

DOI 10.52351/00260827\_2024\_1\_24

УДК 669.162.14

## ИССЛЕДОВАНИЕ АГЛОПРОЦЕССА С ПОДАЧЕЙ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В СЛОЙ СПЕКАЕМОЙ ШИХТЫ

Алексей Николаевич Шаповалов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, [alshapo@misis.ru](mailto:alshapo@misis.ru);

Александр Юрьевич Фукс<sup>2</sup>, [a.fux@uralsteel.com](mailto:a.fux@uralsteel.com)

<sup>1</sup> Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС», г. Новотроицк, Россия

<sup>2</sup> АО «Уральская Сталь», г. Новотроицк, Россия

**Аннотация.** Приведены результаты лабораторных экспериментов по исследованию влияния расхода газообразного топлива (природного газа), подаваемого в слой спекаемой шихты, на показатели аглопроцесса и качество агломерата в шихтовых условиях АО «Уральская Сталь» при высоте слоя шихты от 350 до 500 мм.

Установлено, что увеличение расхода природного газа, подаваемого в слой спекаемой шихты в диапазоне от 3 до 7 м<sup>3</sup>/т спека, способствует повышению вертикальной скорости спекания, выхода годного, удельной производительности и прочностных свойств агломерата. Положительное влияние подачи в слой газообразного топлива объясняется улучшением температурно-временных условий спекания, что увеличивает степень вовлечения рудной части шихты в процессы расплавообразования, а также обеспечивает более полное использование твердого топлива при меньшем его расходе. Эффективность подачи газообразного топлива в слой спекаемой шихты существенно повышается с увеличением высоты спекаемого слоя, что обусловлено уменьшением доли верхней части спека, формирующейся в менее благоприятных тепловых условиях.

По совокупности показателей, с учетом стоимости природного газа, его оптимальный расход в шихтовых условиях работы АО «Уральская Сталь» составляет 3,0 м<sup>3</sup>/т спека, при котором обеспечиваются максимальный прирост показателей спекания и качества агломерата в сравнении с традиционной технологией агломерации.

**Ключевые слова:** агломерация, слой спекаемой шихты, тепловые условия спекания, газообразное топливо, высота спекаемого слоя

## A STUDY OF THE SINTERING PROCESS WITH GASEOUS FUEL INJECTION INTO THE SINTERED LAYER

Aleksey N. Shapovalov<sup>1</sup>, Alexandr Yu. Fuks<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology «MISIS», Novotroitsk, Russia

<sup>2</sup> JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia

**Abstract.** The results of laboratory experiments to study the effect of natural gas injection into the sintered layer on sintering process indicators and sinter quality in the charge conditions of JSC «Ural Steel» at a layer height of 350 to 500 mm are presented.

Based on the results obtained, it was found that an increase in the consumption of natural gas from 3 to 7 m<sup>3</sup>/t of sinter provides an increase in the vertical rate of sintering, yield, specific productivity and strength properties of sinter. The positive effect of injecting gaseous fuel into the sintered layer is due to improved temperature-time conditions of sintering, which increases the degree of involvement of the ore part in the processes of melt formation, as well as provides a more complete use of solid fuel at a lower consumption of fuel. The efficiency of injection of gaseous fuel into the sintered layer increases significantly with increasing sintered layer height, which is due to the reduction of the proportion of the upper layer of sinter formed in less favorable thermal conditions.

According to the totality of indicators, taking into account the cost of natural gas, its optimal consumption in the charge conditions of JSC «Ural Steel» is 3.0 m<sup>3</sup>/t sinter, which provides the maximum increase in sintering parameters and sinter quality in comparison with the traditional technology of sintering.

**Keywords:** sintering, sintered layer, sintering thermal conditions, gaseous fuel, height of sintered layer

**Введение.** Горение твердого топлива в спекаемом слое, определяющее сущность агломерационного процесса, влияет как на его результаты и качество агломерата [1–3], так и на экологичность производства. Поэтому задача повышения эффективности аглопроцесса, в первую очередь в направлении сокращения расхода топлива, актуальна для всех металлургических комбинатов.

Общеизвестно, что повышение прочности и восстановимости агломерата является одним из условий снижения

удельного расхода твердого топлива как при выплавке чугуна, так и в агломерационном производстве. Одно из главных условий одновременного повышения прочности и восстановимости агломерата – создание благоприятных температурно-временных условий в зоне жидкофазного спекания, обеспечивающих полное вовлечение агломерируемой шихты в процессы расплавообразования и получение ферритно-силикатной структуры агломерата с минимальным количеством стекловидных фаз и FeO. Благоприятным

© Шаповалов А.Н., Фукс А.Ю., 2024

температурным диапазоном формирования ферритно-силикатной связки без развития процессов диссоциации гематита считается интервал от 1200 до 1400 °С [1, 4–6], однако его поддержание в зоне горения по всей высоте слоя спекаемой шихты проблематично из-за неравномерности тепловых условий спекания по высоте слоя, вызванной рециркуляцией тепла аглоспека от верхних слоев к нижним [1, 2]. Результатом этого процесса является получение малопрочного плохо спеченного верхнего слоя, толщиной до 50–100 мм, формирующегося в менее благоприятных тепловых условиях, а также формирование переоплавленного низкопористого высокозакаисного агломерата в нижней части спека [1, 2].

