

В.И. Головки, О.Н. Кукушкин, Н.В. Михайловский, А.В. Потапов,
А.Ф. Хасянов, В.В. Смоктий

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛУРГИИ НА ОСНОВЕ МИКРОВОЛНОВОЙ ТЕХНИКИ

Важнейшим направлением развития металлургии является автоматизация контроля и управления технологическими процессами с применением компьютерной техники. Это определяет возможность достижения значительного экономического эффекта за счет сокращения расхода сырья, топлива, энергии и повышения качества продукции в условиях высокой материало- и энергоемкости металлургических процессов.

Сдерживающими факторами автоматизации в металлургии являются [1] разнообразие технологических процессов и агрегатов доменного и сталеплавильного передела в условиях непрерывного поточного производства при воздействии разнообразных внешних факторов, отсутствии или недостаточном качестве автоматического контроля технологических параметров из-за сложности физико-химических процессов и критических техногенных условий.

Системы контроля уровня материалов в обогатительном, агломерационном, коксохимическом, огнеупорном производствах достигают 90 % всех средств контроля технологических параметров. Степень оснащения оборудования средствами для определения уровня и возможность их использования оцениваются как неудовлетворительные [1]. Подлежит замене, совершенствованию или разработке более 60 % всей номенклатуры существующих средств измерения уровня. Они не отвечают требованиям широкого применения из-за недостаточной универсальности по назначению и диапазону измерений, низкой надежности, инерционности и значительной погрешности измерений, низкой помехозащищенности, радиоактивной опасности и относительно высокой стоимости. По этой причине на металлургических предприятиях затруднено решение вопросов учета, ресурсосбережения и управления запасами сырья.

Дальнейший рост производственных показателей металлургических агрегатов невозможен без внедрения современных информационных технологий, так как наблюдаемость многих параметров не удовлетворяет требованиям управления, а ряд важнейших из них не контролируется из-за отсутствия соответствующей измерительной техники. Развитие информационного обеспечения АСУ ТП в металлургии связано с решением следующих задач [2]:

- замены широко распространенной радиоизотопной техники на экологически чистые средства измерения;

- профилеметрии засыпи шихты на колошнике доменной печи;
- мониторинга и оперативной оценки динамики состояния поверхности металлургических расплавов для управления конвертерной плавкой, процессов вакуумирования, рафинирования, разливки и транспортирования жидкого металла;
- мониторинга состава, свойств и соотношения металлической, шлаковой и газовой фаз в ходе конвертерной плавки;
- определения крупности компонентов шихты в потоке для формирования ее порций и их смесей;
- оценки влажности огнеупоров с целью рационализации режимов сушки покрытий металлургических агрегатов.

Для решения поставленных задач перспективным в условиях металлургического производства является применение микроволновой техники (МКВ) техники [3]. Преимущества МКВ техники определяются ее быстродействием, бесконтактностью измерений, отсутствием подвижных узлов, возможностью зондирования проводников и диэлектриков, диа-, пара- и ферромагнетиков в широком диапазоне кусковатости материалов (5...300 мм) и их влажности до 100%, независимо от локальных колебаний плотности и химического состава веществ, при безопасной для обслуживающего персонала мощности излучения радиосигнала до 20 мВт.

Использование в МКВ системах для металлургии радиолокационного принципа с качающейся частотой излучения радиосигнала 37,5 ГГц (длина волны 8 мм) определяется незначительным ослаблением мощности радиоизлучения даже при максимальной концентрации ($0,25 \text{ кг/м}^3$) металлургической пыли в условиях работы при температуре от -40 до $+1700^\circ\text{C}$ (с учетом дополнительной защиты аппаратуры по месту измерения), давлении до 0,4 МПа, разрежении до 1 мбар, количестве отходящих газов до $3000 \text{ м}^3/\text{мин}$, а также несущественным влиянием на работу системы атмосферных, промышленных газов, водяных паров и ионизации пылегазовой среды.

Контрольная величина обнаружения отраженного сигнала определена в 80 дБ, ширина диаграммы направленности антенны (по уровню половинной мощности) 6 град, частота девиации в пределах 750 МГц, период модуляции не менее 0,01 с, измеряемое расстояние до 30 м с погрешностью 0,05 м. Разработанный образец радиолокационной системы имеет диаметр апертуры антенны 100 мм, моноблочное исполнение сенсорной и обрабатывающей частей при массе 3 кг. Он отличается автоматическим термостатированием, возможностью оперативного изменения чувствительности, постоянной времени изменения показаний, переградуировки и передачи информации в цифровом виде по интерфейсу RS-485.

Конкретизация параметров радиолокатора базируется на анализе отношения отраженной электромагнитной энергии к излученной $P_{\text{пер}}$. При

одних и тех же значениях $R_{пер}$ и расстояния для различных материалов относительное изменение величины R_0 отражательной способности может быть определено отношением значений напряженности отраженного электромагнитного поля $E_{пр}$ принимаемых сигналов. В более простом варианте величина R_0 может быть оценена отношением среднеквадратических значений напряжения $U_{пр}$, пропорциональных $E_{пр}$, относительно базового объекта измерения [3].

