

## МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТИЧНОЙ ЗОНЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Пластичная зона в доменной печи является одним из важнейших элементов структуры столба шихтовых материалов. Ее форма и положение определяют характер распределения газового потока, эффективность преобразования энергии и массообмен в доменной печи, оказывая тем самым существенное влияние на производительность, экономические показатели работы и длительность кампании печи [1]. Для определения формы и положения пластичной зоны в доменной печи применяют методы прямого контроля с использованием зондирования [1], измерений потерь напора по высоте печи [2], а также математические модели [3]. Ни один из известных методов не позволяет определять форму и положение пластичной зоны в оперативном режиме на работающей печи. Установка на доменных печах современных стационарных систем контроля поверхности засыпи шихты открывает перспективы комплексного использования получаемой ими информации для выявления новых закономерностей и связей процессов, протекающих в доменной печи, с последующим их применением для прогнозирования хода доменной плавки, а также разработки новых методов контроля, в том числе элементов структуры столба шихтовых материалов [4].

В результате выполненных с помощью разработанной в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова Национальной академии наук Украины многозонной математической модели процессов доменной плавки [5] аналитических исследований положения пластичной зоны в доменной печи и его связи с показаниями системы измерения профиля поверхности засыпи материалов установлено, что изменение величины насыпного объема слоев железорудных материалов в зоне размягчения и плавления определяет скоростные характеристики опускания различных участков поверхности засыпи, регистрируемые системой [6]. Полученные результаты явились предпосылкой для разработки способа оперативной оценки положения пластичной зоны в доменной печи по косвенным показателям, в качестве которых могут быть приняты амплитудно-частотные характеристики изменения скорости опускания шихты в различных сечениях печи.

Установленная на доменной печи (ДП) № 9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» стационарная радиолокационная система контроля профиля поверхности засыпи шихты позволяет рассчитывать скорости опускания поверхности шихтовых материалов в точках, находящихся на каждом из четырех контролируемых радиусов колошника и соответствующих границам трех кольцевых зон сечения колошника — 1П, 2П и Ц [7]. Как показано в исследовании [6], для скоростей опускания поверхности шихтовых материалов в зонах сечения колошника характерным является нестабильное их изменение во времени. При этом для вариации скорости опускания шихтовых материалов, оцениваемой по величине среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты в каждой кольцевой зоне, установлена периодичность проявления максимальной величины среднеквадратичного отклонения скорости, характерная для каждой зоны сечения колошника. Среднеквадратичные отклонения скорости опускания шихты в точках каждого контролируемого радиуса колошника  $\sigma_i^m$  за цикл загрузки определяли с помощью выражения

$$\sigma_i^m = \sqrt{\frac{\sum (V_i^m - V_i^{m \text{cp}})^2}{i-1}}, \quad (1)$$

где  $i$  — количество порций в цикле загрузки;  $V_i^m$  — скорость опускания шихты в точке радиуса колошника после выгрузки каждой порции цикла загрузки, м/мин;  $V_i^{m \text{cp}}$  — средняя скорость опускания шихты в точке радиуса колошника за цикл загрузки, м/мин;  $m$  — количество контролируемых радиусов колошника.

Среднеквадратичные отклонения скоростей опускания шихты по радиусам колошника

$$\sigma_R^m = \sqrt{\frac{\sum (V_{ij}^m - V_{ij}^{m \text{cp}})^2}{ij-1}}, \quad (2)$$

где  $V_{ij}^m$  — скорость опускания шихты по радиусу колошника после выгрузки каждой порции цикла загрузки, м/мин;  $V_{ij}^{m \text{cp}}$  — средняя скорость опускания шихты по радиусу колошника за цикл

загрузки, м/мин;  $j$  — количество точек на радиусе колошника.

Средние значения среднеквадратичных отклонений скоростей опускания шихты за период, равный 2 сут работы печи

$$\sigma_R^m = \frac{\sum \sigma_R^m}{k}, \quad (3)$$

где  $k$  — количество циклов периода.

Анализ рассчитанных среднеквадратичных отклонений скорости в секторах сечения печи, расположенных по радиусам, ориентированным по осям чугунных леток (ЧЛ1–ЧЛ4), для каждого цикла загрузки показал, что их значения изменяются и с различными для каждой из зон сечения колошника временными интервалами увеличиваются до максимальных по сравнению со средними для исследуемых периодов значениями среднеквадратичных отклонений скоростей. При этом для зоны 1П периодический рост среднеквадратичных отклонений скорости до максимальных происходит через промежуток времени, соответствующий в среднем опусканию 7–10 циклов загрузки, для зоны 2П — 4–5 циклов и зоны Ц — 2–3 циклов.

