

Влияние инъекции водяного пара в слой спекаемой шихты на показатели агломерационного процесса и состав отходящих газов

А. Н. Шаповалов, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, заместитель директора филиала по науке и инновациям¹, канд. техн. наук

Р. Р. Дёма, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения², профессор кафедры металлургических технологий и оборудования¹, профессор кафедры машиностроения³, докт. техн. наук, эл. почта: demar78@mail.ru

Р. Н. Амиров, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения², доцент кафедры металлургических технологий и оборудования¹, доцент кафедры машиностроения³, канд. техн. наук

О. Р. Латыпов, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения², доцент кафедры машиностроения³, канд. техн. наук

¹ Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС», Новотроицк, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

³ Херсонский государственный университет, Геничск, Россия

Представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию влияния инъекции пара в слой спекаемой шихты на показатели агломерационного процесса, качество агломерата и состав отходящих газов при спекании железорудных материалов Курской магнитной аномалии.

Установлено, что введение пара с температурой 200 °С в слой спекаемой шихты в исследуемом диапазоне расходов (1,5–4,5 нм³/т шихты) способствует повышению вертикальной скорости спекания, удельной производительности и холодной прочности агломерата. С увеличением расхода пара при спекании «холодной» шихты показатели спекания и качества агломерата изменяются по кривой с экстремумом, достигая наилучших результатов при инъекции пара в середине процесса спекания в течение 5 мин при удельном расходе 3,0 нм³/т шихты. При этом содержание СО и NO_x в отходящих газах снижается пропорционально повышению расхода водяного пара в шихту. Полученные результаты обусловлены влиянием пара на кинетику горения топлива, тепловые условия спекания и скорость нагрева шихты. Снижение эффективности использования пара с увеличением его расхода при спекании «холодной» шихты связано с увеличением влажности шихты в зоне переувлажнения, снижением структурной прочности слоя и ухудшением его газопроницаемости. Поэтому полное использование потенциальных возможностей инъекции пара в слой спекаемой шихты возможно только при спекании предварительно подогретой шихты (температурой более 60 °С).

Результаты лабораторных спеканий предварительно нагретой до 70–80 °С агломерационной шихты с подачей водяного пара в слой с расходом 1,08 нм³/ч, начиная с 10-й минуты от начала спекания, при поддержании температуры пара на уровне 200 °С подтвердили высокую эффективность совмещения технологии агломерации с предварительным подогревом шихты и введением в слой водяного пара.

Ключевые слова: агломерационный процесс, инъекция водяного пара, кинетика горения топлива, тепловые условия спекания, показатели спекания, качество агломерата, эмиссия СО и NO_x.

DOI: 10.17580/chm.2025.09.01

Введение

Окускование железорудных материалов методом агломерации сопровождается значительными энергозатратами и выбросами загрязняющих веществ [1, 2], что связано с горением твердого топлива в слое спекаемой шихты. Поэтому повышение эффективности использования твердого топлива является одним из наиболее актуальных направлений совершенствования технологии агломерационного производства.

Эффективность использования твердого топлива при агломерации зависит от реакционной способности, технического и фракционного состава топлива, а также кинетических условий его горения [3–6]. Последние зависят от качества подготовки шихты к спеканию [5–10], крупности топлива и его распределения в спекаемом слое [11–14], а также от состава

газов, проходящих через слой спекаемой шихты. Одним из наиболее эффективных вариантов воздействия на условия и результаты горения топлива является инъекция в слой спекаемой шихты газов, непосредственно участвующих в процессах горения. Среди подобных технологий можно выделить инъекцию топливных газов [3, 15–17], кислорода [1–3, 18–20] и водяного пара [21–24]. Наиболее простым и действенным вариантом, оказывающим комплексное влияние как на кинетику горения твердого топлива, так и на тепловые условия спекания и эффективность теплопередачи, является использование водяного пара, распыляемого над слоем спекаемой шихты. Кроме того, активное участие водяного пара в реакциях горения создает благоприятные условия для снижения содержания СО и NO_x в отходящих газах [21–25].

Аналитический обзор научно-технической литературы по вопросу инъекции водяного пара в слой спекаемой шихты показал, что в зависимости от условий спекания и параметров водяного пара диапазон оптимального его содержания в просасываемом воздухе изменяется в широких пределах — от 5 до 100 г/м³ (от 0,2 до 25 м³/т шихты) [21–25]. Одним из существенных факторов, влияющих на результаты агломерационного процесса, является состав спекаемых железорудных материалов, определяющих их поведение при агломерации. Поэтому целью данной работы является изучение влияния инъекции водяного пара в слой спекаемой шихты на показатели агломерационного процесса, качество агломерата и состав отходящих газов при спекании железорудных материалов Курской магнитной аномалии.

Таблица 1

Химический состав шихтовых материалов, % (мас.)

Элемент	Концентрат	Руда	Доломит	Известняк	Известь
Fe	67,91	52,60	1,27	1,88	2,83
SiO ₂	4,93	13,52	6,49	0,9	1,35
CaO	0,34	1,09	27,93	51,24	77,04
Al ₂ O ₃	0,43	1,53	1,5	0,34	0,51
MgO	0,15	0,44	19,18	0,61	0,92
S	0,026	0,041	0,034	0,056	0,084
P ₂ O ₅	0,039	0,063	0,070	0,044	0,066
П.п.п.	0,00	8,21	42,89	44,05	18,87