Проверка технических возможностей системы контроля уровня металлургических материалов выполнена на основе анализа величины R_0 материалов при нормальном падении электромагнитной волны [4]. Собственная оценка R_0 базовых объектов проводилась относительно напряжения $U_{пр}$. Зависимости $U_{пр}$ от расстояния H_m (в диапазоне от 1 до 10 м) определены для базовых объектов сравнения: (уголкового отражателя – $U_{пр}^{y0}$, металлического экрана – $U_{пр}^{\partial}$, бетонной поверхности – $U_{пр}^B$) полиномами третьего порядка (при коэффициенте детерминированности $R_d^2 = 0,90...0,97$) соответственно в виде

$$U_{пр}^{y0} = 0,0038 H_m^3 - 0,141 H_m^2 + 0,921 H_m + 0,136 , \quad (1)$$

$$U_{пр}^{\partial} = 0,0032 H_m^3 - 0,073 H_m^2 + 0,430 H_m + 0,246 , \quad (2)$$

$$U_{пр}^B = 0,0032 H_m^3 - 0,006 H_m^2 + 0,348 H_m + 0,092 . \quad (3)$$

Установленные значения R_0 металлургических материалов превышают значение 0,001 (–60 дБ), что определяет возможность приема отраженных радиосигналов на расстояниях до 10 м. Аналогичные результаты получены для кокса, агломерата и окатышей при увеличении до 40° угла падения радиолуча на поверхность сыпучего материала. Важным результатом является также возможность идентификации вида исследуемых материалов.

Влияние пылевой помехи на процессы радиолокации моделировалось на бункерной установке с расстоянием до цели 5,5 м. Пылевая помеха представляла смесь железорудного концентрата, угольной и колошниковой пыли, которая подавалась воздушным потоком (концентрация пыли достигала 300 г/м³) поперек направления радиолуча. Установлено [4], что погрешность измерения расстояния в этих условиях не превышала 0,05 м, хотя наблюдалось эпизодическое снижение амплитуды отраженного сигнала (в среднем на 5 дБ).

Исследования радиолокации при динамическом состоянии объекта отражения выполнены на стендовой установке по поверхности модельной жидкости (2% водный раствор поваренной соли). Амплитуда колебаний этой поверхности доводилась до 6 см, а характер волнения до хаотичного, то есть имитировались критические условия отражения радиоволн. Установлено [5], что снижение погрешности определения расстояния достигается сужением спектрального окна наблюдения радиолокационной обстановки с одновременной компенсацией помехи в общем спектре.

Опробование контроля уровня в промышленных условиях реализовано в бункерах, угольных силосах и шахтной печи обжига известняка, заполненных ферросплавами, агломератом, магнезитом, известняком,

величины $V'_{\text{дм}} = 2\pi \cdot n_{\text{б}} \cdot (R_{\text{б}} + h_{\text{к}}) \cdot \cos \alpha_{\text{б}}$ предпочтительным является определение размера куска в момент его появления в угле $\alpha_{\text{ц}}$. Тогда при $L_{\text{з}} = \text{const}$ и максимальном размере куска h_{max} можно определить в указанный момент времени угловые положения $\alpha'_{\text{к}}$ в ДНА при данных величинах $h'_{\text{к}}$ из равенства

$$h'_{\text{к}} \cdot \sin(\alpha_{\text{ц}} + \alpha'_{\text{к}} - \rho_{\text{д}}) / \sin \alpha_{\text{к}} = h_{\text{max}} \cdot \sin(\alpha_{\text{ц}} + \alpha_{\text{д}} - \rho_{\text{д}}) / \sin \alpha_{\text{д}}. \quad (5)$$

В результате с учетом (4), (5) и выражения $V_{\text{д}} = f_{\text{д}} \cdot c / (2 \cdot f_{\text{изл}}) = f_{\text{д}} / 250$ ($f_{\text{изл}} = 37,5$ ГГц, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с) при совмещенном излучателе и приемнике, неподвижных относительно перемещающегося объекта, градуировка системы определится зависимостью

$$f'_{\text{д}} = 500 \cdot \pi \cdot n_{\text{б}} (R_{\text{б}} + h'_{\text{к}}) \cdot \sin(\alpha_{\text{ц}} - \rho_{\text{д}} + \alpha'_{\text{к}}). \quad (6)$$

Согласно (6), эпюре величин $h'_{\text{к}}$ материала соответствует положение спектральных линий сигнала. Однако, мониторинг точек кусков, одновременно находящихся в пределах ДНА, проблематичен из-за неоднозначности оценки величины $h'_{\text{к}}$. Этот недостаток был исключен применением селекции частотных составляющих в процессе анализа измерения радиосигнала.