Принято, что рассчитанные в каждой зоне на основе установленных временных интервалов между максимальными среднеквадратичными отклонениями скорости  $t_{\max}$ , превышающими среднее значение, и усредненными за эти интервалы скоростями опускания шихты  $V_{\max}$  расстояния  $H_{\text{пл}}$  от технологического нуля могут характеризовать точку начала образования жидких фаз в слое железорудных материалов, т. е. положение пластичной зоны по высоте и радиусу доменной печи. Согласно предлагаемому методу [8] положение пластичной зоны в каждой из зон по радиусу доменной печи может быть определено с помощью выражения

$$H_{\text{пл}} = Y^{\text{исх}} - V_{\max}^{\text{cp}} t_{\max}, \quad (4)$$

где  $H_{\text{пл}}$  — расстояние от технологического нуля до границы пластичной зоны, м;  $Y^{\text{исх}}$  — исходный уровень засыпи шихтовых материалов (перед выгрузкой очередной порции шихты), м;  $V_{\max}^{\text{cp}}$  — среднее значение скорости опускания шихты за периоды между максимальными среднеквадратичными отклонениями скорости, превышающими среднее его значение, м/мин;  $t_{\max}$  — временной интервал между циклами, характеризующимися максимальными среднеквадратичными отклонениями скорости по отношению к среднему его значению, мин.

С помощью системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике ДП № 9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» выполнены исследования, в результате которых рассчитаны средние скорости опускания шихтовых материалов за цикл загрузки (по скорости опускания каж-

дой из десяти порций цикла) в контролируемых кольцевых сечениях колошника  $V_j$  для десяти периодов работы печи: I — 14–15.01.2008 г.; II — 17–18.05.2008 г.; III — 29–31.05.2008 г.; IV — 01–03.03.2010 г.; V — 08–11.03.2010 г.; VI — 11–13.03.2010 г.; VII — 13–15.03.2010 г.; VIII — 21–24.03.2010 г.; IX — 01–03.04.2010 г.; X — 03–05.04.2010 г. Отличительной особенностью программ загрузки шихты во II и III исследуемых периодах работы печи по сравнению с I, IV–X периодами (программа А) было изменение последовательности выгрузки порций в цикле загрузки. По сравнению с программой А выгрузка К 2-1 (шестая порция), а затем К 8-4 (седьмая порция) и АОШо 9-3 (восьмая порция) в программе Б была изменена на К 8-4 (шестая порция), затем К 2-1 (седьмая порция) и АОШо 9-3 (восьмая порция). Кроме того, программы загрузки для всех исследуемых периодов отличались фактическим распределением масс шихтовых материалов по позициям лотка бесконусного загрузочного устройства.

Исследуемые периоды охватывают достаточно широкий диапазон изменения технологических параметров работы печи. Например, в исследуемых периодах производство чугуна изменялось в диапазоне от 6998 до 9388 т/сут; диапазон изменения расхода природного газа составил 297,5–569,4 м<sup>3</sup>/мин. Следует отметить, что исследуемые периоды работы печи (I–X) различались составом шихтовых материалов:

- в I–III периодах в составе шихты присутствовали окатыши, средний расход которых составлял 289,81 кг/т чугуна, а в IV–X периодах они отсутствовали;

- расходом антрацита в составе шихтовых материалов, в I–III периодах средний расход антрацита составлял 32,5 кг/т чугуна, в IV–X периодах его величина в среднем составила 43,9 кг/т чугуна;

- расходом брикетов, в I–III периодах средний расход брикетов составлял 15,1 кг/т чугуна, в IV–X периодах — 1,8 кг/т чугуна;

- в IV–X периодах, в отличие от I–III периодов, в составе шихты использовали офлюсованные железосодержащие материалы (МОЖ), расход которых в указанные периоды в среднем составлял 40,3 кг/т чугуна;

- в I–III периодах, в отличие от IV–X периодов, в составе шихты использовали известняк, расход которого в этих периодах в среднем составлял 15,3 кг/т чугуна;

- в IV–X периодах по сравнению с I–III периодами на 20,4 кг/т чугуна увеличился расход мелочи агломерата.