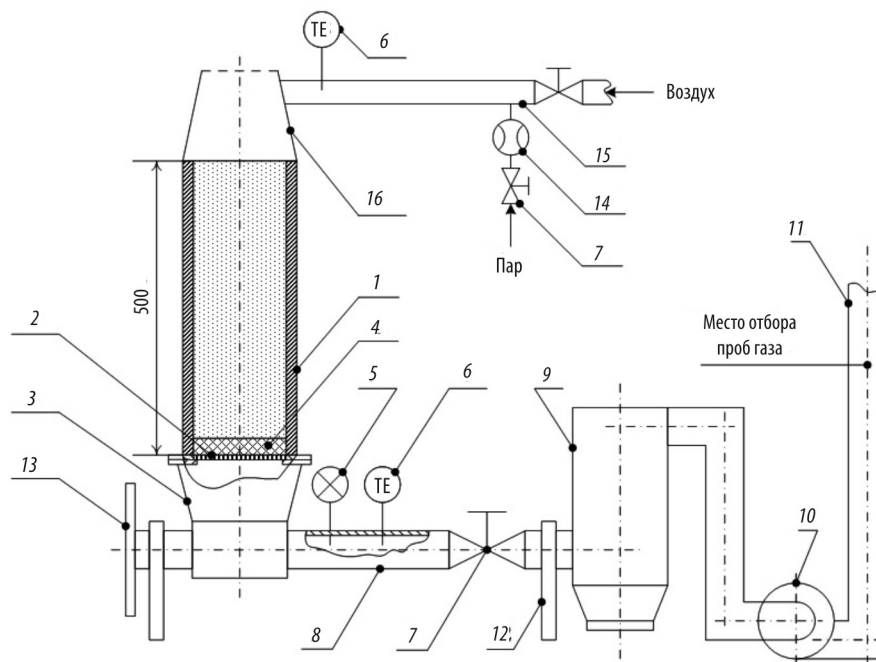
Материал и методика исследования

Лабораторные эксперименты по изучению влияния инъекции водяного пара в слой спекаемой шихты проводили с использованием материалов, состав которых представлен в табл. 1.

Состав опытной шихты рассчитывали исходя из получения агломерата с основностью по отношению $(CaO/SiO_2) = 1,7$ при содержании 2,2 % MgO с учетом расхода извести 45 кг/т. Содержание концентрата и агломерационной руды в рудной смеси составляет 85 и 15 % соответственно. Расход коксика поддерживали постоянным для обеспечения содержания горючего углерода в шихте на уровне 3,4 %, что позволяет получать в базовых условиях агломерат с содержанием 11–12 % FeO. Отклонение уровня FeO в опытных спеканиях является индикатором эффективности сгорания топлива и тепловых условий спекания.

Смешивание и окомкование шихты проводили в барабанном окомкователе (диаметром 0,6 м и длиной 1,2 м) в идентичных условиях. Спекание осуществляли в аглочаше диаметром 210 мм при поддержании постоянной высоты слоя шихты на уровне 510 мм. Схема агломерационной установки приведена на рис. 1.

При проведении лабораторных экспериментов инъекцию пара в слой спекаемой шихты выполняли при расходе, обеспечивающем повышение концентрации водяных паров в просасываемом воздухе от 5 до 15 г/м³ с шагом 5 г/м³. Для минимизации негативного влияния пара на тепловые условия формирования верхней части спека его подачу осуществляли с 10-й минуты от начала спекания в течение 5 мин при спекании «холодной» шихты и до конца спекания при работе на предварительно подогретой шихте. Исходя из принятых

**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 — эксгаузер с фильтром; 11 — дымовая труба; 12 — опорная система; 13 — поворотное колесо; 14 — электромагнитный расходомер ТБН РМ-5; 15 — смеситель; 16 — колпак

расходно-временных параметров подачи пара и среднего количества просасываемого через спекаемый слой шихты воздуха в количестве 1,45 м³/мин, расход пара в период его инъекции изменяли от 0,54 до 1,62 нм³/ч.

Пар, поступающий к аглочаше, имеет температуру 205–220 °С и давление 0,46 МПа. Температуру пара контролировали термодатчиком, размещенной в смесителе, и корректировали до постоянного уровня 200 °С принудительной подачей в смеситель воздуха (см. рис. 1). Для обеспечения заданного расхода пара в диапазоне 0,54–1,62 нм³/ч рабочий расход пара изменяли в интервале от 0,2 до 0,6 м³/ч. Отверстия в верхней части колпака обеспечивали свободное поступление воздуха в спекаемый слой. Состав отходящих газов оценивали дискретно в период с 5-й по 20-ю минуту от начала спекания путем отбора проб газов из дымовой трубы каждые 3 мин с последующим анализом на СО и NO_x.

Результаты лабораторных спеканий и их обсуждение

В ходе исследований провели пять серий лабораторных спеканий:

- серия 1 спеканий «холодной» шихты по традиционной технологии с просасыванием воздуха естественной влажности;
- серии 2–4 спеканий «холодной» шихты с инъекцией водяного пара с температурой 200 °С в течение 5 мин через 10 мин после начала спекания при расходе пара 0,54; 1,08 и 1,62 нм³/ч (соответствует удельному расходу пара от 1,5 до 4,5 нм³/т агломерационной шихты);
- серия 5 спеканий предварительно подогретой до 100 °С шихты при непрерывной подаче в слой пара с температурой 200 °С через 10 мин после начала спекания и до его завершения при расходе пара 1,08 нм³/ч.

Усредненные условия и результаты лабораторных спеканий представлены в **табл. 2–4**.