Проверка разработанного способа радиолокационной кускометрии выполнена в режиме реального времени с применением имитаторов движущегося материала. Использование параметра $f_{\text{д}}$ для определения $h'_{\text{к}}$ проверено по рельефной поверхности с выступами высотой 35 мм, расположенными на расстоянии 50 мм друг от друга по окружности барабана (скорость вращения 1,7 м/с). Основой алгоритма является определение момента увеличения максимальной частоты $f_{\text{д}}$ текущего спектра по сравнению с предыдущим. Установлено, что погрешность фиксации высот профилированной поверхности (на расстоянии до 3,5 м от оси барабана) не превышала 5 мм.

Опробование на реальном материале (кокс фракций 20...40 мм; 40...80 мм; 80...120 мм) выполнено при моделировании прямолинейного движения кусков кокса (линейная скорость 0,78 м/с) на карусельном имитаторе диаметром 1,3 м. Использовалась микроволновая система (апертура антенны 40 мм), расположенная вертикально на расстоянии 0,2 м от поверхности кокса с целью снижения потерь энергии и минимизации пятна радиолуча на зондируемой поверхности. Установлено [7], что характеристики радиосигнала и форма его спектра существенно зависят от движущихся фракций кокса. Увеличение значений $U_{\text{ск}}$, $f_{\text{ср}}$, b_1 , b_2 , n однозначно связано с увеличением фракций кокса. Наиболее чувствительным параметром для четкой идентификации фракций кокса является относительная асимметрия b_1 , средняя величина которой для заданных фракций кокса составляла соответственно – 0,49; 0,82 и 1,23.

Профиллограмма поверхности засыпи шихты в доменных печах (ДП) определяется последовательностью точек с координатами X_i, Y_i вдоль линии сканирования. В режиме прямой видимости величины X_i и Y_i , с учетом текущих значений угла поворота α_{pi} сенсорного блока (СБ) системы и измеренного расстояния H_{pi} , равны

$$\begin{cases} X_i = R_{п} - \Delta x - H_{pi} \cdot \sin(\alpha_{pi} + \psi_{н}), \\ Y_i = H_{pi} \cos(\alpha_{pi} + \psi_{н}) - \Delta y, \end{cases} \quad (7)$$

где $R_{п}$ – радиус колошника доменной печи; $\Delta x, \Delta y$ – расстояние от оси вращения СБ до стенки печи и нулевого уровня засыпи шихты; $\psi_{н}$ – начальный угол установки СБ относительно вертикали.

Для расширения обзора поверхности засыпи в стесненных условиях колошника ДП предложено использовать переотражатель радиосигнала [8]. Расчет координат X_i, Y_i выполнен с использованием плоского переотражателя с учетом мнимой оси вращения СБ, образованной пересечением радиолучей за поверхностью переотражателя и соответствующей корректировки значений $\Delta x, \Delta y$ (рис. 2)

$$\begin{aligned} \Delta x' &= (\Delta x \pm l_x \mp h_{пер} \cdot \operatorname{ctg} \gamma_{п}) \cdot (1 - \cos 2\gamma_{п}) - \Delta x, \\ \Delta y' &= \Delta y - (\Delta x \pm l_x \mp h_{пер} \cdot \operatorname{ctg} \gamma_{п}) \cdot \sin 2\gamma_{п}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $h_{пер}$ – расстояние по вертикали от точки подвеса переотражателя до оси вращения СБ (на рис. 2 – $h_{пер} = 0$); $\gamma_{п}$ – угол наклона переотражателя относительно горизонтали; l_x – расстояние по горизонтали от стенки печи до точки подвеса переотражателя.

