

А.Л.Чайка, Д.В.Пинчук, С.В.Кетлер, А.И.Швачка, А.А.Сохацкий

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ В СОСТАВЕ АСУ ТП ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Целью работы является развитие теплотехнических основ использования на практике теплоэнергетических параметров работы доменной печи. Разработана и реализована в составе АСУ ТП ДП №9 ПАО «АМКР» подсистема «Контроль внешних тепловых потерь и расход кокса на их покрытие», позволяющая получать информацию о внешних тепловых потерях, тепловом балансе доменной плавки, оперативно определять и оценивать рациональность теплового режима работы печи. Показана возможность анализа и прогнозирования расхода кокса при длительных остановках печи, определения общей и усвоенной тепловой мощности печи, КИТ и теплового дефицита чугуна.

**доменная печь, тепловой режим, расход кокса, потери, тепловая мощность печи**

**Состояние вопроса.** На сегодняшний день для оперативного отслеживания и управления режимом работы отечественных доменных печей, с целью поддержания заданного производства и качества выплавляемого чугуна, используются модели расчета материального баланса – «Шихтовка», и технологическая инструкция, которая обобщает опыт доменного производства. Элементы, описывающие энергетический баланс доменной плавки, к которым относятся: внешние тепловые потери, расход кокса на их покрытие, теплоэнергетические параметры (тепловая мощность, коэффициент использования теплоты топлива и тепловой дефицит чугуна) не нашли широкого распространения [1–4]. Практические начала автоматизированного контроля работы системы охлаждения и их приложения в отечественном доменном производстве, положены в 60 годах прошлого века работой В.Я.Кожуха [5]. В настоящее время на доменных печах стран СНГ намечалась активизация работ по автоматизированному контролю внешних тепловых потерь доменных печей.

В зависимости от глубины проработки теоретической базы и оснащённости доменной печи измерительными приборами, перепада температур и расхода воды на охлаждаемые элементы доменной печи, основными направлениями практического приложения информации о тепловых потерях в системе охлаждения могут являться:

1. Учет величины внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие в технико-экономических расчетах.
2. Использование для поиска рационального и оценки эффективности выбранного тепло-газодинамического режима при изменении параметров и состава дутья, давления в колошниковом пространстве, программы загрузки печи.

3. Реализация в составе АСУ ТП подсистем контроля разгара футеровки, образования и схода гарнисажа в шахте и металлоприемнике доменной печи.

4. Планирование изменений в конструкции шахты, заплечиков и металлоприемника, программы загрузки печи.

ИЧМ НАНУ в течение 45 лет периодически инструментальными замерами контролировались потери теплоты на 33 доменных печах 14 металлургических предприятий СНГ, выплавляющих различные марки чугунов и работающие с разными шихтовыми и дутьевыми параметрами, в различных технологических и экономических ситуациях. Особое внимание исследователей привлекала доменная печь №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» («АМКР») объемом 5000 м<sup>3</sup> (табл.1) [2,4,6]. В 2009 году по инициативе ИЧМ НАНУ на доменной печи №9 ПАО «АМКР» организован автоматизированный контроль суммарных тепловых потерь в системе ее водяного охлаждения.

Таблица 1. Тепловые потери доменной печи № 9 ПАО «АМКР» по данным инструментальных замеров ИЧМ НАНУ, кВт

Зона охлаждения	Распределение газового потока в печи						Периферийное
	Центральное					по [2, 4]	
	перед ремонтом			после ремонта			
	14.9.82	5.8.83* <sup>2)</sup>	7.5.03* <sup>2)</sup>	19.12.83	26.1.84		18.8.07
Лещадь:							
нижняя	354	347	647	263	475	451	523
верхняя	632	623	641	252	298	962	992
Горн:	700	654	836	1387	1382	1558	1269
нижний	–	–	423	–	–	997	–
верхний	–	–	413	–	–	561	–
Чугунные летки	–	–	209	–	–		–
Фурменная зона	281	326	508	220	212	309	530
Фурменные приборы:	10244	10296	13980	13290	14129	10231	12000* <sup>3)</sup>
фурмы	8123	8374	12000* <sup>3)</sup>	11510	12277	8300* <sup>3)</sup>	–
амбразуры	334	365	304	155	177	267* <sup>7)</sup>	–
кадушки	373	394	378	265	315	345* <sup>7)</sup>	–
сопла	1414	1163	1300	1360	1360	1319* <sup>7)</sup>	–
Заплечики	3298	3034	2380	1692	3259	4515	6285* <sup>4)</sup>
Шахта	13595	14172	14340	1233	1490	13317	23432* <sup>4)</sup>