Таблица 2

Усредненные результаты подготовки агломерационной шихты к спеканию

Параметры шихты		Значения по опытным сериям				
		1 (база)	2	3	4	5
Влажность, %		7,42	7,45	7,47	7,38	7,45
Температура, °С		~25	~25	~25	~25	~100
Фракционный состав, %	+10 мм	3,70	3,83	3,87	3,24	3,71
	5-10 мм	26,08	26,06	25,88	25,65	25,87
	3-5 мм	28,47	29,38	30,33	28,88	29,21
	1-3 мм	30,94	30,49	29,78	31,24	30,91
	0-1 мм	10,80	10,23	10,14	10,99	10,30
Средний диаметр гранул, мм		4,23	4,27	4,28	4,16	4,24

Таблица 3

Контролируемые и расчетные параметры спекания

Параметр		Значения по опытным сериям				
		1 (база)	2	3	4	5
Расход пара, нм ³ /ч		0	0,54	1,08	1,62	1,08
Длительность инъекции пара, мин		0	5	5	5	10
Удельный расход пара, нм ³ /т шихты		0	1,5	3,0	4,5	6,0
Разрежение в вакуум-камере, кПа	до зажигания	6,63	6,50	6,57	6,60	6,53
	после зажигания	9,47	9,50	9,47	9,50	7,33
	в конце спекания	3,93	3,93	3,97	4,13	2,70
Относительная усадка слоя, %		9,8	9,8	10,0	10,78	4,31
Изменение содержания СО от базы, % (отн.)	в период подачи пара	–	-14,78	-18,26	-20,00	-26,97
	за время спекания	–	-6,06	-7,58	-9,21	-17,62
Изменение содержания NO _x от базы, % (отн.)	в период подачи пара	–	-10,71	-12,86	-15,00	-21,48
	за время спекания	–	-4,50	-5,21	-5,69	-14,69
Максимальная температура в вакуум-камере, °С		418	422	427	425	453
Длительность спекания, мин		25,14	24,11	23,81	24,00	20,78
Скорость спекания, мм/мин		20,29	21,15	21,43	21,26	24,55
Выход годного (+5 мм) из спека после сбрасывания, %		81,2	81,8	81,9	81,8	82,24
Производительность по годовому агломерату, т/(м ² ·ч)		1,453	1,525	1,544	1,529	1,770

Таблица 4

Химический состав и показатели качества агломерата

Параметр	Значения по опытным сериям					
	1 (база)	2	3	4	5	
Содержание мелочи (0-5 мм) после сбрасывания, %	18,85	18,25	18,10	18,25	17,76	
Барабанная прочность, %	удар	66,29	67,10	67,72	67,78	69,35
	истирание	5,31	5,25	5,24	5,21	5,13
Химический состав агломерата, %	Fe _{общ}	57,31	57,33	57,36	57,49	57,56
	FeO	11,39	11,91	12,35	12,39	14,21
	SiO ₂	5,85	5,76	5,89	5,87	5,83
	CaO	9,94	9,84	9,98	9,96	10,02
	Al ₂ O ₃	0,78	0,77	0,73	0,78	0,79
	MgO	2,19	2,17	2,20	2,22	2,18
	S	0,028	0,028	0,026	0,030	0,029
	P ₂ O ₅	0,042	0,038	0,035	0,040	0,041
С ост.	0,21	0,16	0,12	0,07	0,05	
Основность (CaO/SiO ₂), ед.	1,70	1,71	1,70	1,70	1,72	

Результаты окомкования, а также начальные параметры сопротивления слоя шихты сопоставимы (см. табл. 2 и 3), что позволяет сделать объективные выводы о влиянии исследуемых параметров на показатели агломерационного процесса и состав отходящих газов.

Влияние инъекции пара на результаты спекания «холодной» шихты

Сравнение усредненных результатов лабораторных спеканий шихты по традиционной и опытной технологиям с подачей в слой спекаемой шихты водяного пара показало, что применение опытной технологии оказывает разнонаправленное влияние на показатели и результаты спекания.

Относительная усадка и газопроницаемость. Увеличение расхода пара, вводимого в слой при спекании «холодной» шихты, сопровождается повышением уминки слоя вследствие накопления влаги в зоне переувлажнения и снижения прочности гранул, что особенно заметно в 4-й серии опытов с максимальным расходом пара. Это является сдерживающим фактором повышения расхода пара при спекании «холодной» шихты.

Продолжительность и вертикальная скорость спекания. Несмотря на некоторое ухудшение газопроницаемости слоя шихты в спеканиях с использованием пара, особенно при повышенных его расходах, вертикальная скорость спекания в опытах с инъекцией пара оказалась выше базовых условий (см. табл. 3). Это, вероятно, объясняется действием факторов, способствующих повышению скорости перемещения зоны горения в период инъекции пара:

- улучшением кинетических условий горения, повышающих скорость реакций горения;
- повышением интенсивности теплопередачи и скорости движения фронта нагрева шихты до температуры воспламенения коксика.

При этом максимальная скорость спекания наблюдается при расходе пара в диапазоне от 1,5 до 3,0 нм³/т шихты, а при дальнейшем его увеличении скорость спекания падает, что связано с ухудшением газопроницаемости слоя спекаемой шихты из-за его повышенной уминки. Наибольшее повышение скорости спекания «холодной» шихты наблюдается при инъекции пара с удельным расходом 3,0 нм³/т шихты и составляет 5,6 % (отн.), что сопоставимо с результатами аналогичных исследований [21–23]. Относительно слабое влияние исследуемой технологии обусловлено кратковременностью периода подачи пара (5 мин), что связано с накоплением влаги в зоне переувлажнения и снижением газопроницаемости слоя спекаемой шихты.

Таким образом, минимальная продолжительность и соответствующая ей максимальная скорость спекания отмечены при инъекции в слой спекаемой шихты водяного пара температурой 200 °С и расходом 3,0 нм³/т, т. е. при условии реализации в максимальной степени каталитического действия водяных паров на скорость горения топлива и интенсивность теплопередачи при минимальной потере газопроницаемости из-за накопления влаги в зоне переувлажнения.

Выход годного. Инъекция пара в слой спекаемой шихты влияет на тепловые параметры агломерационного процесса разнонаправленно: с одной стороны, обогащение паром воздуха, просасываемого через слой агломерационной шихты, увеличивает скорость охлаждения верхней части спека из-за повышения удельной теплоемкости газовой смеси, что способствует разупрочнению агломерата верхней части и снижению выхода годного; а с другой — поступление нагретой паровоздушной смеси в зону горения повышает скорость и полноту горения топлива, способствуя росту температур в зоне горения и улучшению тепловых условий формирования агломерата в период подачи пара. Кроме того, сокращение продолжительности спекания улучшает тепловой баланс

агломерационного процесса, что является дополнительным фактором повышения выхода годного.

