

УДК 669.162.267

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВОГО ПОТОКА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Ю. С. Семенов

ИЧМ НАН Украины, ООО «НТП ДЧМ» (г. Днепр, Украина)

На доменной печи ООО «Метинвест Холдинг» исследованы (2016 г.) особенности и характер изменения температур газового потока в периферийной зоне по высоте от уровня заплечиков до верхних горизонтов шахты и температур над поверхностью засыпи по радиусам печи при работе на «безгазовой шихте» с увлажнением дутья, с природным газом и ПУТ.

**Ключевые слова:** доменная печь, пылеугольное топливо, термопары футеровки, термозонды, температура газового потока.

Доменное производство металлургических предприятий Украины в условиях высокой стоимости природного газа в последние годы переходит на технологию вдувания пылеугольного топлива (ПУТ). Начальный этап освоения ПУТ происходит в большинстве случаев без соблюдения требований к качеству железосодержащих материалов и кокса и без предварительной модернизации систем охлаждения, загрузочных устройств, а также средств автоматизации. Эффективное использование ПУТ наряду с качеством углей и конструктивными особенностями воздушных фурм в значительной степени определяется применением рациональных режимов загрузки [1], для выбора которых целесообразно использовать современные средства контроля.

В одном из доменных цехов ООО «Метинвест Холдинг» (Украина) в 2016 г. начали освоение технологии вдувания ПУТ в горн ДП-3 и ДП-5. В настоящей статье представлены исследования, выполненные на ДП-3 полезным объемом 1719 м<sup>3</sup>, которая была введена в эксплуатацию после реконструкции в октябре 2011 г. [2 – 10], оборудована однотрактным бесконусным загрузочным устройством фирмы «P. Wurth», четырьмя стационарными термозондами над поверхностью засыпи шихты [5] и термопарами футеровки шахты по высоте и окружности печи [6], установленными на глубину 100 мм при проектной толщине футеровки 300 мм. Термопары установлены на шести горизонтах шахты ДП-3, а также в распаре, заплечиках и в подфурменной зоне. По окружности печи термопары установлены: восемь — на уровне заплечиков, распара и трех нижних горизонтов шахты, по шесть — на следующих выше двух горизонтах и четыре — на верхнем горизонте [6, 7].

Первое после пуска ДП-3 в 2011 г. шоткретирование шахты выполнено в июне 2014 г., на начало 2016 г. срок службы футеровки составлял уже 1,5 года, и после выдувки печи на очередное шоткретирование в сентябре 2016 г. визуальный осмотр показал практически полное отсутствие защитной футеровки по всей высоте шахты, а также наличие пояса гарнисажа на уровне заплечиков. Следовательно, в таких условиях термопары с января по сентябрь 2016 г. регистрировали температуру газового потока в периферийной зоне

по высоте рабочего объема печи [7] и по ее изменению можно судить как о влиянии дутьевых параметров на распределение газового потока в печи, так и о процессах гарнисажеобразования (особенно в сложившихся переменных условиях работы, а также с началом освоения ПУТ).

Работа ДП-3 в исследуемом периоде 2016 г. в течение 8,5 месяцев характеризовалась четырьмя основными газодутьевыми режимами:

1 — на «безгазовой шихте» с увлажненным дутьем — расход пара составлял в среднем 2,4 т/ч (01.01.2016 – 14.03.2016) — период 1;

2 — с природным газом (ПГ) — расход ПГ составлял в среднем 58,9 м<sup>3</sup>/т чугуна (15.03.2016 – 20.04.2016) — период 2;

