Анализ влияния технологических параметров на обессеривание агломерационных шихт

Бобков В.И., доктор технических наук, доцент,
Быков А.А., кандидат педагогических наук, доцент,
Черновалова М.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Василькова М.А.,
Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00096

Аннотация: *в данной работе представлен анализ влияния на степень десульфурации (удаления серы) при агломерации железорудного сырья технологических параметров, таких как температура, основность и содержание углерода, который в перспективе поможет обнаруживать и рассчитывать наиболее эффективный режим функционирования обжиговых конвейерных и агломерационных машин при термической обработке и переработке минерального железорудного сырья. Обнаружено, что на десульфурацию офлюсованных сульфатсодержащих шихт наиболее существенным является снижение крупности руды и введение плавких добавок, уменьшающих вязкость шлака. Выявлено, что действие первого фактора ограничено возможностями дробильных отделений горно-обогатительных комбинатов и трудностями спекания мелкозернистых шихт, а снижение плавкости агломерационной шихты может привести к ухудшению процессов горения и падению технико-экономических показателей агломерационного процесса. Установлено, что проведение дополнительных мероприятий, позволяющих получать малосернистый агломерат из сульфатсодержащих руд, тормозится отсутствием исследований по кинетике основных реакций, определяющих конечное содержание серы в агломерате. Показано, что диссоциация сульфатов кальция и бария, контактирующих с окислами кремния, железа и алюминия, возможна при температурах 1000-1100°С. Установлено, что диссоциация сульфатов протекает со скоростью, обеспечивающей повышение степени десульфурации. Понижение степени десульфурации наблюдается в диапазоне температур1200-1300°С, вследствие жидкофазного контакта с окислами кремния, железа и алюминия. Обнаружено, что для увеличения степени десульфурации сульфатсодержащих офлюсованных агломерационных шихт необходимы, дальнейшие, исследования кинетики термически активируемых реакций высокотемпературной диссоциации барита и сульфата кальция в условиях, приближенных к агломерационным процессам в действующих агрегатах термической обработки железорудного сырья.*

Ключевые слова: *агломерация, железорудное сырьё, агломерационная шихта, температура, основность, диссоциация сульфатов*

Для цитирования: Бобков В.И., Быков А.А., Черновалова М.В., Василькова М.А. Анализ влияния технологических параметров на обессеривание агломерационных шихт // Chemical Bulletin. 2023. Том 6. № 4. С. 5 – 17.

Поступила в редакцию: 29 августа 2023 г.; Принята в доработанном виде: 3 ноября 2023 г.; Одобрена для публикации: 19 декабря 2023 г.

Analysis of the effect of technological parameters on desulfurization of agglomeration charges

---

Bobkov V.I., Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Associate Professor,
Bykov A.A., Candidate of Pedagogic Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Chernovalova M.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Senior Research Officer,
Vasilkova M.A.,
National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Smolensk

---

Abstract: *this paper presents an analysis of the influence of technological parameters such as temperature, basicity and carbon content on the degree of desulfuration (removal of sulfur) during agglomeration of iron ore raw materials, which in the future will help to detect and calculate the most effective mode of operation of firing conveyor and sintering machines during heat treatment and processing of mineral iron ore raw materials. It was found that the most significant effect on the desulfurization of fluxed sulfate-containing charges is to reduce the size of the ore and the introduction of fusible additives that reduce the viscosity of the slag. It was revealed that the effect of the first factor is limited by the capabilities of crushing departments of mining and processing plants and the difficulties of sintering fine-grained charges, and a decrease in the fusibility of the sintering charge can lead to a deterioration of combustion processes and a drop in the technical and economic indicators of the sintering process. Gorenje It was found that the implementation of additional measures to obtain low-sulfur agglomerate from sulfate-containing ores is hampered by the lack of research on the kinetics of the main reactions that determine the final sulfur content in the agglomerate. It has been shown that dissociation of calcium and barium sulfates in contact with silicon, iron and aluminum oxides is possible at temperatures of 1000-1100°C. It was found that the dissociation of sulfates proceeds at a rate that ensures an increase in the degree of desulfuration. A decrease in the degree of desulfurization is observed in the temperature range of1200-1300°C, due to liquid-phase contact with silicon, iron and aluminum oxides. It was found that further studies of the kinetics of thermally activated reactions of high-temperature dissociation of barite and calcium sulfate under conditions close to agglomeration processes in operating heat treatment units of iron ore raw materials are necessary to increase the degree of desulfuration of sulfate-containing fluxed agglomeration charges.*

Keywords: *agglomeration, iron ore raw materials, agglomeration charge, temperature, basicity, dissociation of sulfates*

For citation: Bobkov V.I., Bykov A.A., Chernovalova M.V., Vasilkova M.A. Analysis of the effect of technological parameters on desulfurization of agglomeration charges. Chemical Bulletin. 2023. 6 (4). P. 5 – 17.