Улучшение теплового баланса аглопроцесса в опытах с инжекцией в спекаемый слой водяного пара подтверждается как ростом максимальных температур газа в конце спекания, так и повышением содержания в агломерате FeO (см. табл. 3 и 4), который является одним из критериев теплового уровня процесса. Наибольшее влияние инжекции пара на улучшение тепловых условий спекания наблюдается при удельном расходе пара $3,0 \text{ нм}^3/\text{т}$.

Таким образом, улучшение кинетических условий горения топлива, повышение полноты его сгорания, а также улучшение теплового баланса аглопроцесса, являются действенным противовесом отрицательному влиянию пара на тепловые условия формирования верхней части спека. Это находит свое отражение на выходе годного и содержании мелочи в агломерате (см. табл. 3 и 4).

Удельная производительность по годному агломерату достигает своего максимума при расходе пара $3 \text{ нм}^3/\text{т}$ шихты, что обусловлено как более высокой скоростью спекания, так и увеличением выхода годного при данном расходе пара.

Барабанная прочность агломерата. Полученные экспериментальные данные показали улучшение прочностных характеристик агломерата при использовании опытной технологии аглопроцесса с инжекцией водяного пара в слой спекаемой шихты (см. табл. 4), что связано с улучшением тепловых условий спекания. При этом абсолютный прирост прочности на удар не превышает 1,5 %, что соотносится с результатами аналогичных исследований [21–23]. По мере увеличения расхода пара во всем исследуемом диапазоне наблюдается незначительное снижение величины истираемости, т. е. прочностные свойства агломерата к абразивному воздействию повышаются. Это обусловлено улучшением тепловых условий формирования средней и нижней части спека, которые преимущественно переходят в годный агломерат и составляют основу пробы для оценки барабанной прочности.

Химический состав агломерата. Инжекция водяного пара в слой спекаемой шихты практически не отражается на химическом составе агломерата. Единственным отмеченным изменением в составе опытных агломератов является повышение содержания FeO по мере увеличения расхода пара, что объясняется улучшением тепловых условий спекания. Это позволяет рассматривать возможность снижения расхода коксика при использовании технологии агломерации с подачей пара в слой спекаемой шихты без ухудшения тепловых условий спекания, выхода годного и прочностных свойств агломерата, что отмечено и в других исследованиях [21–24].

Влияние инжекции пара на результаты спекания «горячей» шихты

Влияние температуры агломерационной шихты на эффективность инжекции пара в спекаемый слой оценивали по результатам 5-й серии экспериментов. Выбор условий подачи пара в этой серии спеканий обусловлен наилучшими результатами аглопроцесса, полученными в спеканиях холодной шихты с подачей водяного пара температурой $200 \text{ }^\circ\text{C}$ и расходом $1,08 \text{ нм}^3/\text{ч}$ при длительности инжекции пара 5 мин

(3-я серия спеканий с удельным расходом пара $3 \text{ нм}^3/\text{т}$ шихты). При этом в спеканиях «горячей» шихты подачу пара начинали с 10-й минуты от начала спекания и заканчивали при подходе зоны горения к колосниковой решетке.

Предварительный подогрев шихты, предотвращающий формирование зоны переувлажнения, ожидаемо повлиял на снижение усадки слоя, которая по сравнению с условиями спекания «холодной» шихты снизилась от 10,0 до 4,31 % (отн.) (см. табл. 3).

Отсутствие зоны переувлажнения и, как следствие, снижение уминки слоя, обеспечило уменьшение разряжения в вакуумной камере во всех периодах измерения, что подтверждает эффективность предварительного нагрева шихты как способа сохранения газопроницаемости в процессе спекания. Отмеченные изменения газопроницаемости привели к значительному сокращению продолжительности спекания, поэтому общая длительность подачи пара составила 10 мин, а удельный расход пара — $6,0 \text{ нм}^3/\text{т}$.

Совокупное влияние предварительного нагрева шихты и водяных паров на скорость горения топлива и интенсивность теплопередачи обеспечило снижение продолжительности спекания подогретой шихты до 20,78 мин, что на 17,3 % меньше базовой длительности спекания и на 12,7 % меньше длительности спекания «холодной» шихты при аналогичной интенсивности подачи пара $1,08 \text{ нм}^3/\text{ч}$. В результате вертикальная скорость спекания в опытах с предварительно подогретой шихтой составила 24,5 мм/мин, что превышает скорость спекания в базовых условиях на 21,0 %, а скорость спекания холодной шихты при аналогичной интенсивности подачи пара — на 14,6 %.

Тепловые условия агломерационного процесса при спекании предварительно нагретой шихты улучшились, что подтверждается как увеличением максимальной температуры агломерационных газов в конце спекания, так и повышением содержания FeO в агломерате (см. табл. 3 и 4). Указанные изменения тепловых условий спекания подтверждают дополнительные возможности по сокращению расхода твердого топлива при использовании комбинированной технологии агломерации предварительно подогретой аглошихты с инжекцией пара в слой.

Несмотря на общее улучшение теплового баланса агломерационного процесса, выход годного агломерата практически не изменился, что, вероятно, связано с негативными условиями охлаждения верхней части аглоспека.

Результатом существенного роста вертикальной скорости спекания при постоянном уровне выхода годного является значительное увеличение производительности:

- на 21,8 % (отн.) по сравнению с базовыми условиями спекания (серия 1);
- на 14,7 % (отн.) по сравнению со спеканием холодной шихты при аналогичной интенсивности подачи пара (серия 3).

Улучшение тепловых условий формирования средней и нижней частей спека оказало положительное влияние на барабанную прочность агломерата: прочность на удар увеличилась до 69,35 %, а истираемость снизилась до 5,13 %.