Результаты расчетов положения пластичной зоны для I–III периодов в ДП № 9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» приведены в табл. 1 и для одного из периодов графически представлены на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ НА КОЛОШНИКЕ ДП №9 ОАО «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ» И РАСПОЛОЖЕНИЕ ГРАНИЦЫ ЗОНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЖИДКИХ ФАЗ ПО ВЫСОТЕ И ПЕРИМЕТРУ ПЕЧИ В I–III ПЕРИОДЫ ЕЕ РАБОТЫ

Период (дата)	Параметр, показатель	Сектор печи, где измеряется профиль поверхности засыпи, точки измерения по радиусу колошника																	
		ЧЛ1			ЧЛ2			ЧЛ3			ЧЛ4			ЧЛ1–ЧЛ4					
		III	II	Ц	III	II	Ц	III	II	Ц	III	II	Ц	III	II	Ц	III	II	Ц
I (14–15.01.2008 г.)	Средний уровень засыпи перед выгрузкой порций шихты $U_{р.исх}$ , м	0,68	0,94	0,98	0,80	0,40	0,82	1,06	0,87	1,17	0,81	0,95	0,79	0,84	0,79	0,84	0,79	0,94	0,94
	Скорость опускания поверхности засыпи шихты $V_{ш.2}$ , м/мин	0,095	0,093	0,095	0,055	0,086	0,095	0,101	0,092	0,089	0,069	0,059	0,091	0,080	0,082	0,093	0,093	0,093	0,093
	Колблемость скорости опускания поверхности засыпи шихты $\sigma_{ш.2}$ , м/мин	0,080	0,100	0,081	0,073	0,093	0,078	0,070	0,095	0,086	0,070	0,071	0,096	0,073	0,090	0,085	0,085	0,085	0,085
	Расстояние от отметки ТН “0” (42100) до границы области образования жидких фаз $H_{зп.2}$ , м (по $\sigma_{ш.мах}$ )	13,05	10,52	16,00	11,21	10,95	16,06	22,31	12,03	12,14	11,57	8,44	12,08	13,51	9,24	15,43	15,43	15,43	15,43
II (17–18.05.2008 г.)	$U_{р.исх}$ , м	1,25	1,42	1,53	1,24	1,21	1,49	1,41	1,52	2,04	1,21	1,50	1,62	1,28	1,41	1,67	1,67	1,67	1,67
	$V_{ш.2}$ , м/мин	0,086	0,090	0,094	0,075	0,081	0,080	0,100	0,083	0,101	0,076	0,067	0,091	0,084	0,080	0,092	0,092	0,092	0,092
	$\sigma_{ш.2}$ , м/мин	0,074	0,082	0,098	0,074	0,098	0,112	0,078	0,105	0,107	0,067	0,088	0,104	0,073	0,093	0,105	0,105	0,105	0,105
	$H_{зп.2}$ , м	23,63	15,89	8,96	23,99	9,71	11,72	23,89	10,07	13,70	20,43	9,13	10,27	22,99	11,72	10,62	10,62	10,62	10,62
III (29–31.05.08 г.)	$U_{р.исх}$ , м	0,87	1,25	1,62	1,05	1,20	1,56	1,06	1,22	1,96	0,88	1,37	1,58	0,97	1,26	1,68	1,68	1,68	1,68
	$V_{ш.2}$ , м/мин	0,101	0,101	0,100	0,086	0,097	0,107	0,095	0,086	0,102	0,077	0,064	0,099	0,090	0,087	0,102	0,102	0,102	0,102
	$\sigma_{ш.2}$ , м/мин	0,069	0,068	0,101	0,061	0,087	0,099	0,059	0,102	0,097	0,056	0,078	0,107	0,061	0,084	0,101	0,101	0,101	0,101
	$H_{зп.2}$ , м	19,45	17,62	11,59	23,59	11,98	14,01	15,77	9,88	14,75	23,83	9,53	11,39	30,42	10,95	11,69	11,69	11,69	11,69

На рис. 1 также показано графическое отображение усредненного для четырех радиусов ЧЛ1–ЧЛ4 положения пластичной зоны в ДП № 9 в исследуемый период ее работы. Для IV–X периодов (табл. 2, рис. 2) пластичная зона определена усреднением ее положения для четырех радиусов ЧЛ1–ЧЛ4 в исследуемые пе-

риоды работы печи. Целесообразность такого представления положения пластичной зоны вызвана возможностью дальнейшего ее сопоставления с технологическими параметрами плавки с целью подтверждения достоверности разработанного метода.