Воздушное охлаждение лещади	442	–	–	233	369	–	–
Излучением и конвекцией от печи	–	2908	–	–	825	–	–
Итого * <sup>5)</sup>	29548	32360	33000	18570	22439	31344	45031
Общий тепло-съем * <sup>6)</sup>	32802	32756	36500	19395	23600	32911	48150

\*<sup>1)</sup> – ремонт печи I разряда выполнялся с 7.08.83 по 1.11.83г.; \*<sup>2)</sup> – ремонт I разряда выполнялся с 11.05.03 по 14.11.03 \*<sup>3)</sup> – оценены расчетом; \*<sup>4)</sup> – данные ВПИПЧЭО; \*<sup>5)</sup> – потери теплоты по замерам; \*<sup>6)</sup> – суммарные потери теплоты с учетом потерь теплоты конвекцией, излучением от кожуха и охлаждения лещади воздухом; \*<sup>7)</sup> – средняя величина для ДП 9

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 [4,7–9].

**Методика исследования.** 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 [1–4,7–9]. В целом, при описании тепловой работы по зонам доменной печи используются следующие основные теплоэнергетические параметры [1–4]:

- 1) общая тепловая мощность печи ( $M_{\text{общ}}$ ), МВт;
- 2) коэффициент использования теплоты топлива (КИТ –  $\eta$ );
- 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 ( $\Delta I$ ), МДж/ т (чуг);
- 7) потери теплоты рабочего пространства печи ( $Q_{\text{п.р.п.}}$ ), МВт.

Основными из них являются четыре, это: 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». На систему охлаждения доменной печи приходится 90–95 % всех тепловых потерь рабочего пространства печи. Поэтому тепловая нагрузка на охлаждаемые элементы является одним из интегральных пара-

метров работы, как доменной печи в целом, так и отдельных ее периферийных зон [4,6].

Учет внешних тепловых потерь, полученных калориметрическим методом, позволяет повысить точность расчета теплоэнергетических параметров 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:

$$K_{\text{ППП}} \cong \frac{100}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} \cdot C_{\text{K}}} \cdot \frac{Q_{\text{ППП}} \cdot 3600}{\eta_{\text{C}} \cdot P} \cdot 1000, \text{ кг/т чугуна,}$$

где  $Q_{\text{ППП}}$  – внешние тепловые потери рабочего пространства печи, МВт;  $\eta_{\text{C}}$  – КИТ углерода кокса в печи;  $Q_{\text{H}}^{\text{P}}=33412$  кДж/кг полная теплота сгорания углерода кокса;  $C_{\text{K}}$  – 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  $K_{\text{ном}}=f(q)$ , которая как видно из рис.1 является универсальной для доменных печей разного объема, работающих в широком диапазоне дутьевых, шихтовых условий, состояния ограждения печи и при выплавке различных марок чугуна.



Рис.1. 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  $V=250\text{ м}^3$ , ■– 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 термомпар, установленных в кожухе по специальной методике [7–9]. Эта информация 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 [10]. Распределение температурно–тепловых нагрузок на горн доменной печи отражает подсистема АСУ ТП ДП № 9 «Разгар».

**Изложение основных материалов исследований.** Схема реализованной на ДП №9 ПАО «АМКР» системы автоматизированного контроля внешних тепловых потерь представлена на рис.2. Согласно приведенной схеме, термомпарой проводятся измерения температур трубопроводов каждого коллектора с входящей и выходящей водой на печь. Расход воды каждого подвода фиксируются расходомерами, установленными на печи. Погрешность измерения тепловых потерь в автоматизированном режиме составляет 4÷5%.