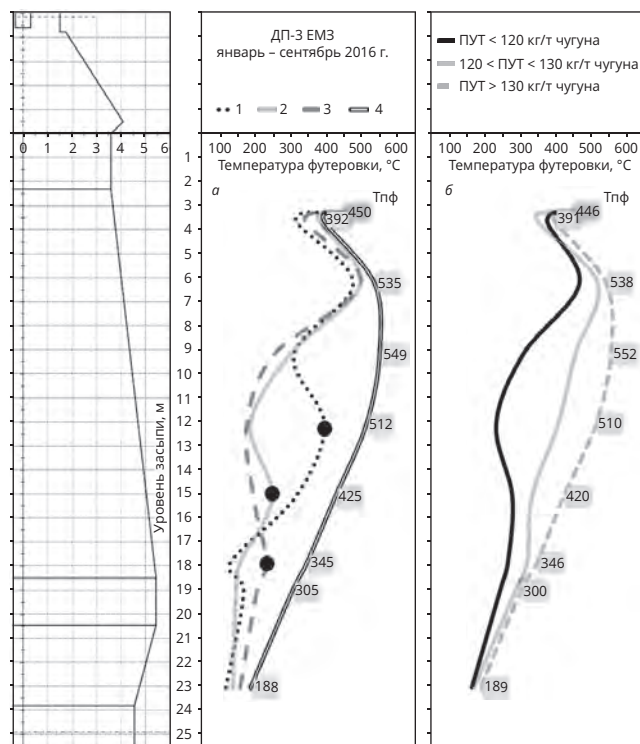
3 — с ПГ (10,8 м<sup>3</sup>/т) и с ПУТ (91,8 кг/т чугуна) на начальном этапе его освоения (21.04.2016 – 03.06.2016) — период 3;

4 — с ПУТ (129,6 кг/т чугуна) (29.06.2016 – 13.09.2016) до остановки ДП-3 на шоткретирование шахты — период 4.

На рис. 1, а представлено распределение температуры газового потока в периферийной зоне по высоте ДП для четырех исследуемых периодов, на рис. 1, б — распределение температуры для четвертого периода, условно разделенного на три режима с разным расходом вдуваемого ПУТ.

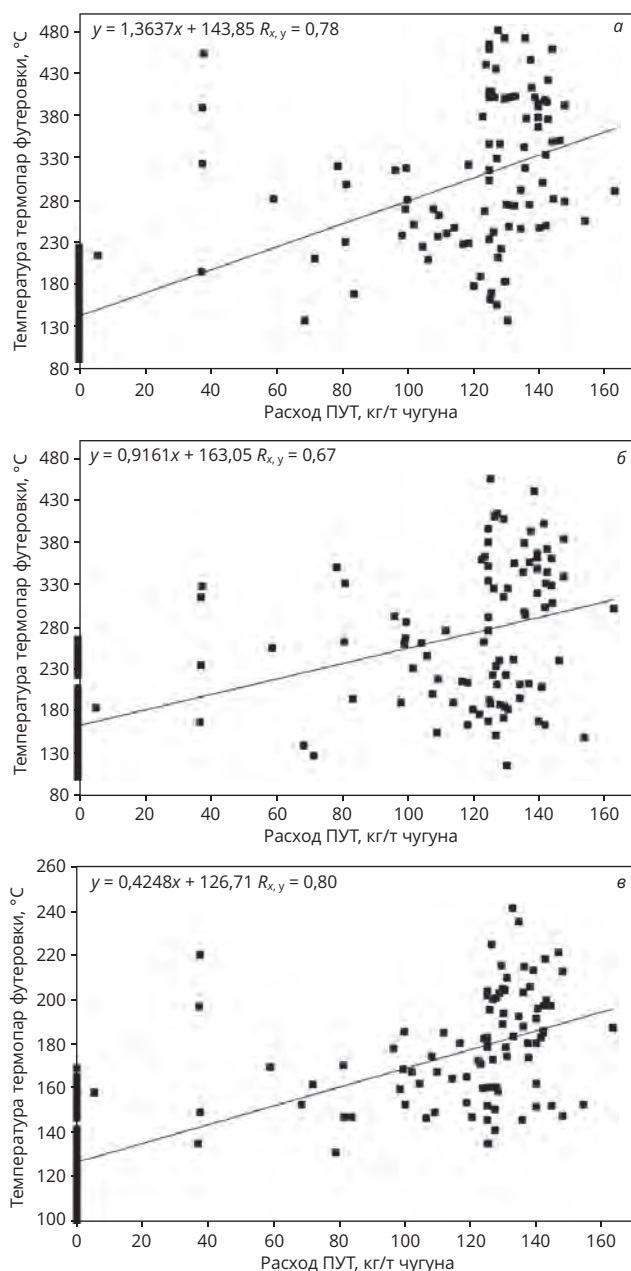
Как видно из рис. 1, характер распределения температуры газового потока в периферийной зоне по высоте ДП в значительной степени определяется газодутьевым режимом и количеством используемого ПУТ. При анализе температуры газового потока низа шахты, распара и заплечиков максимальная температура (экстремум) в первом периоде работы отмечена на уровне 12 м от технологического нуля (ТН) — от верха защитных плит колошника, или 13 м от оси воздушных фурм (ВФ), во втором периоде — на уровне 15 м от ТН (10 м от ВФ), в третьем — на уровне 18 м от ТН (7 м от ВФ), в четвертом периоде явно выраженного экстремума в нижней части печи не наблюдалось, температура газового потока монотонно увеличивалась от заплечиков до уровня 6 м от ТН.