Received: August 29, 2023; Revised: November 3, 2023; Accepted: December 19, 2023.

Введение

В связи с широким вовлечением в металлургический передел мелкодисперсного рудного материала на металлургических и горно-обогатительных предприятиях была осуществлена технология раздельной переработки мало- и высокофосфористого сырья [1, 2]. В последние годы на горно-обогатительных комбинатах осуществляется ряд мероприятий по увеличению выпуска малофосфористого чугуна, в частности: производится реконструкция доменных печей с увеличением объема, внедрен отсев мелочи из агломерата перед скипами доменных печей и др [3, 4].

Вместе с тем технологический процесс производства агломерата на агломерационных машинах в течение ряда лет не претерпевал заметных изменений, несмотря на то, что шихта для агломашин существенно изменилась и усложнилась, а требования доменного процесса выросли [5, 6]. Содержание железа в руде снижалось на 5-6%, а увеличивалось содержание кремнезема и серы. Расход железорудного концентрата на агломерацию сократился в 3 раза с одновременным увеличением доли руд, содержащих значительное количество трудноудаляемой при спекании баритной серы [7, 8]. Увеличение прихода кремнезёма в шихту повысило количество известняка и доломита для ее офлюсования, что, на ряду с увеличением прихода сульфатной серы с шихтой, привело к дополнительному снижению степени обессеривания и увеличению содержания серы в агломерате [9, 10].

Произошло также заметное увеличение крупности дробления рудных смесей [11, 12]. Крупность руды достигла 10-0 мм, в то время как оптимальной для спекания является крупность 5 - 0 мм. Наличие в шихте кусочков крупнее 5-6 мм, приводит как к снижению механической прочности агломерата, так и к увеличению содержания в нем серы [13, 14].

Известным средством повышения качества агломерата является увеличение высоты спекаемого слоя [15, 16]. Однако, не смотря на высокую газопроницаемость шихты, увеличение высоты спекаемого слоя в условиях агломерационного процесса сдерживается ограниченной мощностью тягодутьевых средств зоны охлаждения агломерата, разрежение в вакуум-камерах которой не превышает 150 мм вод.ст.

Поэтому актуальной научно-практической задачей является исследование механизма и кинетики удаления серы и разработка технологических приемов получения агломерата с пониженным ее содержанием [17, 18]. В связи с этим для интенсификации процесса спекания и улучшения качества агломерата выбирались только те пути, которые одновременно могли привести к уменьшению содержания серы в агломерате [19, 20]. В частности, в данной работе предпринята попытка анализа и совершенствования технологии удаления серы при агломерации железорудного сырья.

Цель исследования

Основной целью исследования является анализ влияния технологических параметров: температу-

ры, основности и содержания углерода на степень десульфурации в химико-металлургическом процессе удаления серы при агломерации железорудного сырья, позволяющий формировать технологически эффективный режим функционирования обжиговых конвейерных и агломерационных машин при термической обработке и переработке минерального сырья.

Материал и методы исследования

Роль добавок известняка при десульфурации железосодержащих руд (общая сера 1.22: барит 1.06 мас.%) достаточно полно описана в работе [21]. Руда измельчалась до крупности (0.074 мм) и в смеси с коксом и флюсом помещалась в корундовую лодочку, нагреваемую в печи электросопротивления. Над лодочкой продували воздух, который после выхода из печи анализировали на содержание сернистого газа. По этим данным определялась степень десульфурации. Основные результаты представлены на рис. 1, 2. Из них ясно, что десульфурация медленно идет уже при 1000°С. Однако за время горения слоя шихты (2-3 мин) степень десульфурации даже при 1300 и 1400°С не превышает 80 мас.%, а остаточное содержание серы составит 0.15-0.20 мас.%. При офлюсовании до основности 0.5; 1.0; 1.25; 1.5 начало разложения барита повышается до 1100°С и в интервале 1100-1200°С степень удаления серы заметно ниже, чем для неофлюсованной шихты. При температурах 1200 и 1400°С разницы в степенях десульфурации офлюсованных и неофлюсованных шихт практически нет (рис. 2), а при 1250-1300°С вновь наблюдается пониженная десульфурация шихт основностью 0.5-1.5 ед. Подобный характер зависимости содержания серы в пробе рудного материала от основности вызван двумя причинами.