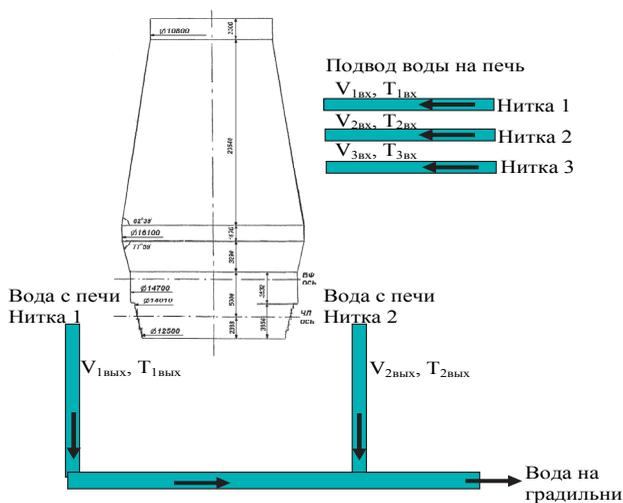


Рис.2. Схема измерения тепловых потерь на доменной печи №9 ПАО «АМКР»

Видеокадры результатов контроля внешних тепловых потерь в автоматизированном режиме ДП №9 ПАО «АМКР», показаны на рис.3. 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 архи-

вируется 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.

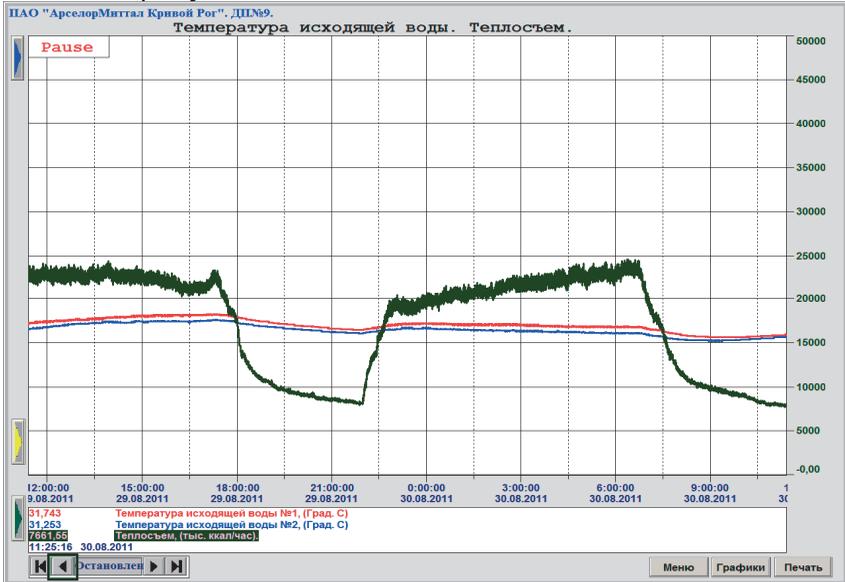


Рис.3. Видеокадры измерения внешних тепловых потерь в системе охлаждения ДП №9 ПАО «АМКР» в автоматизированном режиме

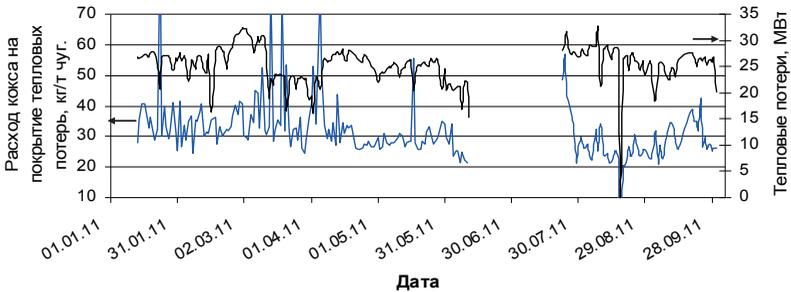


Рис.4. Среднесуточное изменение внешних тепловых потерь ДП №9 и расхода кокса на их покрытие по данным автоматизированного контроля

Анализ тепловых балансов ДП №9 по среднемесячным данным ее работы за 2011 год, показал, что величины абсолютных и удельных тепловых потерь на тонну выплавляемого чугуна с достаточно высокой прогнозной точностью отражают изменения в теплоэнергетических параметрах и показателях тепловой работы доменной печи (рис.5). 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 прямопропорциональной линейной зависимостью.