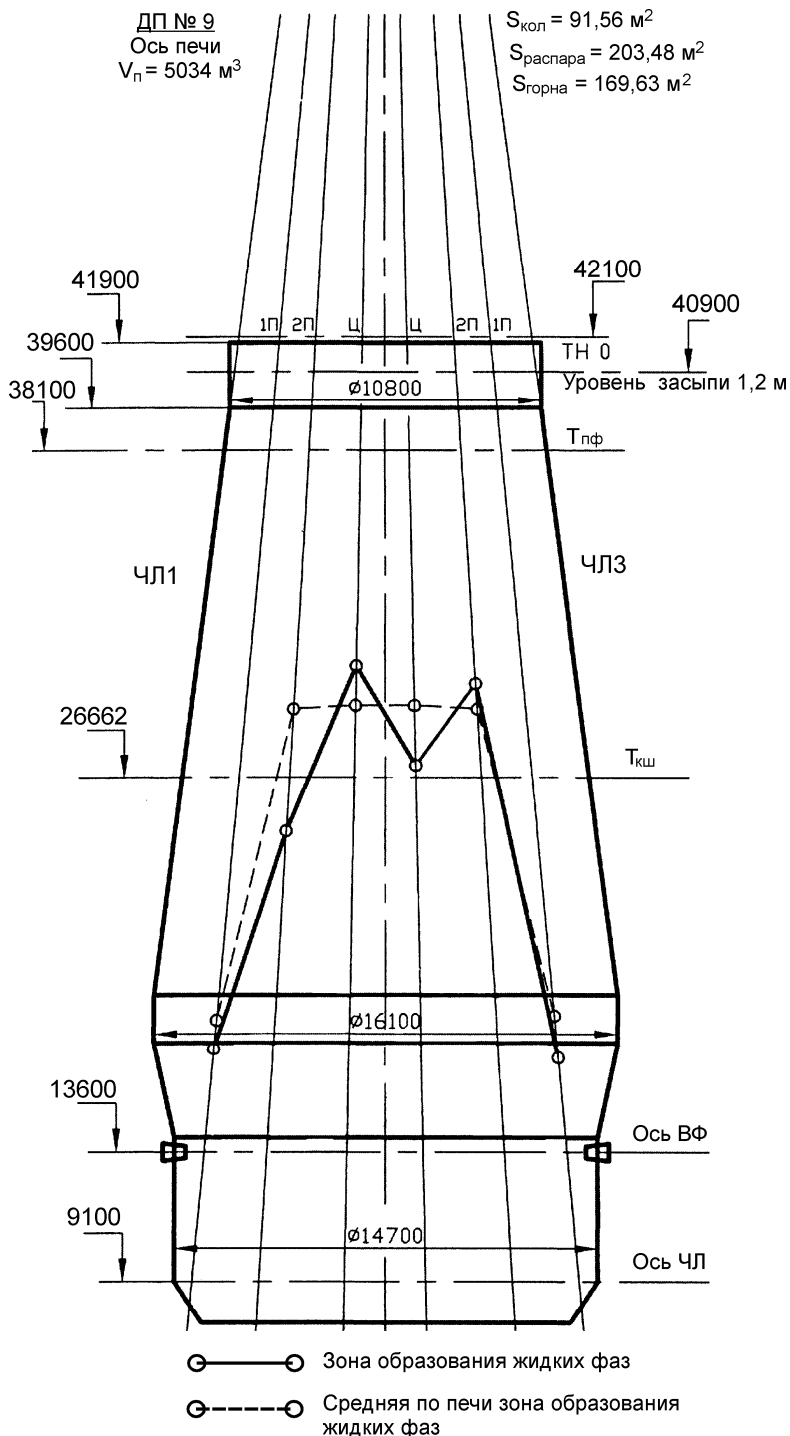


Рис. 1. Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП № 9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог», период II (17–18.05.2008 г.), диаметр ЧЛ1–ЧЛ3