Разработано множество вариантов снижения тепловой неравномерности формирования агломерата по высоте слоя спекаемой шихты, среди которых:

- перераспределение твердого топлива по высоте слоя [1, 2, 7–9];
- внешняя тепловая обработка спека различными способами [1, 2, 10–14];
- подача в слой спекаемой шихты газообразного топлива [15–19], обеспечивающего расширение высокотемпературной зоны горения.

Из рассмотренных методов выравнивания температурно-тепловых условий по высоте слоя спекаемой шихты одним из самых практичных вариантов, обеспечивающих улучшение тепловых условий спекания без необходимости глубокой модернизации производства, является подача газообразного топлива в слой спекаемой шихты.

Результаты лабораторных и промышленных экспериментов отечественных исследователей по совместному сжиганию твердого и газообразного (комбинированного) топлива в слое агломерируемой шихты [15, 19] подтверждают, что подача газообразного топлива в слой спекаемой шихты, особенно на начальной стадии спекания, дает возможность не только снизить расход коксика, но и обеспечивает повышение выхода годного в результате создания более благоприятных температурно-временных условий формирования агломерата в верхней части спека. Однако, несмотря на очевидные преимущества, внедрение этой технологии на металлургических заводах России сдерживается, очевидно, высокой взрывоопасностью данного способа. При этом с учетом уровня развития техники, в том числе и автоматизации современного производства, соблюдение мер безопасности при осуществлении подачи газообразного топлива в слой спекаемой шихты является вполне решаемой задачей, что подтверждается положительным зарубежным опытом использования технологии агломерации с введением в слой спекаемой шихты природного газа и других топливных газов различного состава и происхождения (природного газа, коксового и доменного газов, а также их смеси) [16–18].

Обобщение результатов многочисленных исследований (лабораторных и промышленных) позволяет говорить о том, что подача в слой спекаемой шихты газообразного топлива,

воспламеняющегося при нагреве до 450–600 °С (в зависимости от состава), не только ускоряет нагрев шихты и обеспечивает снижение расхода коксика, но и создает более благоприятные температурно-временные параметры аглопроцесса, расширяя высокотемпературную зону жидкофазного спекания (1200–1400 °С). При этом расход газообразного топлива необходимо подбирать индивидуально в зависимости от свойств топлива и компонентного состава агломерируемой шихты, учитывая также возможное формирование самовоспламеняющихся газозвушных смесей.

В настоящей работе задача определения рационального расхода газообразного топлива, подаваемого в слой спекаемой шихты, решалась на примере использования природного газа (ПГ) при спекании агломерационной шихты на основе магнетитовых руд и концентратов Курской магнитной аномалии (КМА), что характерно для условий работы агломерационного цеха АО «Уральская Сталь».

**Методика эксперимента.** Исследования проводились в металлургической лаборатории АО «Уральская Сталь», оборудованной барабанным окомкователем (диам. 0,6 м, длина 1,2 м) и агломерационной чашей (диам. 210 мм; высота слоя до 500 мм; разрежение до 20 кПа). В качестве компонентов шихты использовали материалы, применяемые для производства агломерата в условиях АО «Уральская Сталь» (по состоянию на 2022 г.): концентрат Лебединского ГОКа (ЛебГОК), аглоруды Михайловского ГОКа (МГОК) и Бакальского рудоправления (БРУ), известняк Аккермановского месторождения и коксовую мелочь коксохимического производства АО «Уральская Сталь».

Для достижения цели исследования, основываясь на информации, полученной при изучении научно-технической литературы по вопросу подачи в слой спекаемой шихты газообразного топлива, спланирован комплекс лабораторных экспериментов, предусматривающий проведение пяти серий опытов:

- серия № 1 – при стандартной технологии без подачи газообразного топлива в слой спекаемой шихты (база) при высоте слоя 350 мм, характерного для условий работы агломерационного цеха АО «Уральская Сталь»;
- серии №№ 2–4 – с подачей в слой спекаемой шихты ПГ с удельными расходами 3, 5 и 7 м<sup>3</sup>/т (с теплотворной способностью 41 МДж/нм<sup>3</sup>) при высоте слоя 350 мм;
- серия № 5 – с подачей в слой спекаемой шихты ПГ (оптимальный расход по результатам серий №№ 2–4) при высоте слоя шихты 500 мм, максимального по техническим условиям лабораторной установки и характерного для современных агломерационных производств.