Таким образом, комбинация предварительного нагрева агломерационной шихты с инжекцией в спекаемый слой

водяного пара обеспечивает существенное улучшение практически всех показателей спекания, а также снимает ограничение по расходу пара в шихту, создавая дополнительные возможности по снижению выбросов загрязняющих веществ с отходящими газами.

Влияние инъекции пара на содержание CO и NO_x в отходящих газах

Оценку влияния инъекции водяного пара и температуры аглошихты на состав отходящих газов проводили по результатам анализа проб агломерационных газов, отобранных в период с 5-й по 20-ю минуту от начала спекания. Графическое представление динамики содержания CO и NO_x в отходящих газах при проведении лабораторных спеканий по традиционной (1-я серия) и опытным (3-я и 5-я серии) вариантам технологии, представлено на **рис. 2**.

Анализ приведенных на рис. 2 данных показывает, что инъекция водяного пара в слой спекаемой шихты оказывает существенное влияние на состав отходящих газов, что обусловлено активным участием H₂O и продуктов его реагирования (активных радикалов) в окислительно-восстановительных процессах с участием газообразных веществ. Это влияние проявляется в снижении концентрации CO и NO_x в отходящих газах в период инъекции пара в слой спекаемой шихты, и увеличивается по мере повышения расхода пара (см. табл. 3).

Общая тенденция к увеличению содержания CO в агломерационных газах в процессе спекания (см. рис. 2) обусловлена сокращением длительности пребывания газов в слое шихты по мере продвижения зоны горения, что снижает полноту догорания CO до CO₂. В период инъекции пара при спекании «холодной» шихты наблюдается резкое снижение концентрации CO в аглогазах на 0,4–0,6 % (абс.) (до 20 % (отн.)), что подтверждает влияние пара на кинетику и полноту процессов горения топлива. После завершения подачи пара в слой спекаемой шихты содержание CO возрастает, однако остается ниже базовых условий на 0,1–0,2 % (абс.), что, вероятно, обусловлено протеканием реакции $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ при

более высокой концентрации накопленной влаги в шихте. При этом общее снижение содержания CO в агломерационных газах в 3-й серии спеканий составило 7,58 % (отн.) по сравнению с базовыми условиями.

Содержание NO_x в отходящих газах в период проведения измерений (см. рис. 2) имеет устойчивую тенденцию к повышению по мере продвижения зоны горения к колосниковой решетке. Это, вероятно, связано с природой образования NO_x, условия формирования которого улучшаются с повышением температуры, что характерно для динамики процесса спекания. При этом в период инъекции водяного пара наблюдается резкое снижение концентрации NO_x (на 30–50 мг/м³), что коррелирует с изменением содержания CO и подтверждает общие условия их образования [26].

Снижение концентрации NO_x в период инъекции водяного пара объясняется тем, что помимо улучшения тепловых условий спекания, повышение концентрации водяных паров в зоне горения оказывает и противоположное воздействие на условия формирования NO_x:

- обеспечивает снижение концентрации кислорода в зоне горения в результате увеличения содержания водяных паров;
- способствует восстановлению азота из его оксидов с участием активных радикалов водорода и OH.

Общее снижение концентрации NO_x в период подачи пара составляет от 30 до 50 мг/м³, увеличиваясь по мере повышения расхода пара (см. табл. 3). При этом относительное снижение содержания NO_x в период инъекции не превышает 15 % от базового уровня, а аналогичное снижение за весь период измерений 5,69 %, что обусловлено ограничением по продолжительности введения пара при спекании «холодной» шихты.

Для более существенного снижения содержания CO и NO_x в агломерационных газах необходимо увеличивать продолжительность инъекции пара, что было реализовано при спекании предварительно подогретой шихты в 5-й серии экспериментов. Характер влияния инъекции водяного пара в слой спекаемой шихты на состав отходящих газов в спеканиях

«горячей» шихты не изменился (см. рис. 2). Однако с учетом более продолжительного периода введения пара относительное снижение концентрации CO в отходящих газах за период измерений по сравнению с базовыми условиями составило 17,62 %. Концентрация NO_x в отходящих газах по сравнению с базовыми условиями спекания снизилась на 14,69 %.

Таким образом, увеличение продолжительности инъекции пара в слой спекаемой шихты обеспечивает существенное снижение концентрации CO и NO_x в отходящих газах. Дальнейшее подавление выбросов CO и NO_x с отходящими газами возможно при спекании подогретой шихты и увеличении продолжительности периода подачи пара до 15 мин путем переноса периода введения пара ближе к началу спекания. Однако это может негативно отразиться на выходе

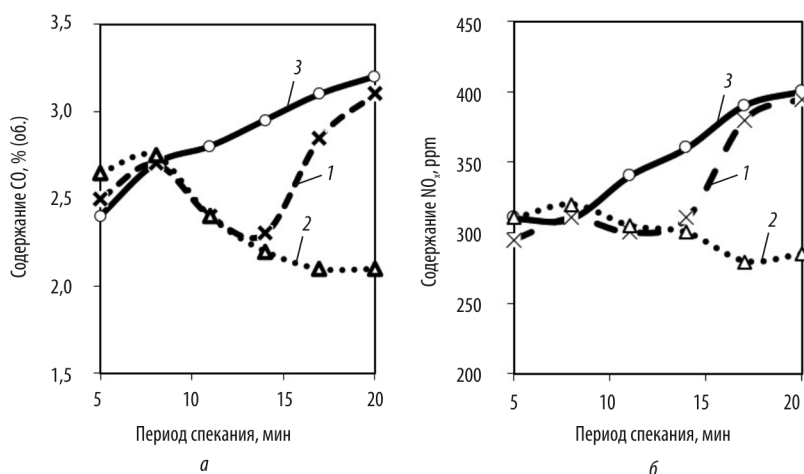


Рис. 2. Динамика содержания CO (а) и NO_x (б) в отходящих газах за период с 5 по 20 мин от начала спекания по базовой и опытной технологии с интенсивностью подачи пара 1,08 нм³/ч при спекании «холодной» (1) и «горячей» (2) шихты по сравнению с базовым вариантом (3)

годного, а также приведет к дополнительным капитальным затратам на установку системы орошения.