Экстремумы кривых температур нижней зоны печи для первых трех периодов работы ДП-3, по мнению ав-



**Рис. 1.** Распределение температуры газового потока в периферийной зоне по высоте ДП при разных газодутьевых и топливных условиях;  $T_{пф}$  — температура периферийного газового потока под защитными плитами колошника, ● — экстремумы кривой распределения температуры газового потока

тора, могут характеризовать как положение корня зоны вязко-пластичного состояния (пластичной зоны), так и границу устойчивой составляющей образованного в печи гарнисажа. В пользу суждения о положении корня зоны вязко-пластичного состояния в точке экстремума кривой температур свидетельствуют результаты исследований на ДП рабочим объемом 3594 м<sup>3</sup> завода фирмы «Тиссен» [11, 12]. Определение положения и профиля пластичной зоны авторами публикации [11] основывалось на распределении давлений, температур футеровки и состава газа у стенки по высоте печи. На этой ДП определяли температуры футеровки шахты на 16 уровнях выше оси воздушных фурм и перепады статического давления на 13 уровнях. Согласно [11], при плохом ходе печи высота пластичной зоны, ее верхняя граница, находилась на расстоянии 14 м выше уровня фурм, при среднем ходе — на расстоянии 9 м, при хорошем — на расстоянии 8 м. В статье [11] приведены графики изменения температуры футеровки шахты по высоте печи для периодов с плохим и хорошим ходом, которые в значительной степени согласуются с приведенными в данной статье результатами (см. рис. 1, а). Первые три исследуемых периода работы ДП-3 также условно можно охарактеризовать по суточной производительности и расходу кокса как периоды с плохим, средним и хорошим ходом. Следует отметить также, что в первом исследуемом периоде работы ДП-3 использовалось максимальное, по сравнению с другими периодами, количество окатышей в железорудной



**Рис. 2.** Связи температур футеровки низа шахты (а), распара (б) и заплечиков (е) и расхода ПУТ для ДП-3

смеси (54,8 %), а высокое содержание в смеси с агломератом повышенной основности из-за легкоплавких свойств окатышей способствует образованию растянутой по высоте вязко-пластичной зоны. Так как первый период характеризуется максимальным расстоянием от уровня воздушных фурм до точки экстремума кривой температур по высоте нижней части шахты, то это может также свидетельствовать в пользу гипотезы о положении верхней границы зоны вязко-пластичного состояния в точке экстремума.

Увеличение расхода ПУТ, дувяемого в горн ДП-3 (см. рис. 1, б), способствовало увеличению температур газового потока по высоте печи с максимальной амплитудой изменения на уровне середины шахты. Увеличение температур было вызвано интенсификацией периферийного газового потока при увеличении рас-

хода ПУТ, а причинами максимальной амплитуды изменения температур на уровне середины шахты явились увеличенное расстояние от оси воздушных фурм до перегиба профиля печи и рациональные конструктивные решения установленных на ДП-3 воздушных фурм.