Состав опытной шихты рассчитывали для получения агломерата основностью по  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,6$  ед. с содержанием 1,6% MgO (средние показатели агломерата АО «Уральская Сталь» за 2022 г.), при постоянном соотношении концентрата и руды КМА и расходе руды БРУ, обеспечивающем требуемый уровень MgO. Расход твердого топлива в базовых условиях подбирали экспериментально из условия получения регла-

ментируемого уровня содержания FeO в агломерате 11–13%. Расход коксика в опытных условиях дополнительно снижали на величину, эквивалентную 120% тепловой энергии, поступающей от сжигания газообразного топлива (с учетом теплотворной способности коксовой мелочи 27,1 МДж/кг). Величина коэффициента замены коксика природным газом, равная 1,2 ед. (в тепловом отношении), была получена экспериментально при проведении пробных спеканий и обусловлена повышением полноты сгорания углерода коксика из-за расширения высокотемпературной зоны горения. В серии экспериментов с высотой спекаемого слоя 500 мм расход коксика дополнительно снижали на 10% (отн.) в сравнении со спеканиями при высоте слоя 350 мм.

Дозирование компонентов агломерационной шихты производили в соответствии с результатами расчета шихты на экспериментальные спекания при различных условиях подачи газообразного топлива. При подготовке агломерационной шихты производили отсев крупных фракций железорудных материалов (более 10 мм), что снижало влияние нестабильности гранулометрического состава компонентов на результаты окомкования и аглопроцесса.

Смешивание, увлажнение и окомкование аглошихты проводили в барабанном окомкователе в идентичных условиях:

- смешивание без увлажнения в течение 2 мин;
- окомкование с увлажнением до оптимальной влажности (7,0–7,5%, характерной для шихтовых условий работы АО «Уральская Сталь» [20]) в течение 2 мин;
- окомкование без увлажнения в течение 1 мин.

Для оценки результатов окомкования и идентичности проведения опытов проводили отбор проб окомкованной шихты с последующим определением влажности, гранулометрического состава и эквивалентного (среднегармонического) диаметра гранул. Подготовленную к спеканию агломерационную шихту загружали в аглочашу, куда предварительно укладывался слой постели из возврата крупностью 5–10 мм массой 2 кг (30–40 мм по высоте аглочашы).

Для осуществления безопасной подачи газообразного топлива в слой спекаемой шихты и поддержания заданных параметров его дозирования агломерационную установку оснастили колпаком (рис. 1), оборудованным запорно-измерительной аппаратурой для подачи газообразного топлива и воздуха, принудительная подача которого с расходом, в 10 раз превышающем расход газообразного топлива, обеспечивает хорошие условия смешивания и предотвращает образование взрывоопасных смесей.

Во избежание воспламенения природного газа над поверхностью спекаемой шихты, подачу газообразного топлива начинали через 1 мин после зажигания, в течение которой на поверхность спекаемой шихты распыляли воду. Подачу природного газа проводили в течение 10 мин на опытных спеканиях серий №№ 2–4 и в течение 15 мин при высоте слоя 500 мм, что примерно соответствовало 2/3 продолжительности спекания и обеспечивало улучшение температурно-временных условий формирования верхней и средней частей спека.

В процессе спекания фиксировали основные параметры аглопроцесса: разрежение в вакуум-камере (после включения вакуумного насоса, после зажигания и по завершении спекания), температура в вакуум-камере (максимальное значение), продолжительность спекания и величина усадки.

По завершении аглопроцесса и охлаждения спека до 100 °С полученный агломерат выгружали из аглочашы и определяли массу спека. Полученный аглоспек подвергали троекратному сбрасыванию (по ГОСТ 25471–82) с последующим определением гранулометрического состава и выхода годного. Годный агломерат подвергали механическим испытаниям, заключающимся в определении прочности на удар и истирание во вращающемся барабане в соответствии с ГОСТ 15137–77.

Для исключения ошибок при выполнении исследования в каждой серии экспериментов проводили не менее трех спеканий с целью достижения воспроизводимости результатов. Условия проведения опытных спеканий сведены в табл. 1.