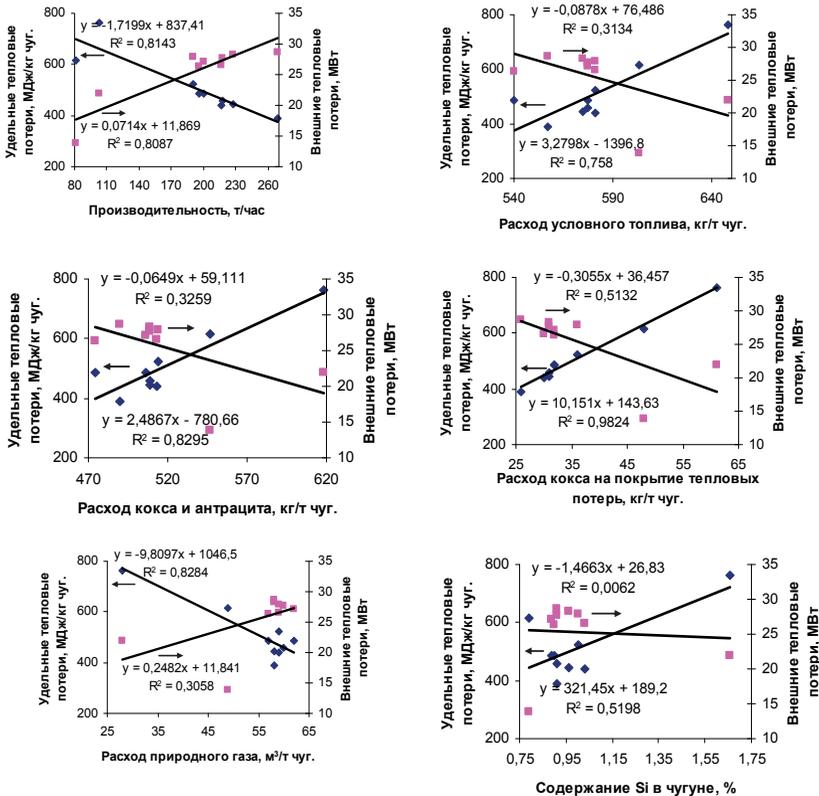


Рис.5. Взаимосвязь показателей тепловой работы доменной печи с абсолютной и удельной величиной тепловых потерь

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.

Исследования взаимосвязей тепловых нагрузок на ограждение ДП №9, режима и показателей тепловой работы печи выполнялись с привлечением теплоэнергетической модели И.Д.Семикина [1–4].

Анализ корреляционных взаимосвязей для различных временных периодов работы печи показал, что данные, отслеживающие изменение температурно–тепловых нагрузок на отдельные элементы конструкции ДП №9, являются локальными и могут давать существенное искажение об эффективности производства при изменении технологии (например, состава и параметров дутья, и топливных добавок к нему, качества сырья, доли окатышей и т.п.). Однако эти параметры являются перспективными для отслеживания расстройств и неполадок в работе печи.

Интегральными параметрами, которые показали себя наиболее надежными 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 [1–4]. 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 советника–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 «расстройства» в работе печи (рис.6):

- 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.