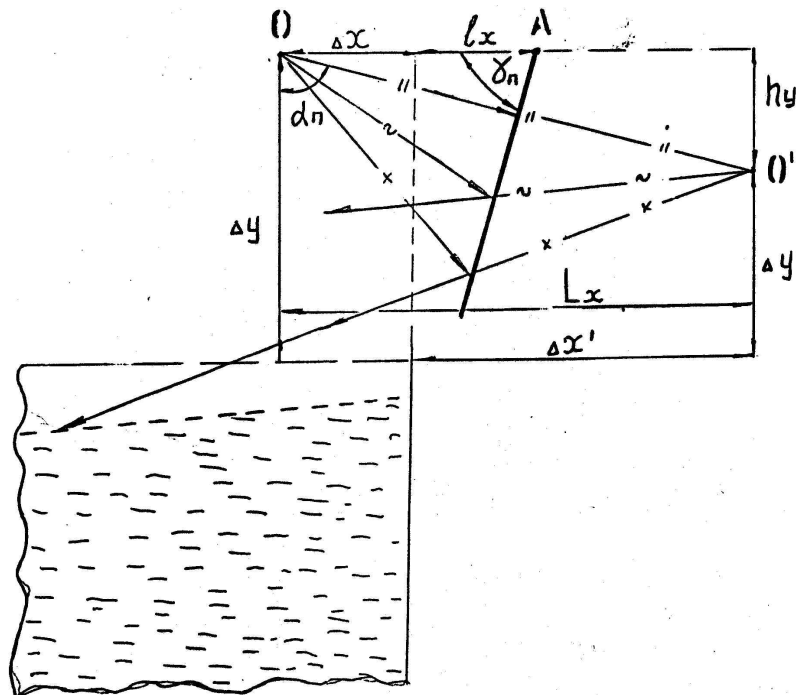


Рисунок 2 - Определение профиля поверхности с переотражателем радиосигнала

Информация о профиле поверхности используется далее для расчетов скорости схода и толщины слоев шихты, рассогласования фактического и заданного профилей поверхности засыпи, ее углов откоса, вида материала и поверхностной его неравномерности. Скорость схода шихты в заданных точках диаметра печи определялась отношением приращения значений ординат Y_i начального и последующих профилей засыпи каждой порции шихты к времени между их измерением, толщина слоя – по разнице значений Y_i ее начального профиля и заключительного профиля предыдущей порции шихты, а величина рассогласования – по разнице значений Y_i начального и заданного профилей поверхности засыпи каждой порции шихты.

Расчет углов откоса поверхности материала основан на определении групп значений X_i, Y_i , характеризующих тенденцию формирования этих углов при заданной технологической погрешности J_k . При выполнении условия $\Delta Y = |Y_2 - Y_1| \leq J_k$ величины Y_2 и Y_1 усредняются. Значение среднего арифметического Y_{2cp} сравнивается с последующей величиной Y_i . Усреднение продолжается до момента нарушения этого условия, что определяет первую группу n значений Y_i с усредненной величиной Y_n^{cp} на участке $\Delta X_n = X_n - X_0$. Аналогичным образом формируются последующие группы чисел Y_i , разность усредненных значений J_k и очередной величины ординаты которых превышает значение J_k . Отношение разницы усредненных значений Y_i предыдущего и последующего участков к длине этого участка профиля определяет тангенс угла γ_{ni} откоса поверхности.

Вид материалов на поверхности засыпи шихты устанавливается [9, 10] в процессе сравнения по ходу сканирования текущей величины $U_{пр}^i$ с предварительно полученными значениями этого параметра (в качестве эталонного) при соответствующих углах скольжения β_c^i и расстоянии H_p^i . Достижение равенства при сравнении величины $U_{пр}^i$ определяет вид материала. При этом

$$\beta_c^i = \arccos \left[\frac{(H_p^i)^2 + (C_u^i)^2 - (H_p^{i-1})^2}{2 \cdot H_p^i \cdot C_u^i} \right], \quad (9)$$

$$C_u^i = \sqrt{(H_p^{i-1})^2 - 2 \cdot H_p^{i-1} \cdot H_p^i \cdot \cos \alpha_{ni} + (H_p^i)^2}. \quad (10)$$

Оценка поверхностной неравномерности засыпи шихты основана на анализе радиусов описанных окружностей кривой выпуклостей и впадин поверхностных кусков материала. Каждый элемент кривой можно представить частью окружности с радиусом R_i^k , определяемой по каждым трем последовательным значениям X_i, Y_i с величиной приращений $\Delta X_i, \Delta Y_i$. Радиус $R_i^k = D_i / (2 \cdot \sin \psi_i^k)$ описанной окружности с хордой D_i и дугой ψ_i^k определяется с учетом выражений (рис. 3)

$$\psi_i^k = \arccos \left(\frac{G_i^2 + G_{i+1}^2 - D_i^2}{2 \cdot G_i \cdot G_{i+1}} \right), \quad (11)$$

$$G_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2}; G_{i+1} = \sqrt{\Delta X_{i+1}^2 + \Delta Y_{i+1}^2}, \quad (12)$$

$$D_i = \sqrt{(\Delta Y_i + \Delta Y_{i+1})^2 + (\Delta X_i + \Delta X_{i+1})^2}. \quad (13)$$