**Результаты эксперимента.** Усредненные результаты экспериментов по изучению влияния расхода газообразного топлива, подаваемого в слой спекаемой шихты, на показате-

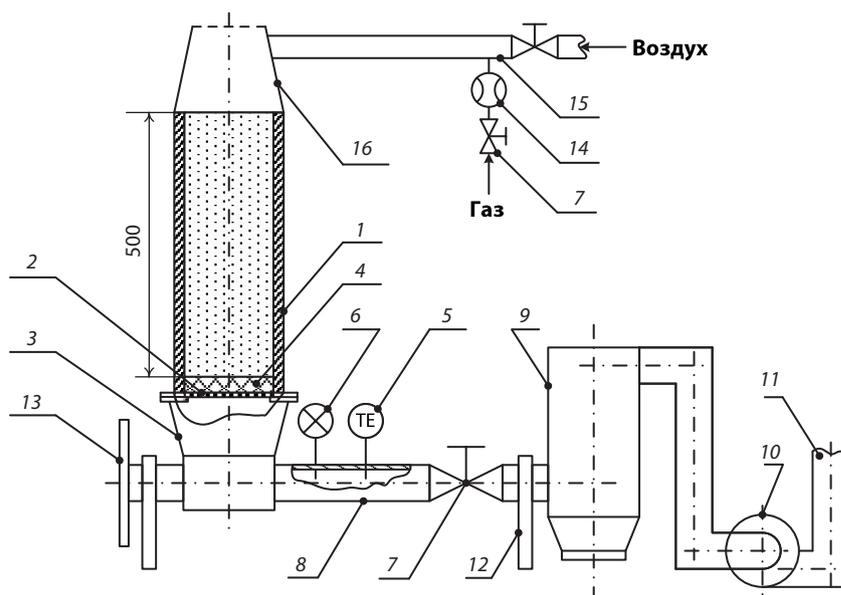


Рис. 1. Схема агломерационной установки: 1 – спекательная чаша; 2 – колосниковая решетка; 3 – вакуум-камера; 4 – постель; 5 – манометр; 6 – термопара; 7 – вентиль; 8 – коллектор; 9 – пылеуловитель; 10 – эксгаустер с фильтром; 11 – дымовая труба; 12 – опорная система; 13 – поворотное колесо; 14 – расходомер; 15 – смеситель; 16 – колпак

Таблица 1. Условия проведения опытных спеканий

Показатель	Значения по опытным сериям				
	1 (база)	2	3	4	5
Высота спекаемого слоя, мм	350				500
Содержание С в шихте, %	4,2	3,79	3,53	3,26	3,42
Расход ПГ, м <sup>3</sup> /т спека	0,0	3,0	5,0	7,0	3,0
Расход топлива, кг у.т./т спека*	53,22	52,57	52,01	51,45	47,73
<i>Расход компонентов агломерационной шихты, кг/т спека</i>					
Руда МГОКа	157,13	157,36	157,50	157,65	157,73
Концентрат ЛеБГОКа	715,82	716,85	717,50	718,17	718,57
Известняк	212,92	211,95	211,34	210,71	210,34
Руда БРУ	92,57	92,79	92,93	93,07	93,15
Возврат	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
Коксик	57,75	52,30	48,67	45,04	47,07
ИТОГО (без возврата)	1236,19	1231,25	1227,94	1224,64	1226,86
<i>Примечание.</i> Исходя из теплоты сгорания 1 кг условного топлива (или 1 м <sup>3</sup> газообразного) 29,3 МДж при теплотворной способности ПГ 41 МДж/м <sup>3</sup> и теплотворной способности коксовой мелочи 27,1 МДж/кг.					

ли спекания и качество агломерата представлены в табл. 2–4.

Представленные в табл. 2–4 данные свидетельствуют об идентичных условиях проведения экспериментов, что подтверждается стабильной по опытным сериям спеканий влажности окомкованной шихты на уровне 7,15–7,35% (см. табл. 2), а также низкими отклонениями от установленных параметров по основности и содержанию MgO в агломерате (см. табл. 4).

В целом, сравнение усредненных результатов лабораторных спеканий по традиционной технологии (серия 1) и опытной с подачей в слой спекаемой шихты газообразного топлива (серии 2–5) позволяет заключить, что при относи-

Таблица 3. Контролируемые и расчетные параметры спекания

Показатель	Значения по опытным сериям					
	1 (база)	2	3	4	5	
Фактический расход ПГ, м <sup>3</sup> /т спека	0,00	3,07	5,03	6,97	3,01	
Относительная усадка слоя, %	11,4	12,3	12,6	12,9	13,0	
Разрежение в вакуум-камере, кПа	до зажигания	6,4	6,2	6,1	6,0	7,6
	после зажигания	9,6	9,5	9,4	9,4	11,4
	в конце спекания (при $t_{отк макс}$ )	4,6	5,1	5,3	5,5	8,8
Максимальная температура в вакуум-камере, °С	380	375	360	355	350	
Время спекания, мин	18,5	16,1	16,7	16,9	24,0	
Скорость спекания, мм/мин	18,9	21,7	21,0	20,7	20,8	
Выход годного (+5 мм) из спека после сбрасывания, %	70,06	74,78	76,49	75,41	80,63	
Производительность по годному агломерату (после сбрасывания), т/(м <sup>2</sup> ·ч)	1,33	1,60	1,53	1,50	1,71	