Во-первых, низкотемпературной диссоциации барита способствует его тесный природный контакт с окислами железа. Добавляемый флюс, как ясно из методики, не брикетировался с рудой и контакт его с окислами железа был плохой. Это обусловило поглощение известняком сернистого газа и замедление десульфурации.

Во-вторых, при температурах 1250-1300°С появляющийся расплав имеет высокую вязкость, что затрудняет выделение газообразных продуктов. Это, в какой-то мере, подтверждается тем, что уменьшение вязкости введением окислов хрома и меди способствует удалению серы.

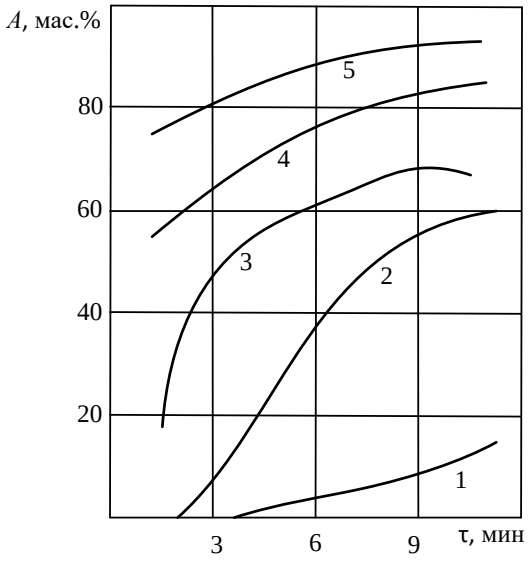

Рис. 1. Зависимость степени десульфурации *A*, мас.% железорудного сырья ри 1000°С (1), 1160°С (2), 1200°С (3), 1300°С (4), 1400°С (5). τ, мин

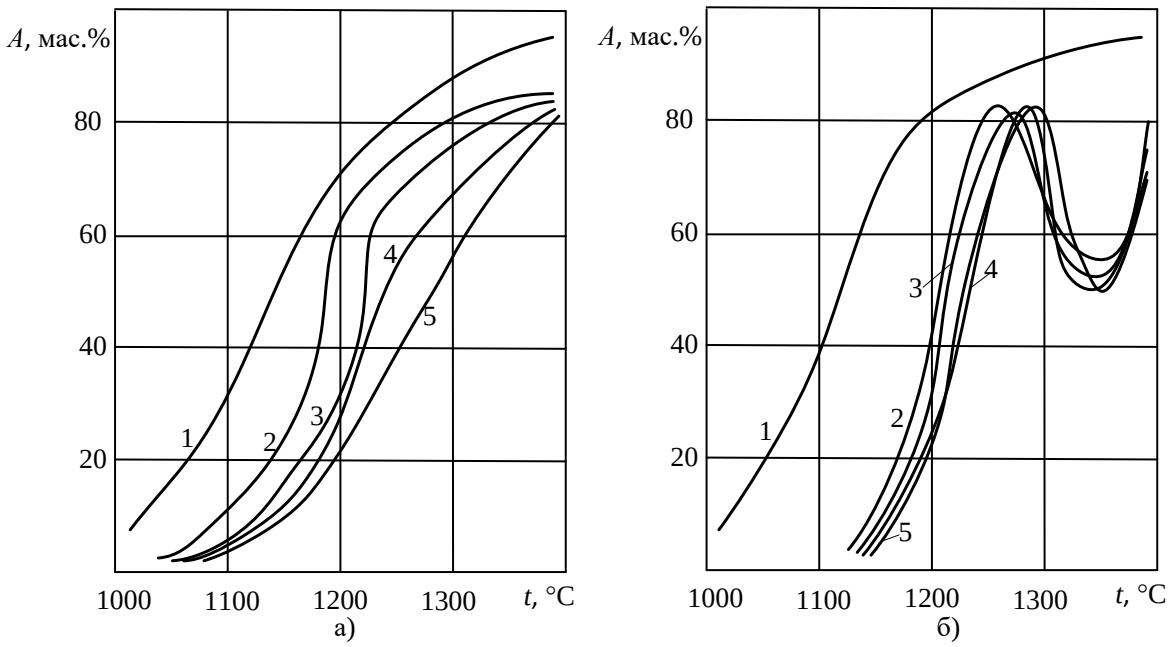

Рис. 2. Зависимость степени десульфурации *A*, мас.% из неофлюсованных (1) и офлюсованных известняком железорудных материалов основностью: 0.5 (2), 1 (3), 1.25 (4), 1.5 (5) при выдержке (а) – 3мин, (б) – 10мин. *t*, °С