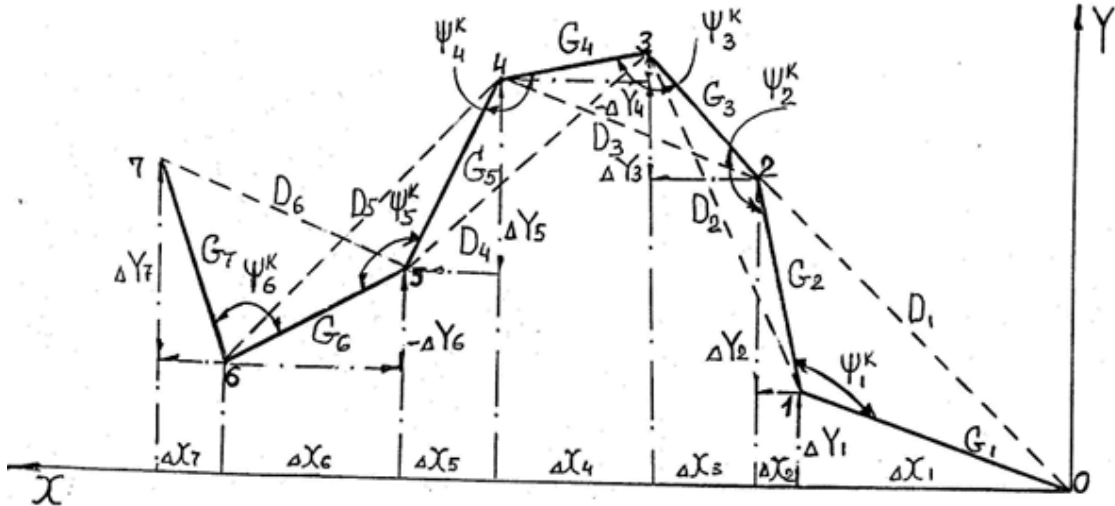


Рисунок 3 - Определение поверхностной неравномерности материала

В результате анализа экспериментальных данных сканирования поверхности шихтовых материалов установлено, что применение микроволновой локации является технически реализуемым и перспективным. Уверенное определение профиля поверхности шихты достигается с погрешностью измерения меньше допустимой величины (0,2 м), при углах скольжения радиолуча ≥ 15 град и колебаниях углов откоса на отдельных участках поверхности от -50 до $+40$ град.

Характер изменения величины $U_{пр}$ демонстрирует четкое отличие кокса от рудной части шихты для определения вида материала. Время сканирования не является ограничивающим фактором при работе радиолокационной системы, что установлено при снижении периода сканирования с 88 с до 2,4 с.

Выполненное опробование автоматизированного режима работы макета профилемера для доменной печи объемом 1513 м^3 комбината «Запорожсталь» с применением плоского переотражателя определило, что абсолютное отклонение расстояния при радиолокационном и метрическом измерении составило 0,029 м (при допуске 0,1 м), а расчетные углы откоса материала соответствовали фактическим.

Однако, стесненные условия колошника ДП не позволят реализовать большую зону сканирования, а установить в рабочем пространстве ДП переотражатель невозможно. Поэтому с учетом полученных результатов разработан профилемер веерного типа. Определение профиля засыпи шихты в этом варианте обеспечивается по результатам мониторинга уровня шихты в отдельных зонах по двум взаимно перпендикулярным диаметрам колошника печи.

Промышленные испытания радара с целью профилометрии впервые проведены на доменной печи объемом 5000 м^3 комбината «Криворожсталь» [11]. Установлено, что устойчивый отраженный радиосигнал достоверно характеризует уровень засыпи шихты. Зафиксированный диапазон изменения глубины воронки засыпи (по оси печи) изменялся от 0 до 8 м относительно нулевого уровня шихты. Полученные данные соответствуют существующим технологическим представлениям о ходе доменной плавки. Технические характеристики радара и средств его защиты позволяют успешно использовать его в составе автоматизированной системы определения профиля поверхности [12].

Возможность определения уровня расплава в конвертере для создания динамической АСУ плавкой основана на результатах опробования радиолокации в ходе экспериментальных плавки на 1,5-тонном конвертере ИЧМ НАНУ. Измерениями установлено, что по спокойной ванне погрешность измерения не превышала 0,05 м, а при ее вспененном состоянии – 0,2 м. С учетом результатов опробования основными требованиями к функционированию системы в промышленных условиях определены: погрешность измерения по спокойной ванне – не хуже 0,05 м, измеряемое расстояние – до 30 м, установка СБ в теплопылезащитном устройстве по условиям эксплуатации (механические воздействия, температура расплава – до 1700°C , запыленность – до 200 г/м^3 , длительность продувки – до 20 мин).

Промышленные испытания системы проведены на 150-тонном конвертере Челябинского металлургического комбината [13]. В результате исследований установлено, что системой однозначно фиксировались все изменения положения конвертера при устойчивом по расстоянию и мощности радиосигнале. Погрешность измерения по днищу футеровки конвертера и реперным точкам (срез горловины, днище перевернутого конвертера) не превышала 0,03 м. Достоверно определялся износ футеровки по мере увеличения количества плавки, а также уровень зеркала спокойной ванны после заливки чугуна и во время выдержки плавки. Положение кислородной фурмы и изменение расхода кислорода в диапазоне от 200 до $400 \text{ м}^3/\text{мин}$ (на порожнем конвертере в горячем состоянии и после завалки металлолома), а также интенсивное образование густого бурого дыма, высокой запыленности, наличие факела и россыпи искр не оказывает существенного влияния на показания расстояния, а отраженный от объекта зондирования радиосигнал значительно превышает уровень этих помех. С учетом полученных результатов положение кислородной фурмы в дальнейшем устанавливалось оператором по глубине металлической ванны, определяемой как разность расстояний до зеркала спокойной ванны (перед сливом металла) и до поверхности шлака (после выпуска стали).

Исследование работы радиолокационной системы при продувке конвертерной ванны обеспечивалось решением задач анализа спектральных, энергетических и статистических характеристик

радиосигналов. В результате установлено, что кривые изменения уровня ванны достоверно отражают ход плавки и в достаточной степени отвечают существующим представлениям и визуальным наблюдениям. Надежность информации об уровне вспененной ванны была определена соответствием показаний системы на отметке среза горловины конвертера при выбросах и переливах шлака. Четко фиксировались моменты остановки продувки (например, при перегреве котла–утилизатора). Однозначно отслеживалось изменение уровня из-за реакции вспененной ванны на управляющие воздействия (подача сыпучих материалов, изменение расхода кислорода и положения фурмы). При сильно вспененной ванне эффективность воздействий снижается: ванна достаточно быстро возвращается в прежнее вспененное состояние. Уверенное определение уровня ванны в процессе ее вспенивания достигается в диапазоне уровня до 1 м от среза горловины.