Таблица 2. Усредненные результаты подготовки аглошихты к спеканию

Показатель	Значения по опытным сериям					
	1 (база)	2	3	4	5	
Влажность шихты, %	7,35	7,2	7,25	7,15	7,25	
Фракционный состав окомкованной шихты, %	+10 мм	5,10	4,88	3,87	3,25	4,12
	5–10 мм	20,94	22,53	26,89	25,78	27,97
	3–5 мм	30,15	32,16	31,41	35,95	35,16
	1–3 мм	36,85	33,92	31,87	29,59	28,30
0–1 мм	6,96	6,51	5,97	5,44	4,44	
Степень окомкования мелочи фр. 0–1 мм, %	89,51	90,20	91,03	91,83	93,32	
Эквивалентный диаметр гранул окомкованной шихты, мм	4,19	4,30	4,42	4,40	4,61	

тельно постоянных условиях проведения опытов показатели аглопроцесса и качества агломерата при подаче в слой спекаемой шихты природного газа превосходят аналогичные показатели, достигаемые при использовании только твердого топлива. Эффективность использования газообразного топлива дополнительно повышается с увеличением высоты спекаемого слоя.

Улучшение результатов аглопроцесса с подачей в слой газообразного топлива, очевидно, объясняется улучшением температурно-временных условий спекания (температуры в спекаемом слое и времени выдержки при температуре свыше 1200 °С) [1, 4–6, 15–19]. Для их оценки на двух экспериментальных спеканиях, базовом (серия № 1) и опытным

Таблица 4. Усредненные данные о химическом составе и показателях качества агломерата

Показатель	Значения по опытным сериям					
	1 (база)	2	3	4	5	
Фракционный состав агломерата после сбрасывания, %	+40 мм	10,28	15,59	16,44	15,81	18,40
	20–40 мм	15,01	15,95	17,08	14,73	15,38
	10–20 мм	24,45	25,84	27,53	29,33	30,63
	5–10 мм	20,32	17,40	15,44	15,54	16,23
Барabanная прочность, %	5–0 мм	29,94	25,22	23,51	24,59	19,37
	на удар	64,75	68,63	70,11	72,11	71,55
на истирание	5,63	5,11	5,02	4,78	5,13	
Фактический состав агломерата, %	Fe общее	55,37	55,61	55,72	55,67	55,80
	FeO	11,12	12,61	12,71	12,23	12,84
	SiO <sub>2</sub>	7,24	7,4	7,34	7,2	7,3
	CaO	11,5	11,7	11,8	11,6	11,7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,89	0,81	0,88	0,79	0,84
	MgO	1,67	1,61	1,56	1,63	1,65
	S	0,045	0,037	0,034	0,032	0,034
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,041	0,039	0,038	0,041	0,045	
Основность (CaO/SiO <sub>2</sub> ), ед.	1,59	1,58	1,61	1,61	1,60	
Содержание остаточного углерода, %	0,47	0,22	0,11	0,06	0,08	

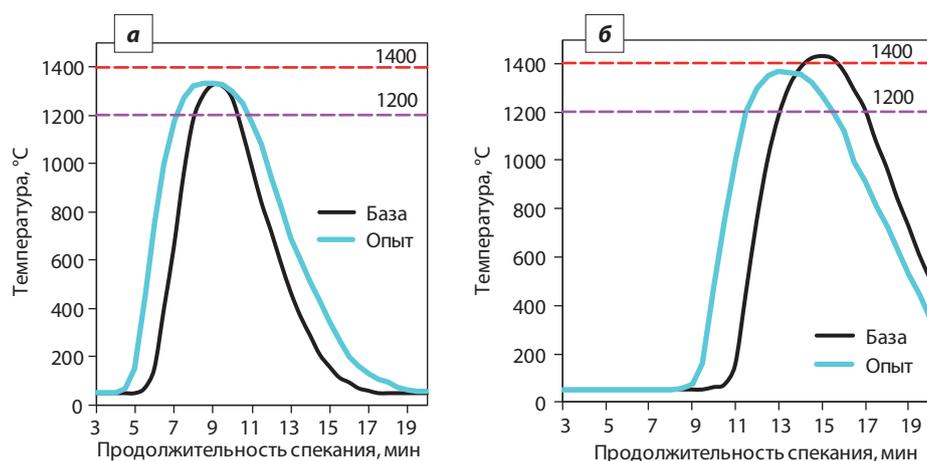


Рис. 2. Динамика температуры в верхней (а) и нижней (б) частях спекаемого слоя

с расходом ПГ  $3 \text{ м}^3/\text{т}$  спека (серия № 2) при высоте спекаемого слоя 350 мм, были проведены измерения температуры в двух уровнях по высоте спекаемого слоя шихты – верхнем (на расстоянии 150 мм от уровня шихты в аглочаше) и нижнем (на расстоянии 100 мм от уровня постели). Динамика температуры спекаемой шихты в верхнем и нижнем уровнях представлена на рис. 2.