Заключение

Результаты лабораторных спеканий «холодной» шихты по традиционной и опытной технологиям с подачей в слой спекаемой шихты водяного пара показали, что инъекция пара в слой агломерационной шихты оказывает разнонаправленное влияние на показатели и результаты спекания. Так, введение водяных паров в зону горения повышает интенсивность и полноту сгорания топлива, способствуя увеличению скорости спекания и улучшению тепловых условий формирования агломерата. Кроме того, активное участие H_2O в окислительно-восстановительных процессах с участием газообразных веществ обеспечивает снижение CO и NO_x в отходящих газах. Дополнительным эффектом от инъекции пара в слой спекаемой шихты и повышения концентрации водяных паров в агломерационном газе является увеличение интенсивности теплопередачи и скорости нагрева аглошихты. При этом повышение расхода пара при спекании «холодной» шихты сопровождается уминкой слоя, что ухудшает газодинамические условия агломерационного процесса, а увеличение концентрации водяных паров в засасываемом воздухе ухудшает тепловые условия охлаждения верхней части спека.

Для достижения максимальной эффективности от инъекции водяного пара при спекании «холодной» шихты рациональным вариантом технологии является его введение с температурой $200\text{ }^\circ\text{C}$ и удельным расходом $3,0\text{ }nm^3/t$ шихты. Для снижения выбросов вредных газов CO и NO_x предпочтительным вариантом является инъекция водяного пара в слой спекаемой шихты с максимальными расходом и продолжительностью.

Таким образом, введение водяного пара в слой спекаемой шихты оказывает комплексное положительное воздействие как на кинетику горения твердого и газообразного топлива, так и на интенсивность теплопередачи от агломерационных газов к шихте и тепловые условия спекания, а также количество выбросов загрязняющих веществ (CO и NO_x) с отходящими газами. Поэтому увлажнение воздуха путем распыления пара над слоем спекаемой шихты является простым и эффективным методом повышения производительности агломерационного процесса, улучшения эффективности использования твердого топлива и снижения его расхода, а также уменьшения вредных выбросов (CO и NO_x).

Учитывая улучшение тепловых условий спекания при подаче пара в слой спекаемой шихты, возможно снижение расхода коксовой мелочи на $0,1\text{--}0,2\%$ (абс.) без ухудшения показателей спекания и качества агломерата, что является дополнительным резервом повышения эффективности агломерационного производства и снижения выбросов вредных газов.

Полное использование потенциальных возможностей технологии агломерационного процесса с подачей пара в спекаемый слой возможно только при спекании предварительно подогретой до температуры более $60\text{ }^\circ\text{C}$ шихты, т. е. в условиях спекания без формирования зоны переувлажнения. Результаты лабораторных спеканий предварительно нагретой до $100\text{ }^\circ\text{C}$ агломерационной шихты с подачей водяного пара

в слой с расходом $1,08\text{ }nm^3/ч$, начиная с 10-й минуты от начала спекания при поддержании температуры пара на уровне $200\text{ }^\circ\text{C}$ показали, что комбинация предварительного нагрева агломерационной шихты с инъекцией в спекаемый слой водяного пара обеспечивает существенное улучшение практически всех показателей спекания, а также снимает ограничение по расходу пара в шихту, обеспечивая дополнительные возможности по снижению выбросов загрязняющих веществ с отходящими газами. □

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2023-0008).

Библиографический список

1. Коротич В. И., Фролов Ю. А., Бездежский Г. Н. Агломерация рудных материалов. Научное издание. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2003. — 400 с.
2. Фролов Ю. А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. — М. : Metallurgizdat, 2016. — 672 с.
3. Лузанов В. П., Кобелев В. А. Введение в технологии металлургического структурирования. — Екатеринбург : УрО РАН, 2005. — 501 с.
4. Niesler M., Stecko J., Blacha L., Oleksiak B. Application of fine-grained coke breeze fractions in the process of iron ore sintering // *Metalurgija*. 2014. Vol. 53. P. 37–39.
5. 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.
6. Юрин Н. И., Юхименко В. И., Искалин В. И., Шкуратов И. А. Лабораторные и практические исследования агломерационного процесса // *Металлург*. 2015. № 6. С. 32–38.
7. Майстренко Н. А., Овчинникова Е. В., Шаповалов А. Н., Берсенев И. С. Повышение эффективности процесса агломерации при окомковании шихты с использованием ПАВ // *Сталь*. 2016. № 1. С. 12–15.
8. Shapovalov A. N., Dema R. R., Nefedyev S. P. et al. Application of new surfactants sintering agglomerate // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017. Vol. 52, Iss. 5. P. 1008–1016.
9. Linhares F. M., Victor C. C. F., Lemos L. R., Bagatini M. C. Effect of three different binders and pellet feed on granulation behaviour of sintering mixtures // *Ironmaking & Steelmaking*. 2020. Vol. 47, Iss. 9. P. 991–997. DOI: 10.1080/03019233.2019.1659001
10. Zhou H., Dahri M. W., Zhou M., Lai Z. Examining the effects of liquid–powder binder concentration on the cohesion and friction of a granular bed // *Particulate Science and Technology*. 2020. Vol. 39, Iss. 7. P. 832–843. DOI: 10.1080/02726351.2020.1836101
11. Феофанов А. В., Одинцов А. А. Повышение эффективности использования твердого топлива при двухслойной агломерации // *Металлург*. 2014. № 6. С. 66–73.
12. Zhou M., Han S., Wang L. et al. Effect of Size distribution of coke breeze on sintering performance // *Steel Research Int.* 2015. Vol. 86, Iss. 11. P. 1242–1251. DOI: 10.1002/srin.201400262
13. Zhong Q., Liu Hb., Xu Lp. et al. An efficient method for iron ore sintering with high-bed layer: double-layer sintering // *J. Iron Steel Res. Int.* 2021. Vol. 28, Iss. 11. P. 1366–1374. DOI: 10.1007/s42243-021-00576-4
14. Шаповалов А. Н., Фукс А. Ю. Исследование агломерационного процесса с накатыванием топлива на гранулы шихты // *Черные металлы*. 2023. № 6. С. 4–9.
15. Матюхин В. И., Ярошенко Ю. Г., Брагин В. В. Технологические возможности производства железорудного агломерата при использовании комбинированного топлива // *Сталь*. 2019. № 11. С. 3–8.
16. 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, Iss. 7. P. 649–655. DOI: 10.1080/03019233.2018.1440160
17. Шаповалов А. Н., Фукс А. Ю. Исследование аглопроцесса с подачей газообразного топлива в слой спекаемой шихты // *Металлург*. 2024. № 1. С. 24–30.
18. Kang H., Choi S., Yang W., Cho B. Influence of oxygen supply in an iron ore sintering process // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51, Iss. 7. P. 1065–1071.
19. 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, Iss. 9. P. 1633–1641.