**ТАБЛИЦА 2. ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ НА КОЛОШНИКЕ ДП № 9 ОАО «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ» И РАСПОЛОЖЕНИЕ ГРАНИЦЫ ЗОНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЖИДКИХ ФАЗ ПО ВЫСОТЕ И ПЕРИМЕТРУ ПЕЧИ В IV–X ПЕРИОДЫ ЕЕ РАБОТЫ**

Период (дата)	Параметр, показатель	Кольцевые зоны сечения колошника		
		1П	2П	Ц
IV (01–03.03.2010 г.)	Ур. <sup>исх</sup> , м	0,72	0,56	0,80
	V <sub>ш</sub> , м/МИН	0,054	0,074	0,086
	σ <sub>ш</sub> , м/МИН	0,075	0,084	0,086
	H <sub>зп</sub> , м	12,25	10,77	13,00
V (08–11.03.2010 г.)	Ур. <sup>исх</sup> , м	0,77	0,61	0,62
	V <sub>ш</sub> , м/МИН	0,064	0,070	0,075
	σ <sub>ш</sub> , м/МИН	0,059	0,071	0,100
	H <sub>зп</sub> , м	25,52	15,62	9,34
VI (11–13.03.2010 г.)	Ур. <sup>исх</sup> , м	0,88	0,84	0,75
	V <sub>ш</sub> , м/МИН	0,073	0,075	0,081
	σ <sub>ш</sub> , м/МИН	0,052	0,071	0,070
	H <sub>зп</sub> , м	13,05	8,92	12,24
VII (13–15.03.2010 г.)	Ур. <sup>исх</sup> , м	0,74	0,67	0,55
	V <sub>ш</sub> , м/МИН	0,077	0,077	0,080
	σ <sub>ш</sub> , м/МИН	0,050	0,070	0,083
	H <sub>зп</sub> , м	18,36	10,89	8,82
VIII (21–24.03.2010 г.)	Ур. <sup>исх</sup> , м	0,79	0,75	0,59
	V <sub>ш</sub> , м/МИН	0,067	0,071	0,076
	σ <sub>ш</sub> , м/МИН	0,055	0,068	0,073
	H <sub>зп</sub> , м	16,54	10,31	9,52
IX (01–03.04.2010 г.)	Ур. <sup>исх</sup> , м	0,78	0,60	0,80
	V <sub>ш</sub> , м/МИН	0,072	0,072	0,094
	σ <sub>ш</sub> , м/МИН	0,056	0,076	0,084
	H <sub>зп</sub> , м	23,45	10,04	10,85
X (03–05.04.2010 г.)	Ур. <sup>исх</sup> , м	0,88	0,64	0,85
	V <sub>ш</sub> , м/МИН	0,076	0,077	0,100
	σ <sub>ш</sub> , м/МИН	0,056	0,069	0,070
	H <sub>зп</sub> , м	14,58	9,64	12,53

При обосновании выбора временного интервала, в течение которого определяются средние значения среднеквадратичных отклонений скоростей опускания шихты, приняты во внимание следующие факторы. В ходе исследования было установлено, что для работы печи характерны периоды, когда выпуск чугуна осуществлялся в течение продолжительного времени (около 1 ч) одновременно на две летки, что при постоянных параметрах загрузки и дутьевого режима не вызывало изменений положения пластичной зоны. Последовательное изменение летки, через которую осуществляется выпуск чугуна, с незначительным перерывом при этом вызывает изменение положения пластичной зоны в печи. Из этого следует, что для получения достаточной статистической выборки необходимо проанализировать скорости опускания шихты за период ее работы без внесения управляющих воздействий на ход плавки, составляющий не менее 24 ч работы

печи. Кроме этого следует учитывать большое время запаздывания, т. е. интервал между внесением управляющих воздействий, например изменения состава железорудной шихты или расхода кокса, и началом изменения состава продуктов плавки. Такая инерционность связана с изменением структуры столба шихтовых материалов, которая при внесении управляющих воздействий на нее проявляется по истечении определенного времени, соответствующего проплавке шихты, занимающей рабочий объем печи. В среднем этот промежуток времени составляет 8 ч [9]. Для того чтобы реформированная структура столба стабилизировалась, необходима работа печи в этих условиях в течение не менее 8 ч. С учетом этих факторов для определения положения пластичной зоны должен быть проанализирован период продолжительностью около 2 сут.