Представленные на рис. 2, а данные подтверждают улучшение температурно-временных условий формирования агломерата в верхней части слоя, что главным образом выражается в двукратном увеличении продолжительности пребывания шихты в зоне жидкофазного спекания (более  $1200^\circ\text{C}$ ) – с 1,9 до 3,8 мин. Продолжительность спекания при температуре более  $1200^\circ\text{C}$  в нижней части слоя в базовом и опытных условиях была сопоставима (см. рис. 2, б), несмотря на то, что подачу ПГ в опытном спекании прекращали через 10 мин от начала спекания, т.е. до подхода зоны горения к уровню нижней термопары. При этом благодаря меньшему расходу коксика в опытном спекании, температура спекаемой шихты в нижней части слоя осталась в благоприятном диапазоне  $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$ , в отличие от базовых условий, при которых максимальная температура повышалась до  $1430^\circ\text{C}$ . Кроме того, можно отметить снижение скорости охлаждения спека при подаче в слой ПГ, что также улучшает условия формирования агломерата.

Наилучшие показатели аглопроцесса по выходу годного, скорости спекания, удельной производительности и качеству агломерата достигаются при различных условиях проведения экспериментов.

Скорость спекания достигает максимальных значений при расходе ПГ на уровне  $3 \text{ м}^3/\text{т}$  спека (серия № 2), а при дальнейшем увеличении расхода газа и повышении высоты слоя наблюдается ее снижение. Такая закономерность обусловлена одновременным изменением условий окомкования и спекания при использовании газообразного топлива. С одной стороны, использование газообразного топлива, частично заменяющего коксик, улучшает условия окомкования [1, 16–18, 21], что проявляется в увеличении доли фракции 5–10 мм

при одновременном снижении содержания гранул крупностью 0–1 и 1–3 мм (см. табл. 2). Кроме того, расширение высокотемпературной зоны горения и увеличение интенсивности теплопереноса ускоряет нагрев шихты, также способствуя росту скорости спекания. С другой стороны, расширение высокотемпературной зоны способствует более полному проплавлению аглошихты, что приводит к увеличению усадки, следствием чего является снижение газопроницаемости спекаемого слоя, что также подтвер-

ждается ростом разрежения в конце спекания (см. табл. 3). В результате, несмотря на потенциальное увеличение газопроницаемости столба сырой шихты с увеличением расхода газа, что подтверждается снижением разрежения после зажигания (см. табл. 3), газопроницаемость в процессе спекания падает, приводя к снижению скорости спекания при повышенных расходах ПГ. Увеличение высоты спекаемого слоя приводит к росту потерь напора, что сопровождается дополнительной усадкой и ухудшением газопроницаемости. При этом в сравнении с базовыми условиями спекания подача в слой спекаемой шихты газообразного топлива обеспечивает повышение газопроницаемости слоя и скорости спекания не только при стабильной высоте слоя спекаемой шихты, но и при ее увеличении до 500 мм.

*Выход годного и содержание мелочи (0–5 мм) в агломерате.* Улучшение температурно-временных условий спекания при подаче в слой спекаемой шихты газообразного топлива, проявляющееся в расширении высокотемпературной зоны жидкофазного спекания ( $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$ ) и снижении скорости охлаждения агломерата, способствует увеличению выхода годного агломерата (после сбрасывания) в сравнении с базовыми условиями:

- на 6,7–9,1% (отн.) при подаче газообразного топлива и высоте слоя 350 мм;
- на 15,1% (отн.) при высоте слоя 500 мм и расходе газа  $3 \text{ м}^3/\text{т}$  спека.

Значительное повышение выхода годного с увеличением высоты спекаемого слоя до 500 мм (серия № 5) обусловлено снижением доли верхней части слоя (30–50 мм), которая формируется в период от момента зажигания до начала подачи в слой газообразного топлива, т.е. в условиях дефицита тепла из-за сниженного расхода коксика.

Зеркальным отображением повышения выхода годного в опытных сериях с подачей в слой спекаемой шихты ПГ стало сокращение доли мелочи (0–5 мм) в агломерате после сбрасывания с 29,9% (при традиционном способе подачи топлива) до 24,6–25,2% в опытных сериях №№ 2–4 (при высоте слоя 350 мм) и до 19,37% при высоте слоя 500 мм.

В промышленных условиях спекания с меньшей долей влияния «пристеночного эффекта» можно ожидать дальнейшего повышения выхода годного (и снижения содержания мелочи) с ростом расхода газообразного топлива, подаваемого в слой спекаемой шихты, однако непропек верхней части шихты при этом не устраняется, что является одним из недостатков данного способа повышения эффективности аглопроцесса.