20. Rajak D. K., Ballal N. B., Viswanathan N. N., Singhai M. Effect of oxygen enrichment on top layer sinter properties // *ISIJ International*. 2021. Vol. 61, Iss. 1. P. 79–85.
21. Wu Y., Fan X., Ji Z. et al. Investigation on the application of by-product steam in iron ore sintering: performance and function mechanism // *Environ. Sci. Pollut Res.* 2022. Vol. 29. P. 62698–62709. DOI: 10.1007/s11356-022-20059-7.
22. Wang Y., Yang T., Wang H. et al. Application of steam injection in iron ore sintering: fuel combustion efficiency and CO emissions // *J. Iron Steel Res. Int.* 2023. Vol. 30. P. 31–39. DOI: 10.1007/s42243-022-00793-5.
23. Sun Cf., Zhou Xg., Li G. et al. Intensive carbon combustion in sintering packed bed via steam spraying: An experimental study on carbon monoxide emission reduction // *J. Cent. South Univ.* 2023. Vol. 30. P. 786–799. DOI: 10.1007/s11771-023-5280-1
24. Pei Y. et al. Research and application of sintering surface steam spraying technology for energy saving and quality improvement // 9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. TMS 2018. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. 2018. P. 785–796. DOI: 10.1007/978-3-319-72138-5_75.
25. Zhang Y. et al. Changes of SO₂, NO_x emission, and production of iron ore sintering with steam injection at the surface of sintering bed // 12th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. 2022. P. 459–467. DOI: 10.1007/978-3-030-92388-4_41
26. Петрышев А. Ю., Берсенева И. С., Боковиков Б. А., Ярошенко Ю. Г. Исследование особенностей формирования оксидов азота при агломерации железных руд // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59, № 4. С. 232–236.

“*Chernye metally*”, 2025, No. 9, pp. 4–11
DOI: 10.17580/chm.2025.09.01

Effect of water vapor injection into the sintered charge layer on the agglomeration process parameters and exhaust gas composition

Information about authors

A. N. Shapovalov, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment, Deputy Director of the Branch for Science and Innovations¹,

R. R. Dema, Dr. Eng., Associate Prof., Dept. of Machines and Technologies for Metal Forming and Mechanical Engineering², Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment¹, Prof., Dept. of Mechanical Engineering³, e-mail: demarr78@mail.ru,

R. N. Amirov, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Machines and Technologies for Metal Forming and Mechanical Engineering², Associate Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment¹, Associate Prof., Dept. of Mechanical Engineering³,

O. R. Latypov, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Machines and Technologies for Metal Forming and Mechanical Engineering², Associate Prof., Dept. of Mechanical Engineering³

¹ Novotroitsk branch of NUST “MISIS”, Novotroitsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³ Kherson State University, Genichesk, Russia

Abstract: The results of laboratory experiments on the study of the effect of steam injection into the sintered charge layer on the sintering process parameters, the quality of the sinter and the composition of the exhaust gases during the sintering of iron ore materials of the Kursk Magnetic Anomaly are presented.

It was found that the introduction of steam at a temperature of 200 °C into the sintered batch layer in the studied flow rate range (1.5–4.5 nm³/t of batch) increases the vertical sintering rate, specific productivity and cold strength of the agglomerate in comparison with the base conditions. With an increase in steam consumption during sintering of the “cold” batch, the sintering and agglomerate quality indices change along a curve with an extremum, reaching their maximum with steam injection in the middle of the sintering process for 5 minutes with a specific flow rate of 3.0 nm³/t of batch. In this case, the content of CO and NO_x in the exhaust gases decreases proportionally to the increase in the flow rate of water vapor into the batch.

The obtained results are due to the influence of steam on the kinetics of fuel combustion, thermal conditions of sintering and the heating rate of the batch. A decrease in the efficiency of steam use with an increase in its consumption during sintering of a “cold” batch is associated with an increase in the humidity of the batch in the over-moistening zone, a decrease in the structural strength of the layer and a deterioration in its gas permeability. Therefore, full use of the potential of steam injection into the sintered batch layer is possible only during sintering of a preheated batch (with a temperature of more than 60 °C). Under these conditions, the formation of an over-moistening zone is prevented, which removes restrictions on the consumption of injected steam.

The results of laboratory sintering of agglomeration batch preheated to 70–80 °C with the supply of water vapor into the layer at a flow rate of 1.08 nm³/hour starting from the 10th minute from the start of sintering while maintaining the steam temperature at 200 °C confirmed the high efficiency of combining agglomeration technology with preheating of the batch and the introduction of water vapor into the layer.

Key words: sintering process, steam injection, kinetics of fuel combustion, thermal conditions of sintering, sintering indicators, sinter quality, CO and NO_x emissions.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZRU-2023-0008).