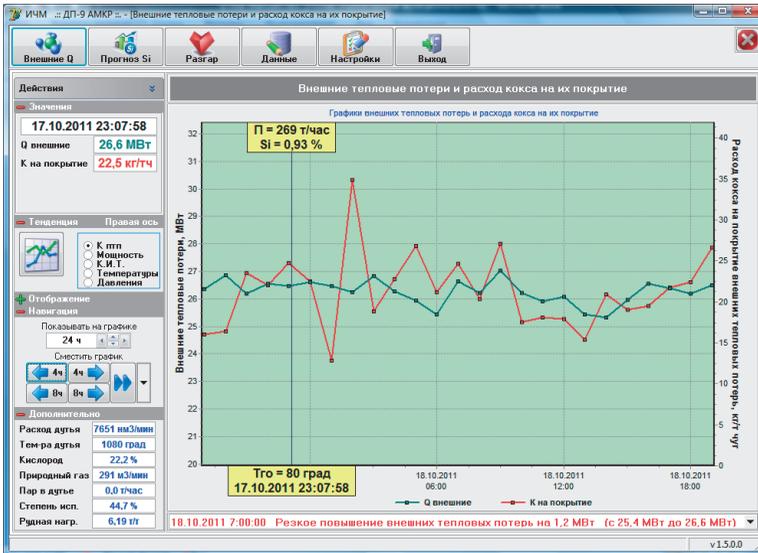


Рис.6. Пример предупреждающего сигнала о резком увеличении (уменьшении) внешних тепловых потерь на видеокадре внешние тепловые потери и расхода кокса на их покрытие

Оценить связаны или нет разогрев (похолодание) печи с изменением тепло–газодинамического режима ведения доменной плавки позволяют вспомогательные видеокадры (рис.7–8):

- 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.

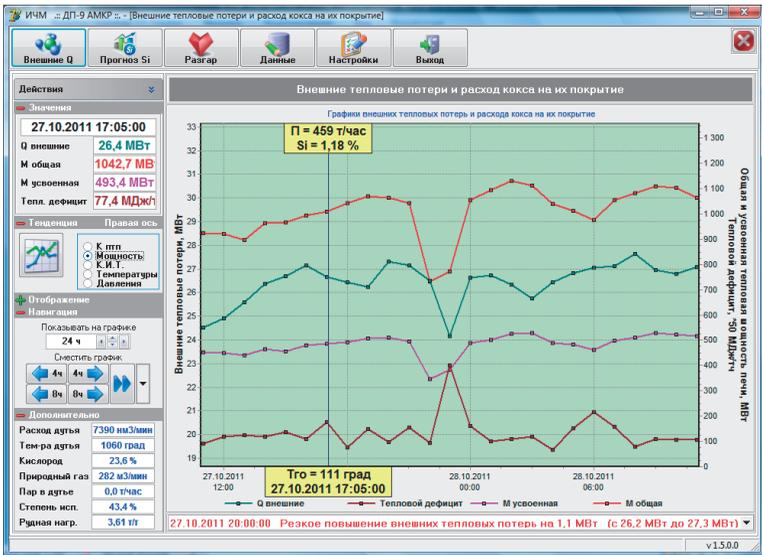


Рис.7. Пример видеокadra «Общая и усвоенная тепловая мощность, тепловой дефицит»

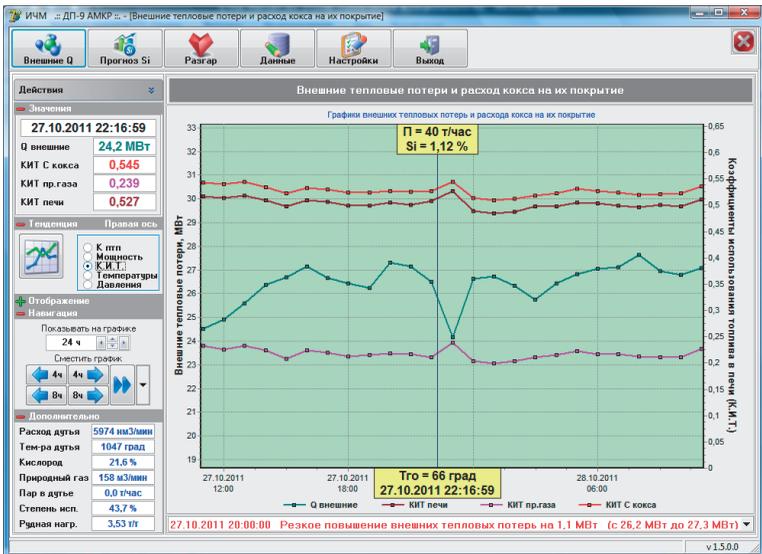


Рис.8. Пример видеокadra «Коэффициент использования теплоты топлива (KIT)»

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 заплечиков (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), канальный 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.