*Удельная производительность.* Прямым следствием наблюдаемого увеличения выхода годного и скорости спекания при подаче в слой газообразного топлива является увеличение удельной производительности, которая в экспериментальных сериях (№№ 2–4) при высоте слоя 350 мм выросла относительно базового уровня (серия № 1) на 13,2–20,7% (отн.), а при высоте слоя 500 мм рост производительности составил 28,5% (отн.).

*Содержание остаточного углерода и серы.* Расширение высокотемпературной зоны жидкофазного спекания (1200–1400 °С) и, соответственно, увеличение продолжительности пребывания шихты в зоне горения способствует повышению степени сгорания углерода твердого топлива, что подтверждается значительным снижением содержания остаточного углерода в агломерате в опытных спеканиях с подачей в слой ПГ (см. табл. 4). Более полное использование твердого топлива в опытных сериях позволяет снижать его расход на величину, превышающую по тепловому эквиваленту количество введенного тепла с газом без ухудшения тепловых условий спекания, что проявляется в снижении расхода условного топлива (см. табл. 1). Подтверждением нормальных тепловых условий спекания в опытных сериях является стабильное содержание FeO в агломерате на уровне 12,2–12,8%, что превышает аналогичные значения для базовых условий (см. табл. 4). Последнее позволяет говорить о возможности дальнейшего снижения расхода коксика без ухудшения тепловых условий спекания, выхода годного и прочностных свойств агломерата.

Дополнительным эффектом от сокращения расхода коксика является снижение содержания серы в агломерате (с 0,045 до 0,032–0,037%), удалению которой с отходящими газами также способствует повышение полноты сгорания твердого топлива.

*Барабанная прочность агломерата.* Улучшение барабанной прочности агломерата в опытных сериях с подачей в слой ПГ (табл. 4) объясняется повышением эффективности теплообмена при расширении высокотемпературной зоны горения, а также более полным сгоранием твердого топлива, что, в конечном итоге, обеспечивает создание благоприятных тепловых условий формирования агломерата, способствующих более полному завершению процессов твердо- и жидкофазного спекания. Результатом является получение агломерата с минимальным количеством внутренних напряжений со связкой на основе ферритов кальция и гематита при минимальной доле стекловидных фаз [4–6, 16–18, 22, 23].

## Заключение

Результаты опытных спеканий позволяют заключить, что введение в слой спекаемой шихты газообразного топлива обеспечивает существенное улучшение показателей аглопроцесса и качественные характеристики агломерата в сравнении с традиционной технологией агломерации. Увеличение высоты спекаемого слоя с одновременной подачей в слой газообразного топлива является дополнительным фактором улучшения показателей аглопроцесса. Полученные результаты объясняются улучшением температурно-временных условий спекания в результате расширения высокотемпературной зоны горения, что способствует более полному вовлечению рудной части шихты в процессы расплавообразования, а также обеспечивает более полное использование твердого топлива.

По совокупности показателей оптимальным расходом газообразного топлива, подаваемого в слой спекаемой шихты, следует считать вариант с расходом природного газа на уровне 3 м<sup>3</sup>/т спека (серия № 2 и серия № 5).

Для повышения эффективности использования газообразного топлива с точки зрения выравнивания тепловых условий спекания по высоте спекаемого слоя целесообразно снизить расход газа по мере продвижения зоны горения в нижние горизонты, т.е. по мере продвижения спекательных тележек по рабочей части агломашины. Этот технологический прием является аналогом перераспределения твердого топлива по высоте аглошихты, однако его реализация более проста в исполнении.

При реализации технологии агломерации с подачей в слой спекаемой шихты газообразного топлива необходимо учитывать ряд ограничений:

- возможность самовоспламенения газообразного топлива над спекаемым слоем, для предотвращения которого необходимо осуществлять подачу газа не ранее 1 мин после зажигания, а также оснащать устройство подачи газа автоматической системой отключения при самовоспламенении или перегреве форсунок [19];

- необходимость использования твердого топлива с минимальным количеством крупных фракций (>3 мм), повышающих вероятность воспламенения газообразного топлива над слоем вследствие более продолжительного сгорания;

- ухудшение в сравнении с традиционным вариантом агломерации условий спекания верхней части аглошихты (30–50 мм), формирующейся в первую минуту после зажигания без подачи газообразного топлива, но при недостатке твердого топлива.

Снижение негативных последствий применения технологии подачи газообразного топлива в слой спекаемой шихты обеспечивается при увеличении высоты слоя. При этом увеличение высоты спекаемого слоя обязательно должно сопровождаться повышением качества окомкования как по степени окомкования мелочи, так и по прочности гранул.