References

1. Korotich V. I., Frolov Yu. A., Bezdezhsky G. N. Agglomeration of ore materials. Scientific publication. Yekaterinburg: UGTU-UPI, 2003. 400 p.
2. Frolov Yu. A. Agglomeration: technology, heat engineering, management, ecology. Moscow: Metallurgizdat, 2016. 672 p.
3. Puzanov V. P., Kobelev V. A. Introduction to metallurgical structuring technologies. Yekaterinburg: UrO RAN, 2005. 501 p.
4. Niesler M., Stecko J., Blacha L., Oleksiak B. Application of fine-grained coke breeze fractions in the process of iron ore sintering. *Metalurgija*. 2014. Vol. 53. pp. 37–39.

5. Shapovalov A. N., Ovchinnikova E. V., Maistrenko N. A. Improving the preparation of the charge used for sintering at Ural Steel. *Metallurgist*. 2015. Vol. 59. pp. 204–211. DOI: 10.1007/s11015-015-0085-6.

6. Yurin N. I., Yukhimenko V. I., Iskalin V. I., Shkuratov I. A. Laboratory and practical studies of the agglomeration process. *Metallurg*. 2015. No. 6. pp. 32–38.

7. Maistrenko N. A., Ovchinnikova E. V., Shapovalov A. N. et al. Improvement in sintering efficiency by surfactant pelletization of the batch. *Steel Transl.* 2016. Vol. 46, Iss. 1. pp. 45–48. DOI: 10.3103/S0967091216010095

8. Shapovalov A. N., Dema R. R., Nefedyev S. P. et al. Application of new surfactants sintering agglomerate. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017. Vol. 52, Iss. 5. pp. 1008–1016.

9. Linhares F. M., Victor C. C. F., Lemos L. R., Bagatini M. C. Effect of three different binders and pellet feed on granulation behavior of sintering mixtures. *Ironmaking & Steelmaking*. 2020. Vol. 47, Iss. 9. pp. 991–997. DOI: 10.1080/03019233.2019.1659001

10. Zhou H., Dahri M. W., Zhou M., Lai Z. Examining the effects of liquid–powder binder concentration on the cohesion and friction of a granular bed. *Particulate Science and Technology*. 2020. Vol. 39, Iss. 7. pp. 832–843. DOI: 10.1080/02726351.2020.1836101

11. Feoktistov A. V., Odintsov A. A. Making more efficient use of solid fuel in two-layer sintering. *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. pp. 469–477. DOI: 10.1007/s11015-014-9935-x

12. Zhou M., Han S., Wang L. et al. Effect of Size distribution of coke breeze on sintering performance. *Steel Research Int.* 2015. Vol. 86, Iss. 11. pp. 1242–1251. DOI: 10.1002/srin.201400262

13. Zhong Q., Liu Hb., Xu Lp. et al. An efficient method for iron ore sintering with high-bed layer: double-layer sintering. *J. Iron Steel Res. Int.* 2021. Vol. 28, Iss. 11. pp. 1366–1374. DOI: 10.1007/s42243-021-00576-4

14. Shapovalov A. N., Fuchs A. Yu. Effect of coke breeze addition timing on pelletizing and sintering results. *Chernye Metally*. 2023. No. 6. pp. 4–9.

15. Matyukhin V. I., Yaroshenko Yu. G., Bragin V. V. Sintered iron-ore manufacturing capabilities when using combined fuel. *Steel Transl.* 2019. Vol. 49, Iss. 11. pp. 771–777. DOI: 10.3103/S0967091219110111.

16. 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, Iss. 7. pp. 649–655. DOI: 10.1080/03019233.2018.1440160

17. Shapovalov A. N., Fuks A. Y. Sintering process with gaseous fuel injection into the sintered layer. *Metallurgist*. 2024. Vol. 68. pp. 21–30. DOI: 10.1007/s11015-024-01699-1.

18. Kang H., Choi S., Yang W., Cho B. Influence of oxygen supply in an iron ore sintering process. *ISIJ International*. 2011. Vol. 51, Iss. 7. pp. 1065–1071.

19. 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, Iss. 9. pp. 1633–1641.

20. Rajak D. K., Ballal N. B., Viswanathan N. N., Singhai M. Effect of oxygen enrichment on top layer sinter properties. *ISIJ International*. 2021. Vol. 61, Iss. 1. pp. 79–85.

21. Wu Y., Fan X., Ji Z. et al. Investigation on the application of by-product steam in iron ore sintering: performance and function mechanism. *Environ Sci Pollut Res.* 2022. Vol. 29. pp. 62698–62709. DOI: 10.1007/s11356-022-20059-7.

22. Wang Y., Yang T., Wang H. et al. Application of steam injection in iron ore sintering: fuel combustion efficiency and CO emissions. *J. Iron Steel Res. Int.* 2023. Vol. 30. pp. 31–39. DOI: 10.1007/s42243-022-00793-5.

23. Sun Cf., Zhou Xg., Li G. et al. Intensive carbon combustion in sintering packed bed via steam spraying: An experimental study on carbon monoxide emission reduction. *J. Cent. South Univ.* 2023. Vol. 30. pp. 786–799. DOI: 10.1007/s11771-023-5280-1

24. Pei Y. et al. Research and application of sintering surface steam spraying technology for energy saving and quality improvement. 9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. TMS 2018. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. 2018. pp. 785–796. DOI: 10.1007/978-3-319-72138-5_75.

25. Zhang Y. et al. Changes of SO₂, NO_x emission, and production of iron ore sintering with steam injection at the surface of sintering bed. 12th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. 2022. pp. 459–467. DOI: 10.1007/978-3-030-92388-4_41

26. Petryshev A. Yu., Bersenev I. S., Bokovikov B. A., Yaroshenko Yu. G. The research of peculiarities of nitrogen oxides forming at iron ore agglomeration. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016. Vol. 59, Iss. 4. pp. 232–236. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-232-236.