Следующий этап настоящих исследований состоял в анализе корреляционных связей температур термопар футеровки (газового потока для условий первой половины 2016 г.) ДП-3 с технологическими параметрами и показателями плавки в течение 200 сут работы печи, включая исследуемые газодутьевые режимы работы ДП-3. Корреляционные связи определяли по среднесуточным данным показаний термопар.

Анализ показал, что с наибольшими коэффициентами корреляции получены связи расхода ПУТ со средними температурами футеровки низа шахты ( $R_{x,y} = 0,78$ ), распара ( $R_{x,y} = 0,67$ ) и заплечиков ( $R_{x,y} = 0,80$ ) (рис. 2). На уровне середины шахты (отм. 28.739), где температуры газового потока были максимальными, их связь с расходом ПУТ характеризовалась коэффициентом корреляции  $R_{x,y} = 0,62$ . Таким образом, полученные связи свидетельствуют о наибольшем влиянии расхода ПУТ на температуру периферийного газового потока на уровнях заплечиков, распара и низа шахты.

Помимо установленных связей температур периферийного газового потока с расходом ПУТ следует выделить также полученные в результате выполненного корреляционного анализа другие связи. А именно: обратную связь температуры термопар футеровки заплечиков (отм. 14.930) с расходом скипового кокса ( $R_{x,y} = -0,76$ ), связь температуры футеровки заплечиков (отм. 14.930) со среднесуточным производством печи ( $R_{x,y} = 0,66$ ), обратную связь температуры футеровки низа шахты (отм. 20.120) с расходом скипового кокса ( $R_{x,y} = -0,67$ ), связи среднеквадратического отклонения (СКО) температур футеровки середины шахты (отм. 25.878) и (отм. 28.739) с расходом скипового кокса ( $R_{x,y} = 0,57$ ) и ( $R_{x,y} = 0,78$ ), соответственно, обратную связь СКО температур футеровки середины шахты (отм. 28.739) со среднесуточным производством печи ( $R_{x,y} = -0,62$ ), обратную связь температуры футеровки середины шахты (отм. 25.878) с расходом природного газа в дутье ( $R_{x,y} = -0,55$ ), обратные связи средней температуры футеровки низа (заплечики, распар и низ шахты) ( $R_{x,y} = -0,55$ ) и верха (середина и верх шахты) печи ( $R_{x,y} = -0,52$ ) с содержанием в железорудной части шихты агломерата местного производства, при этом с наибольшим коэффициентом корреляции содержание в железорудной смеси агломерата местного производства связано с температурой футеровки середины шахты (отм. 28.739) ( $R_{x,y} = -0,59$ ).

Полученные связи свидетельствуют о влиянии качества кокса и железорудного сырья на температуру футеровки, а также о влиянии распределения газового потока по окружности печи на расход кокса и производство. Объяснение обратных связей температур футеровки заплечиков и низа шахты с расходом кокса состоит в наличии прямых связей этих температур с

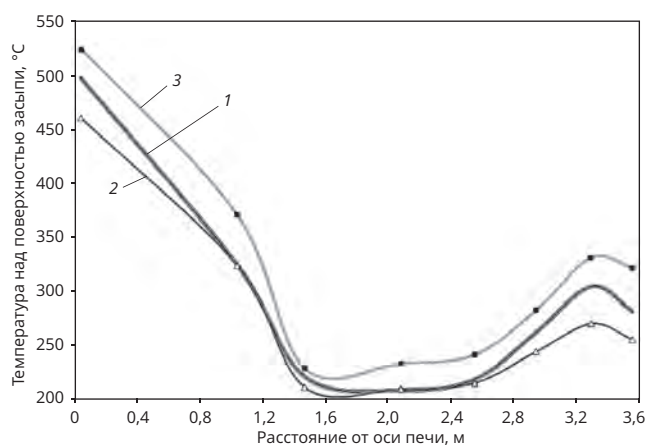


Рис. 3. Изменение температуры газового потока над поверхностью шихты по радиусу ДП-3 для первых трех исследуемых периодов