## Список источников

1. **Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н.** Агломерация рудных материалов. Научное издание. Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. 400 с.
2. **Фролов Ю.А.** Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. М. : Металлургиздат, 2016. 672 с.
3. **Huang X.X., Fan X.H., Chen X.L., Zhao X.Z., Gan M.** Optimisation model of fuel distribution in materials bed of iron ore sintering process // *Ironmaking & Steelmaking*. 2019. Vol. 46:7. P. 649–655. DOI: 10.1080/03019233.2018.1440160
4. **Jeon Ji-Won, Jung Sung-Mo, Sasaki Yasushi.** Formation of Calcium Ferrites under Controlled Oxygen Potentials at 1273 K // *ISIJ Intern.* 2010. Vol. 50, No. 8. P. 1064–1070.
5. **Xuewei Lv, Chenguang Bai, Qingyu Deng et al.** Behavior of Liquid Phase Formation during Iron Ores Sintering // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51, No. 5. P. 722–727.
6. **Мальшева Т.Я., Долицкая О.А.** Петрография и минералогия железорудного сырья: учеб. пособ. для вузов. М. : МИСиС, 2004. 424 с.
7. **Феокистов А.В., Одинцов А.А.** Повышение эффективности использования твердого топлива при двухслойной агломерации // *Металлург*. 2014. № 6. С. 66–73.
8. **Zhou M., Wang Y., Zhao D. et al.** A Study of Double Layer Pre-sintering Toward Super-High Bed Height // 11th Intern. Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, 2020. P. 639–651.
9. **Zhong Q., Liu H.B., Xu, L.P. et al.** An efficient method for iron ore sintering with high-bed layer: double-layer sintering // *J. Iron Steel Research Intern.* 2021. Vol. 28 (11). P. 1366–1374.
10. **Шурхал В.А.** Внешний нагрев при агломерации. Киев : Наукова думка, 1985. 192 с.
11. **Fan X., Yu Z., Gan M., Chen X., Huang Y.** Flue gas recirculation in iron ore sintering process // *Ironmaking & Steelmaking*. 2016. Vol. 43:6. P. 403–410. DOI: 10.1179/1743281215Y.0000000029.
12. **Фролов Ю.А., Aggarwal N., Полоцкий Л.И.** Исследование процесса агломерации с рециркуляцией отходящих газов // *Металлург*. 2017. № 8. С. 25–32.
13. **Chen X.L., Fan X.H., Gan M., Huang Y.S., Yu Z.Y.** Sintering behaviours of iron ore with flue gas circulation // *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 45:5. P. 434–440. DOI: 10.1080/03019233.2017.1280985
14. **Shapovalov A.N. et al.** Improvement of Agglomeration Technology by a Sinter Mix Preheating // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 946. P. 500–505. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.946.500
15. **Лобанов В.И., Матюхин В.И., Гольцев В.А.** Теплотехнические и технологические аспекты использования слоевого способа сжигания природного газа в металлургических агрегатах: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «С творческим наследием Б.И. Китаева в XXI век». Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 1998. С. 122–125.
16. **Oyama N., Iwami Y., Yamamoto T. et al.** Development of Secondary-fuel Injection Technology for Energy Reduction in the Iron Ore Sintering Process // *ISIJ Intern.* 2011. Vol. 51, No. 6. P. 913–921.
17. **Yuji Iwami, Tetsuya Yamamoto, Takahide Higuchi et al.** Effect of Oxygen Enrichment on Sintering with Combined Usage of Coke Breeze and Gaseous Fuel // *ISIJ International*. 2013. Vol. 53, No. 9. P. 1633–1641.
18. **Cheng Z., Yang J., Guo Z. et al.** Numerical analysis of heat and mass transfer coupled with gaseous fuel injection in reactive porous media // *J. Heat Transfer*. 2019. Vol. 141 (11). Art. 112601.
19. **Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Брагин В.В.** Технологические возможности производства железорудного агломерата при использовании комбинированного топлива // *Сталь*. 2019. № 11. С. 3–8.
20. **Шаповалов А.Н., Овчинникова Е.В., Майстренко Н.А.** Повышение качества подготовки агломерационной шихты к спеканию в условиях ОАО «Уральская Сталь» // *Металлург*. 2015. № 3. С. 30–36.
21. **Пузанов В.П., Кобелев В.А.** Введение в технологии металлургического структурирования. Екатеринбург : УО РАН, 2005. 501 с.
22. **Ширяева Е.В., Подгородецкий Г.С., Мальшева Т.Я. и др.** Влияние низкощелочного красного шлама на свойства и микроструктуру агломерата из шихтовых материалов ОАО «Уральская Сталь» // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57, № 1. С. 14–19.
23. **Shapovalov A.N. et al.** 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 625 012009. DOI 10.1088/1757-899X/625/1/012009

*Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 20.05.2023; принята к публикации 15.10.2023*