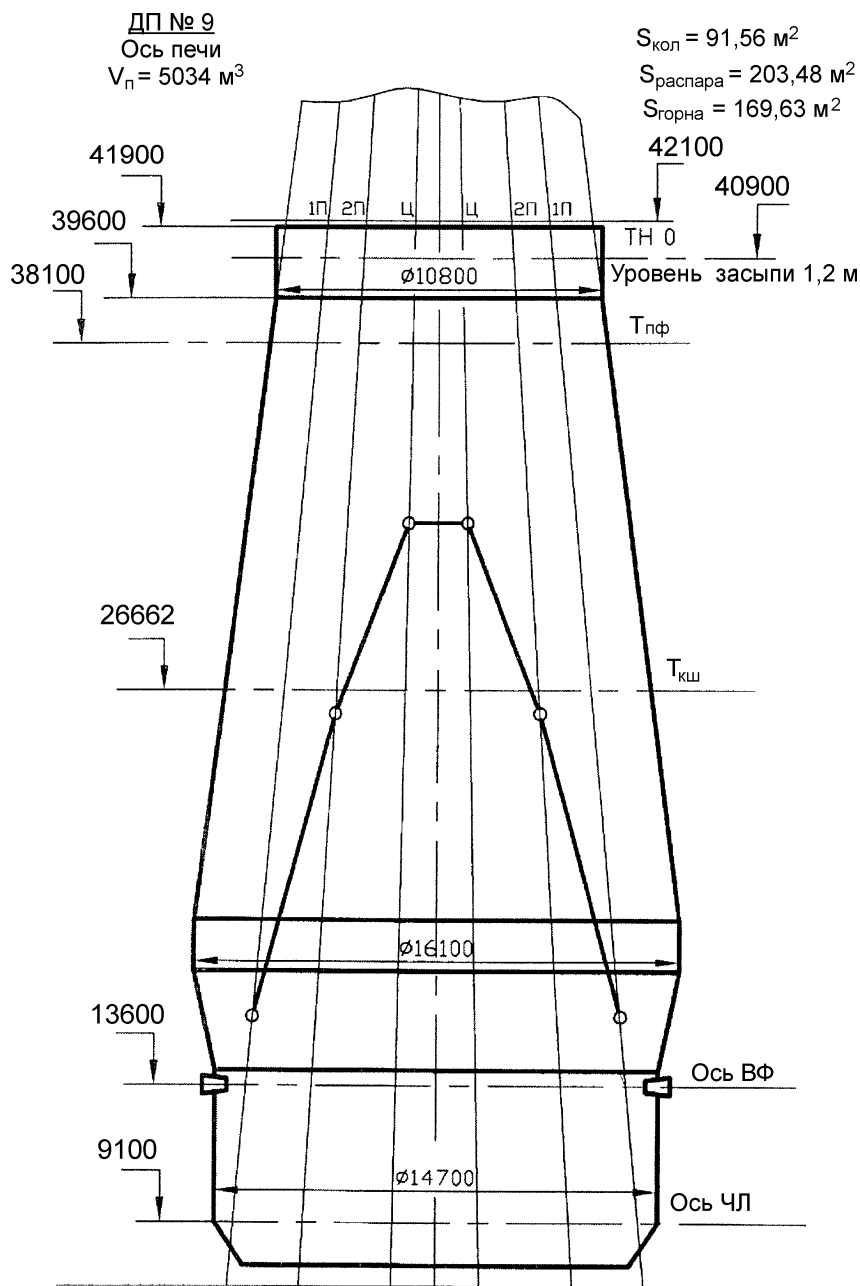
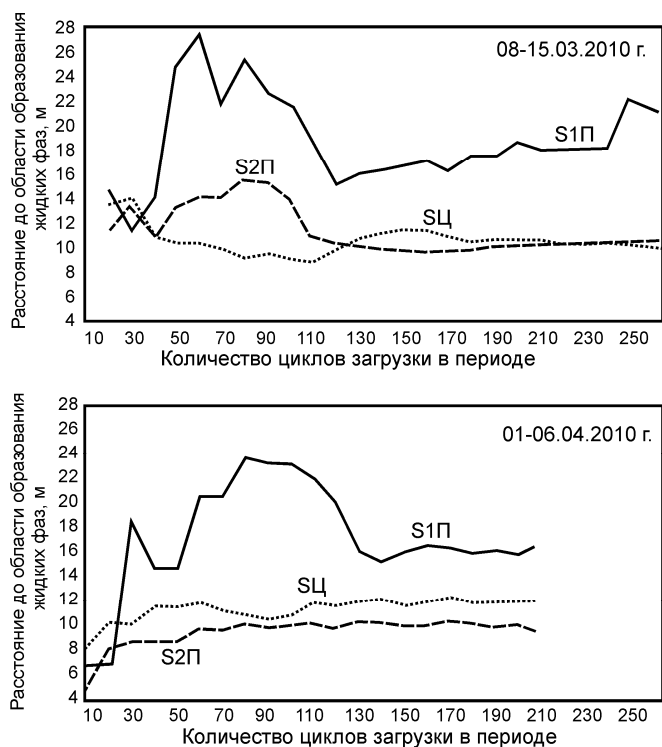