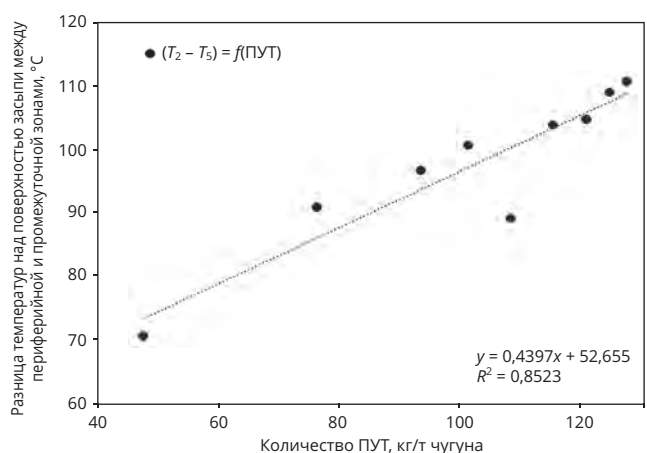


Рис. 4. Зависимость разницы температур газового потока над поверхностью шихты периферийной и промежуточной зон сечения колошника от количества вдуваемого ПУТ

расходом ПУТ, при вдувании которого расход кокса на печи уменьшался.

Следующий этап исследований — анализ изменения температур над поверхностью засыпи шихты, регистрируемых термозондами, для первых трех периодов работы ДП-3, для четвертого периода данные отсутствовали в связи с выходом из строя к этому времени термозондов после двух лет их эксплуатации. На рис. 3 представлено распределение температур газового потока по радиусу ДП-3 для трех исследуемых периодов. Как следует из рисунка, второй период работы печи характеризовался наименьшими температурами в периферийной и центральной зонах печи, а в третьем периоде температуры были максимальными в сравнении с остальными периодами по всему сечению печи. Основное объяснение этой особенности — наименьшее количество окатышей в смеси с агломератом (38,5 %) в третьем периоде по сравнению с первыми двумя (54,8 и 54,4 % соответственно), что способствует увеличению температур газового потока над поверхностью шихты из-за использования в шихте большего количества горячего агломерата [5]. Отличие температур периферийной и центральной зон первого и вто-

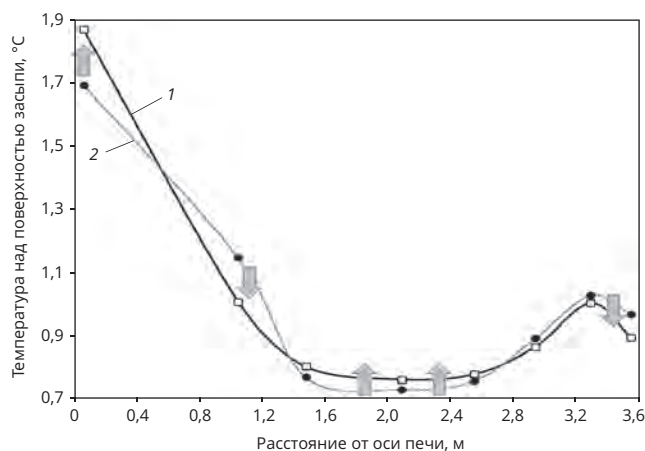


Рис. 5. Распределение температур газового потока над поверхностью засыпи ДП-3 в январе – мае (1) и в октябре (2) 2016 г. после шоткретирования шахты

рого периода с практически одинаковым содержанием окатышей объясняется тем, что при работе на «безгазовой шихте» (период 1) объем сухой зоны меньше, чем при работе с природным газом (период 2), что в конечном итоге и обусловило увеличение температур в первом периоде в двух наиболее газопроницаемых зонах — в центре печи и на периферии.