**Заключение.** Разработана и реализована в составе АСУ ТП ДП №9 ПАО «АМКР» подсистема «Контроль внешних тепловых потерь и расход кокса на их покрытие». Заложена основа для внедрения в составе АСУ ТП доменной печи подсистемы «Контроль тепловой работы печи», которая будет работать в режиме советчика–мастера по выбору рациональных управляющих решений, корректирующих тепловой и газодинамический режимы ведения доменной плавки.

Реализация в составе АСУ доменных печей комплексных теплоэнергетических показателей (тепловые мощности и коэффициенты использования теплоты топлива по зонам печи, тепловой дефицит чугуна), характеризующих тепловой баланс доменной плавки и имеющих четкий физический смысл, позволит гармонично дополнить операцию «шихтовки» (материальный баланс), и, тем самым, повысить надежность принятия научно–обоснованных решений по выбору рационального режима ведения доменной плавки за счет своевременного обнаружения и оценки причин отклонений в тепловом режиме работы печи.

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

При проектном, устойчивом режиме работы за счет уменьшения тепловых потерь в системе охлаждения на доменной печи имеются резервы уменьшения расхода кокса на ~2–6 кг/ т чугуна и более. Информация об изменении величины тепловых потерь позволяет также анализировать и прогнозировать расход кокса на покрытие внешних тепловых потерь при длительных остановках печи с привлечением информации о величине общей и усвоенной тепловой мощности печи, КИТ и теплового дефицита чугуна.

1. Семикин И.Д. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов / И.Д.Семикин, С.И.Аверин, И. И.Радченко – М.: Металлургия, 1965. – 391с.
2. 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.
3. Демин Г.И. Тепловая работа доменных печей / Г.И.Демин // Доменное и агломерационное производство. Сб. трудов. – Москва, Днепропетровск, 1940. – Вып. 8. – С.119–131.
4. Домна в энергетическом измерении / [А.В.Бородулин, А.Д.Горбунов, В.И.Романенко, Г.И.Орел]. – Кривой Рог: СП «Мир», 2004. – 412с.
5. Кожух В. Я. Контроль потерь тепла в доменной печи / В.Я.Кожух // Сталь. – 1965. – №4. – С.298–301.
6. Доменное производство «Криворожстали». В.И.Большаков, А.В.Бородулин, Н.А.Гладков и др. / Кривой Рог: Издательство СП «Мира» – 2004г., 376с.
7. 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.
8. Новые методы контроля технического состояния ограждения доменных печей без останова технологического процесса / В.И.Большаков, С.П.Сущев, А.Л.Чайка, А.А.Суслонов, А.Б.Юрьев, С.Ф.Бугаев, Г.В.Панчоха, А.В.Бородулин // ОАО «Черметинформация» Бюллетень «Черная металлургия» 2006 г. – №6. – С.27–38.
9. Чайка А.Л. / Контроль состояния ограждения доменных печей с использованием термограмм // Металлургическая и горнорудная промышленность №4, – 2008, С.109–111.
10. Наружные потери теплоты доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup>/ А.В.Бородулин, К.А.Дмитренко, В.С.Листопадов, Г.В.Панчоха, А.Л.Чайка, С.Т.Шулико // Металлургическая и горнорудная промышленность №1, – 2005, С.3–8.

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

***О.Л.Чайка, Д.В.Пінчук, С.В.Кетлер, О.І.Швачка, О.А.Сохацький***  
**Перспективи використання теплоенергетичних параметрів доменної плавки в складі АСУ ТП доменної печі**

Метою роботи є розвиток теплотехнічних основ використання на практиці теплоенергетичних параметрів роботи доменної печі. Розроблено і реалізовано у складі АСУ ТП ДП №9 «АМКР» підсистему «Контроль зовнішніх теплових витрат і витрат коксу на їх покриття», що дає змогу отримувати інформацію про зовнішні теплові втрати і витрати коксу на їх покриття, тепловий баланс доменної плавки, оперативно визначати та оцінювати раціональність теплового режиму роботи печі. Показано можливість аналізу і прогнозування витрат коксу під час довгострокових зупинок печі, визначення загальної та накопиченої теплової потужності печі, КВТ і теплового дефіциту чавуну.