Для оперативного представления информации в режиме реального времени, прогноза выбросов расплава из конвертера, а также с целью повышения чувствительности и обеспечения контроля функционирования системы она была оснащена ПЭВМ. Прогноз управляющих воздействий осуществлялся на основе равенства прогнозируемого времени $t_{сп}$ на заполнение расплавом свободного пространства конвертера и заданного времени t_T управляющих воздействий. Величина $t_{сп}$ является следствием изменения уровня H_T и скорости V_T уровня расплава.

Внедрение этого способа [14] обеспечило возможность осознанного выбора оператором технологического воздействия по управлению уровнем расплава в функциональной связи с конкретными технологическими условиями плавки на основе отображения хода продувки в реальном времени.

Характерная кривая процесса продувки приведена на рис. 4. Измерение уровня ванны в этом случае осуществлялось после начала продувки. Отличием этой плавки является интенсивное кипение расплава после продувки и его осаждение. Положительные результаты эксплуатации системы предопределили оснащение аналогичными системами 300-тонных конвертеров строящегося цеха меткомбината «Запорожсталь».

Микроволновый мониторинг процесса шлакообразования проводился для определения мощности отраженного сигнала [15]. Зондирование ванны осуществлялось на 0,3–тонном конвертере ИЧМ НАНУ с пассивным переотражателем над горловиной конвертера для изменения направления радиолуча с горизонтального на вертикальное. Для получения шлаков с различными физико–химическими свойствами варьировали параметры дутьевого режима в широком диапазоне, доводя ход продувки до выбросов.

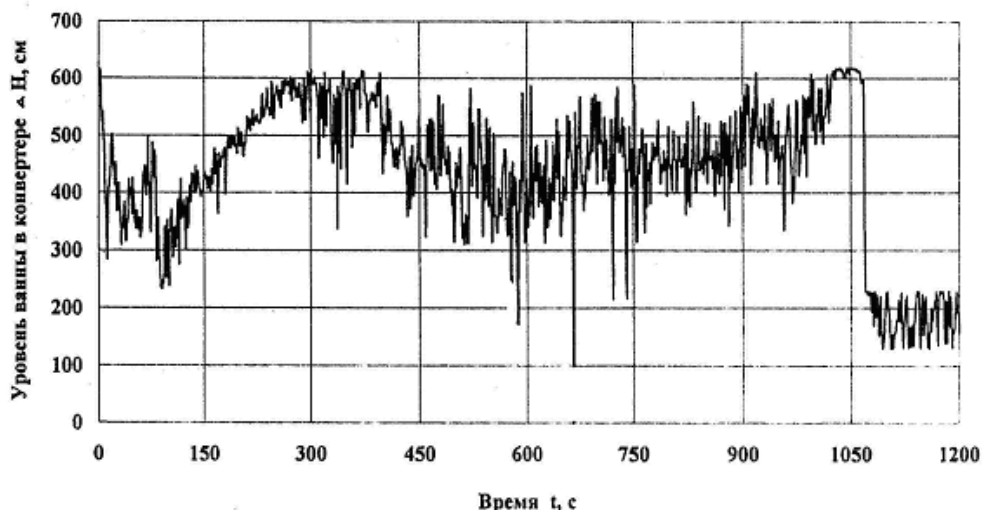


Рисунок 4 - Изменение уровня расплава по ходу плавки

Анализ связи параметров радиолокационного зондирования с характеристиками шлаков проводился по величине R_0 . Установлено, что величина R_0 при локации поверхности жидкого чугуна практически соответствует значению ее для металлического листа. Выбросы из конвертера продуктов плавления возникают при величине $R_0 < 0,3$, что может служить определенным критерием хода плавки. Согласно полученным регрессионным зависимостям R_0 (при коэффициенте корреляции не ниже 0,8) с увеличением в шлаке содержания $Fe_{общ}$ коэффициент отражения шлака снижается. Это соответствует параметрам дутьевого режима плавки, приводящих к увеличению склонности шлака к вспениванию и выбросам по ходу продувки [15].

Коэффициент отражения шлака имеет тенденцию к уменьшению при увеличении содержания компонентов, разжижающих шлак и способствующих его обезуглероживанию и вспениванию. Вместе с этим, при увеличении содержания основных окислов отражение радиосигналов возрастает. Интенсивность отражения радиосигналов от шлака уменьшается при снижении поверхностного натяжения, температуры плавления и плотности. Таким образом, с достаточно высокой вероятностью величина отраженного сигнала может комплексно характеризовать состав, свойства, состояние конвертерного шлака и, следовательно, ход плавки. Полученные зависимости определены на четырех опытных плавках и требуют уточнения в ходе промышленных экспериментов.