Далее был выполнен анализ изменения температур над поверхностью засыпи шихты в зависимости от количества ПУТ. В течение четвертого исследуемого периода количество вдуваемого ПУТ достигало в отдельные сутки 128 кг/т чугуна. В режим загрузки шихты изменения не вносили, а анализ температур газового потока над поверхностью шихты в этот период свидетельствовал о слабом взаимном перетоке газов между периферийной и центральной зонами печи, что при вдувании ПУТ приводило к излишне развитому периферийному газовому потоку. Подтверждением служили результаты анализа изменения температур над поверхностью засыпи шихты в зависимости от количества ПУТ. Установлена связь (рис. 4) разницы температур газового потока над поверхностью шихты между периферийной (Т2) и промежуточной (Т5) зонами сечения колошника от количества ПУТ, что подтверждает присущую вдуванию ПУТ интенсификацию газового потока в пристеночной зоне с одновременно затрудненным перетоком газов вдоль радиуса печи. После ремонта в сентябре 2016 г. ДП-3 с шоткретированием шахты и установкой новых термозондов установленная особенность распределения температур газового потока над поверхностью шихты, характеризующаяся затрудненным перетоком газов по радиусу печи по состоянию на начало октября, не подтвердилась (рис. 5), что свидетельствует о влиянии на распределение газового потока не только используемой программы загрузки, но и состояния футеровки шахты печи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований показано влияние газодутьевых параметров работы печи, в том

числе при использовании в составе дутья природного газа и ПУТ, на изменение распределения температур периферийного газового потока и температур газов по радиусу печи над поверхностью засыпи шахты. Установленные особенности влияния газодинамического режима доменной плавки на температуру газового потока позволяет при изменении режима загрузки или дутьевого режима печи адекватно выявлять и правильно отслеживать факторы, влияющие на распределение температур газов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Большаков В. И.** Применение в Украине технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива // Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». 2011. Вып. 23. С. 30 – 36.
2. **Bolshakov V. I., Semenov Yu. S., Ivancha N. G.** et al. Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace // Metallurgical and Mining Industry. 2012. Vol. 4. № 3. P. 158 – 165.
3. **Bolshakov V. I., Semenov Yu. S., Kuznetsov A. M.** The Experience of the Implementation of Modern Blast Furnace Equipped with Bell-Less Top Charging Device under Conditions of Changing Quality of Charge Materials // Metallurgical and Mining Industry. 2013. No. 2. P. 56 – 64.
4. **Большаков В. И., Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И.** и др. Реализация энергосберегающей технологии загрузки современной доменной печи в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 6. С. 6 – 14.
5. **Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И., Горупаха В. В.** и др. Управление распределением шихтовых материалов в доменной печи при вдувании ПУТ с использованием информации термозондов // Сталь. 2017. № 6. С. 7 – 11.
6. **Semenov Yu. S., Mozharensko N. M., Horupakha V. V.** et al. Effect of the Fuel, Raw Materials, and Process Conditions on the Behavior of Temperature Change in a Blast-Furnace Lining // Metallurgist. 2015. Vol. 59. July. Issue 3. P. 290 – 299.
7. **Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И., Горупаха В. В.** и др. Контроль состояния футеровки доменной печи в течение пяти лет ее эксплуатации // Металлург. 2017. № 4. С. 48 – 54.
8. **Семенов Ю. С.** Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с нестабильным качеством шихтовых материалов // Черметинформация. Бюл. «Черная металлургия». 2013. № 12. С. 14 – 19.
9. **Семенов Ю. С.** Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы // В кн. «Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: коллективный труд второго международного симпозиума / под науч. ред. д. т. н., проф. И. Г. Товаровского. — Днепр: ЖУРФОНД, 2016. С. 272 – 285.
10. **Semenov Yu. S., Shumelchik E. I., Vishnyakov V. I.** et al. Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus // Metallurgist. 2013. Vol. 56. January. Issue 9 – 10. P. 652 – 657.
11. **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.
12. **Шюрман Э., Гуденау Г. В., Петерс К.-Х.** Динамическое изменение формы и положения пластичной зоны в доменной печи // Черные металлы. 1982. № 15/16. С. 17 – 20.