениями инж. Л.Л.Арнольда, А.Банньих и Н. Ускова к русскому изданию. Под ред. М.А.Павлова. М.:–Л.: .1933. СССР–НКТП. Гипромез. 272 с
5. *Домна в энергетическом измерении.* А.В.Бородулин, А.Д.Горбунов, Г.И.Орел, В.И.Романенко / Кривой Рог: Издательство СП «Мира» – 2004 г., с. 436.
6. *О развитии* научного направления в металлургии – системной надежности доменного производства / А.В.Бородулин, В.С.Листопадов, В.И.Романенко, С.П.Сущев, И.А.Султангузин, А.Л.Чайка // Международная научно–техническая конференция «Теория и практика производства чугуна», посвященная 70–летию КГТМК “Криво-рожсталь”. Кривой Рог: – 2004 г., с.324–328
7. *Системный* подход к вопросу надежности доменного производства / А.Л.Чайка, А.И.Швачка, А.Г.Байбуз, И.А.Лукьяненко, А.А.Сохацкий // Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. – Днепропетровск: НМетАУ, 2005. –Т. 1. – С. 438–447.

8. *Системная надежность производства чугуна– проблемы и перспективы /* А.В.Бородулин, Г.В.Панчоха, В.Н.Поляков, С.П.Суцев, А.Л.Чайка, А.И.Швачка // Тр. III научно – практ. конф. «Металлург. теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова». М.: МИСиС. 2006. с. 192 – 196.
9. *Оценка условий и надежности работы элементов ограждения доменной печи /* А.Л.Чайка, И.А.Лукьяненко, А.А.Сохацкий, С.П.Суцев, Е.И.Шумельчик, Г.Т. Цыганков // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. науч. тр. – К.: Наукова думка, 2007. – Вып. 14 – С. 47 – 54.*
10. *Чайка А.Л. Разработка мониторинга технического состояния ограждения доменной печи /* А. Л.Чайка, А.В.Бородулин, А.А.Сохацкий, Г.Т.Цыганков, А.И.Швачка // *Металлургическая теплотехника: Сб. научн. трудов. – Днепропетровск: НМетАУ, 2005. –Т. 2. – С. 383–392.*
11. *Новые методы контроля технического состояния ограждения доменных печей без останова технологического процесса /* В.И.Большаков, С.П.Суцев, А.Л.Чайка и др. // *ОАО «Черметинформация» Бюллетень «Черная металлургия» 2006 г. – №6. – с.27–38.*
12. *Чайка А.Л. /* Контроль состояния ограждения доменных печей с использованием термограмм // *Металлургическая и горнорудная промышленность №4, – 2008, с.109 – 111.*
13. *Семикин И.Д* Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов / И.Д.Семикин, С.И.Аверин, И.И.Радченко – М.: Металлургия, 1965. – 391с.
14. *Тепловые потери и тепловая работа доменных печей /* И.Д.Семикин, Г.Т.Цыганков, А.В.Бородулин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1972. – № 8. – С. 159–163.*
15. *Демин Г.И.* Тепловая работа доменных печей / Г.И.Демин // *Доменное и агломерационное производство. Сб. трудов. – Москва, Днепропетровск, 1940. – Вып. 8. – С.119–131.*
16. *Наружные потери теплоты доменной печи объемом 5000 м³/* А.В.Бородулин, К.А.Дмитренко, В.С.Листопадов и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность №1, – 2005, с.3 – 8.*
17. *Моделирование теплообмена и газодинамики в шахте доменной печи /* А.Ф.Авцинов, А.В.Бородулин, В.К.Хрущ и др. // *Сталь. – 1996. – №8. – С.4–9.*
18. *Математическое моделирование и анализ процессов тепломассообмена и газодинамики в верхней зоне доменной печи с целью обеспечения надежной работы ограждения /* А.А.Сохацкий, И.А.Лукьяненко, Г.Т.Цыганков и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. науч. тр. – К.: Наукова думка, 2007. – Вып. 15 – С. 50–60.*
19. *Аналитические исследования процессов в фурменной зоне и их приложения /* А.Л.Чайка, А.Л.Ручаевский, А.В.Лычев и др. // *Черные металлы. Материалы конференции к 100 летию А.Н. Рамма. 2003. – №12. – С.8 – 13.*
20. *Влияние газодинамических характеристик на устойчивость компрессоров доменной печи. /* И.А.Осташко, А.И.Швачка, Б.Н.Вишневский и др. // *Труды XV международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии», –Днепропетровск, 2008. с. 159–160.*
21. *Казакевич В.В.* Автоколебания (помпаж) в вентиляторах и компрессорах. М.: Машгиз, 1976, 262 с.
22. *Математические модели оптимального использования ресурсов в доменном производстве./* А.В.Бородулин, Х.Н.Гизатуллин, А.Д.Обухов и др. // *Отв. ред.*

д – р физ. – мат.наук В.Д. Мазур, д – р техн. наук Ю.Г. Ярошенко – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – 148 с

*Статья рекомендована к печати
канд. техн. наук Н.М.Можаренко*

А. В.Бородулін, А. Л.Чайка, А. А.Сохацький, Б.В.Корнілов, А.И.Швачка
Питання системної надійності доменного виробництва

Метою роботи є вдосконалення теплового режиму доменної плавки. Розроблено основи базового моніторингу системної надійності доменного виробництва; розвинено методи розрахунку і виконано вибір оптимальних режимів теплової та газодинамічної роботи системи «турбоповітродувки - блок повітро - газонагрівачів - металоприймачі - фурменна зона - шахта - колошник - газові утилізаційні безкомпресорні турбіни». Враховано обмеження, що накладені на систему за обсягами виробництва, витратами і якістю енергетичних і сировинних ресурсів, безпекою експлуатації, ступенем зношення, конструкцією основних агрегатів доменного цеху.