Характерной особенностью при ковшевой вакуумной дегазации металла является интенсивное вспенивание расплава с резким изменением его уровня и выбросами из ковша. В этой связи контроль уровня расплава является важнейшим условием нормального протекания процесса (особенно при недостаточном запасе высоты «свободного» борта ковша). С учетом отмеченных особенностей, исходные параметры системы контроля уровня были получены путем математического моделирования до пуска комплекса

вакуумирования стали для ОАО «Нижеднепровский трубопрокатный завод» (НДТЗ).

При моделировании поведения расплава установлено: при времени вакуумирования до 6 мин и подаче аргона в интервале от 50 до 200 л/мин изменение уровня металла в ковше (только при учете удаления водорода) колеблется от 0,22 м до 0,91 м. При уменьшении запаса высоты «свободного» борта ковша до 0,5 м процесс вакуумирования становится критическим. Рациональным управлением является резкое увеличение давления в вакуум-камере, что вызовет снижение уровня расплава (по меньшей мере на 0,12 м) и затем набор вакуума до заданной величины при одновременном снижении расхода аргона с 200 л/мин до 40 л/мин. При максимальной скорости подъема ванны ($v_{\text{п}} = 5$ мм/с) и величине $\tau_{\text{уп}} = T_{\text{уп}}$ (принята равной 5 с) допустимая погрешность системы составляет 0,09 м.

Модернизированный образец радиолокационной системы с опорным каналом для снижения погрешности измерения был внедрен на НДТЗ в составе комплекса вакуумирования стали [16]. Привязку всех элементов системы к объекту по нашему заданию выполнила фирма MESSO (Германия) как поставщик основного оборудования. Погрешность измерения уровня составляла не более 0,02 м. Для уменьшения помех система включала пространственную фильтрацию (угол раскрыва диаграммы направленности антенны 3°), аналоговую фильтрацию сигналов по расстоянию до 1,5 м, узкополосный спектральный анализ, корректировку расстояния по заданным точностным характеристикам опорного канала.

Радиолокационная система определения уровня в промежуточном ковше (промковше) была опробована на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) Днепровского меткомбината. Измерения выполнялись с ретрансляцией сигналов под углом 90° относительно горизонтальной оси СВ. Диапазон измеряемых расстояний 2,5...4,0 м. Погрешность измерения не превысила 0,03 м. Динамика уровня расплава в промковше соответствовала управляющим воздействиям. Так, при переходе разливки металла с одного стальной ковша на другой показания системы четко идентифицировали изменение и последующую стабилизацию уровня в промковше.

На основе апробированных решений по применению радиолокации металлургических расплавов разработана также установка для контроля чугуна в миксеровозах меткомбината «Запорожсталь» с целью контроля износа футеровки горловины и подины.

Определение влажности микроволновыми методами исследовалось для контроля сушки футеровки стальной ковше (через выпарные отверстия). Макетный образец измерителя влажности (частота излучения 37,5 ГГц, апертура антенны 40 мм) был изготовлен по схеме СВЧ-влажномеров с опорным каналом и автоматическим поддержанием постоянства коэффициента усиления измерительного канала. В соответствии с

условиями применения измерителя в металлургии в основном исследовалась возможность определения влажности (до 15 %) при отражении радиосигнала от материала. В качестве материалов использовались темплеты (с гранями не менее 50 мм и толщиной 20 ± 2 мм) шамотного пенолегковеса типа ШЛ-04, глины марки ПЛГ-2, шамотного и силикатного кирпичей при изменении расстояния (до 400 мм) и угла их наклона (до 30°) относительно оси антенны.

В результате исследований установлено [17], что диапазон определяемой измерителем влажности не превышает 14 %, что связано с предельной его чувствительностью (60 дБ). При 5 %-ной влажности величина относительной погрешности ее измерения составляет 1,2 %, а при 13,4 %-ной влажности – 1,1 %, что не противоречит ее рекомендуемым величинам.

Наиболее приемлемым решением является подвод МКВ излучения непосредственно в зону контроля влажности с использованием волновода (сечением $7,2 \times 4,0$ мм²) вместо антенны. В этом варианте устойчивый прием отраженного сигнала наблюдается на расстоянии до 4 мм при углах наклона до 5° . Относительная ошибка измерений не более 1,1 %.

Результаты исследований и промышленные испытания обеспечили решение важной научно-технической проблемы создания радиолокационных систем контроля технологических параметров для замены радиоизотопной техники на экологически чистые средства для измерения уровня материалов в бункерах, профилометрии засыпи шихты на колошнике доменной печи, анализа динамики расплавов при управлении конвертерной плавкой и вакуумированием сталеразливочных ковшей. Разработаны принципы анализа взаимосвязи состава, свойств и соотношения металлической, шлаковой и газовой фаз конвертерной ванны, определения крупности компонентов шихтовых материалов в потоке и оценки влажности огнеупорного покрытия при сушке разливочных ковшей.