Рис. 2. Расположение границы зоны образования жидких фаз в ДП № 9  
ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог», период V (08–11.03.2010 г.)

Обоснование временного интервала, в течение которого определяются средние значения среднеквадратичных отклонений скоростей опускания шихты, выполнено расчетным методом. Для этого определены расстояния от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в трех контролируемых с помощью профилемера зонах печи при различных длительностях периодов. Приведенные на рис. 3 графики показывают, что наибольшие отклонения положения пластичной зоны в контролируемых сечениях печи характерны для периодов,

составляющих около 80 циклов загрузки. Об этом свидетельствуют экстремумы на кривых изменения расстояния от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз, соответствующие периоду из 80 циклов загрузки. Таким образом, выполненные расчетные исследования позволили обосновать выбор временного интервала, в течение которого определяются средние значения среднеквадратичных отклонений скоростей опускания шихты, составляющего около 80 циклов загрузки.



**Рис. 3.** Влияние количества циклов усреднения на расстояние от технологического нуля до области образования жидких фаз

Разработанный метод определения положения пластичной зоны опробован в условиях работы ДП № 9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и может быть реализован в составе АСУ доменных печей, на которых установлены стационарные системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике. Выбор периода для анализа характера изменения скоростей и определения на их основе положения пластичной зоны должен быть уточнен по результатам работы метода в составе АСУ доменной печи в течение продолжительного времени.

### Заключение

В результате исследований установлено, что рассчитанные для временных интервалов между максимальными среднеквадратичными отклонениями скорости, превышающими среднее их значение, и средними за эти интервалы скоростями опускания шихты в каждой зоне расстояния от технологического нуля могут характеризовать положение пластичной зоны по высоте и радиусу доменной печи. Разработан и опробован в условиях ДП № 9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» метод оперативного определения положения пластичной зоны в доменной печи по оценке вариации скорости опускания поверхности шихты на колошнике.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борц Ю. М., Серов Ю. В. Контроль и управление зоной плавления в доменных печах // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 1988. № 13. С. 18–32.
2. Шюрман Э., Гуденау Г. В., Петерс К. Х. Исследование пластичной зоны на доменной печи завода в Швельгерне // Черные металлы. 1982. № 6–7. С. 9–14.
3. Betriebsverfahren mit dem Prozedursteuerungs und Optimierungssystem für den Hochofen Schweigern / K. H. Peters, W. Alperer, H. Y. Bachhofen et al. // Stahl and Eisen. 1984. Bd. 104. № 14. S. 59–62.
4. Использование информации профилимера для выбора управляющих воздействий на ход доменной плавки / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов и др. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2006. № 5. С. 29–34.
5. Товаровский И. Г. Доменная плавка: Монография, 2-е изд. — Днепропетровск: Пороги. 2009. — 768 с.
6. Аналитическое исследование положения пластичной зоны и связи ее параметров с движением поверхности засыпи шихтовых материалов в доменной печи / В. И. Большаков, И. Г. Товаровский, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов // Теория и практика металлургии. 2011. № 1.
7. Методика определения скоростей опускания шихты по сечению колошника в доменной печи / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2008. № 2. С. 114–118.
8. Пат. на изобретение Украины, UA 91799 С2. Способ определения положения пластичной зоны в доменной печи / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, С. Т. Шулико и др. Заявл. 30.06.09; опубл. 25.08.10. Бюл. 2010 г. № 16.
9. Гиммельфарб А. А., Ефименко Г. Г. Автоматическое управление доменным процессом. — Металлургия. 1969. — 309 с.