Полученные результаты использованы в проектах сталеплавильного комплекса металлургического комбината “Запорожсталь”, капитального ремонта доменных печей комбинатов “Криворожсталь”, “Запорожсталь”, “Азовсталь”.

Разработка и постановка на производство радиолокационного дальнотемера-уровнемера РДУ-Х2 обеспечивает расширение и углубление информационного обеспечения металлургических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов К.И., Шершевер М.А. Средства измерения, контроля и автоматизации технологических процессов, вычислительная микропроцессорная техника. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.
2. Возможности использования микроволновых методов измерения для контроля технологических процессов в черной металлургии / В.И. Головкин, О.Н. Кукушкин, В.В. Смоктий и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1995. – № 3. – С. 11–13.

3. Разработка и применение средств радиолокационного контроля технологических процессов / А.Г. Величко, В.И. Головки, О.Н. Кукушкин и др. // Сб. науч. тр. Национальной горной академии Украины. – № 11. – Том 2. – Днепропетровск: РИК НГА, 2001. – С. 177–180.
4. Определение отражения микроволнового излучения металлургическими материалами / О.Н. Кукушкин, В.И. Головки, В.В. Смоктий и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб науч. трудов. – К.: Наукова думка, 1995. – С. 171–175.
5. Возможности микроволновой техники для зондирования металлургических расплавов / О.Н. Кукушкин, В.И. Головки, Н.В. Михайловский и др. // Труды IX МНТК "Теория и практика кислородно-конвертерных процессов". Минпром Украины. – Днепропетровск.: ГМетАУ, 1998. – С. 15–16.
6. Оценка с помощью СВЧ-техники запасов сыпучих материалов в бункерах металлургических производств / В.И. Головки, О.Н. Кукушкин, Н.В. Михайловский и др. // Науч.-техн. сб.: Электронная техника. – Сер. 1, СВЧ-техника. – Вып. 1 (471). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1998. – С. 48–50.
7. Исследование возможности определения гранулометрического состава материалов в потоке методами микроволновой техники / О.Н. Кукушкин, В.И. Головки, Н.В. Михайловский и др. // Науч.-техн. сб.: Электронная техника. – Сер. 1, СВЧ-техника. – Вып. 1 (471). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1998. – С. 39–45.
8. Головки В.И. Определение профиля поверхности сыпучих материалов с помощью радара // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 6. – С. 15–17.
9. Радарный контроль крупности материала на конвейере / А.Г. Величко, В.И. Головки, О.Н. Кукушкин, Н.В. Михайловский // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2005», том 1. – Д.: НГУ, 2005. – С. 156–169.
10. Спосіб визначення параметрів засипки шихти в доменній печі: Деклараційний патент України на винахід № 43970А, МПК7 С21В7/24, G01R27/04 / О.Н. Кукушкин, В.І. Головки, М.В. Михайловський та ін. // Заявка №2000084615 від 01.08.2000; Оприлюднено 15.01.2002, бюл. № 1, 2002 р.
11. Испытания радиолокационной измерительной системы уровня засыпи шихты на доменной печи № 9 КГГМК "Криворожсталь" / В.И. Головки, А.А. Дударенко, Н.В. Михайловский и др. // Сборник научных трудов НГУ № 17, том 2. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2003. – С. 292–295.
12. Спосіб завантаження матеріалів в доменну піч: Деклараційний патент України на корисну модель № 2996, МПК7 С21В7/20 / В.І. Головки, О.М. Кукушкін, М.В. Михайловський та ін. // Заявка № 2004032335 від 30.03.2004; Оприлюднено 15.09.2004, бюл. № 9, 2004 р.
13. Промышленная эксплуатация системы измерения конверторной ванны на основе СВЧ-техники / В.В. Смоктий, В.И. Головки, А.Ф. Хасянов и др. // Труды 2-го конгресса сталеплавателей. – М.: Черметинформация, 1994. – С. 101–102.
14. Спосіб прогнозування керуючих дій у конвертері: Деклараційний патент України на винахід № 59270 А, МПК7 С21С5/30 / О.Г. Величко,

- О.М. Кукушкін, В.І. Головка та ін. // Заявка №20021210424 від 23.12.2002; Оприлюднено 15.08.2003, бюл. № 4, 2003 р.
15. Исследование принципиальной возможности микроволнового мониторинга состава и свойств конвертерного шлака / В.В. Смоктий, В.И. Головка, Л.А. Головка и др. // Науч.-техн. сб.: Электронная техника. – Сер. 1, СВЧ-техника. – Вып. 1 (471). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1998. – С. 25–30.
 16. Контроль уровня расплава в ковшевом вакууматоре / В.В.Смоктий, В.И.Головка, В.К.Гулый и др. // Сталь. – 1996. – № 12. – С. 20–21.
 17. Определение влажности огнеупорных металлургических материалов микроволновым скатерометром / В.И. Головка, А.В. Потапов, О.Н. Кукушкин и др. // Науч.-техн. сб.: Электронная техника. – Сер. 1, СВЧ-техника. – Вып. 1 (471). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1998. – С. 32–39.