Учитывая малый промежуток времени, при котором агломерационная шихта находится в интервале 1000-1200°С, трудно представить себе, что добавки $CaCO_3$ окажут отрицательную роль на десульфурацию за счет торможения процесса диссоциации барита. Тем не менее, в дальнейших экспериментах с железорудным сырьём на экспериментальной установке – агломерационной чаше подтвердилось, что повышение основности с 1.0 до 1.2 резко снижает степень десульфурации. Однако причина здесь связана вероятнее всего с понижением температуры в слое при разложении

известняка. Известно, что при повышении основности с 0.7 до 1.15 температура в зоне спекания снижается при неизменном расходе топлива с 1320°С до 1200°С. Судя по данным, приведенным на рис.2, такое изменение температуры при спекании в течение 3 мин снизит степень десульфурации на 20-25 мас.%.

Близкие результаты были получены для других железорудных материалов (Fe=49,3; S=1,9 мас.%) разной крупности [22].

Возможно, что определенный вклад в замедление десульфурации с ростом основности агломерата вносит, помимо пониженной температуры, также и поглощение сернистого газа влажными слоями нижней части слоя. Следует отметить, что при двухслойном спекании с уменьшенной основностью в нижней части слоя десульфурация уменьшается, табл. 1.

Таблица 1

Влияние основности на разных горизонтах слоя на содержание сульфатной серы в возврате

CaO мас.%		Сера, мас.%
Верх	Низ	
20	20	0.11 – 0.14
28	10	0.07 – 0.08
33	0	0.11 – 0.14

Увеличение содержания серы при отсутствии CaO в нижней части, по мнению авторов, связано с увеличением времени спекания.

Анализ отходящих газов из вакуум-камерах, обнаружил что на первых вакуум-камерах влажная шихта занимает больше половины высоты слоя и массовая доля SO_2 не превышает 0.1 мас.%. Максимальное содержание SO_2, равное 0.25-0.28 мас.%, достигается к восьмой вакуум-камере, где подсушка шихты в основном завершена. Эти результаты убедительно свидетельствуют о поглощении сернистого газа влажными компонентами агломерационной шихты и дают основание полагать, что предварительный подогрев шихты даст некоторый эффект по снижению содержания серы в агломерате. Однако в наибольшей мере влиять на этот показатель возможно, изменяя режим диссоциации сульфатов в высокотемпературной зоне [23]. Одним из основных регулирующих факторов, позволяющих изменять максимальную температуру в слое и состав газовой фазы, является расход твердого топлива.

Анализ и обсуждение результатов

Влияние расхода твёрдого топлива. Экспериментальные и полученные в вычислительных экспериментах данные, по влиянию содержания углерода на десульфурацию аглоруды, содержащей сульфатную серу, хорошо коррелируют между собой. Так при спекании неофлюсованных агломератов из железорудного сырья крупностью 6-0 мм в лабораторных условиях были получены данные, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Влияние содержания углерода на десульфурацию агломерационной руды, содержащей сульфатную серу

Расход топлива, мас.%	3.9	4.8	5.7	6.5
Содержание серы в агломерате, мас.%	0.12	0.095	0.119	0.129
Степень десульфурации, мас.%	79.0	83.4	79.2	77.3

Экстремальный вид зависимости обусловлен тем, что при малом содержании топлива мала температура для интенсивной диссоциации $BaSO_4$, а при большем расходе, по мнению авторов, происходит оплавление шихты, препятствующее выделению газообразных продуктов [24].

Аналогично для офлюсованного железорудного сырья с массовой долей серы 1.22, представленной преимущественно баритом, установлено изменение содержания серы в офлюсованной пробе, выдержанной в течение 3 мин печи, нагретой до 1300°С. Данные представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние содержания кокса на степень десульфурации

Содержание кокса, мас.%	0	2	3.5	5.5	9
Степень десульфурации, мас.%	58	65	72	80	72

Опыты на агломерационной чаше подтвердили экстремальный ход зависимости, однако экстремум отмечен при содержании углерода 4.0-4.5 мас.%. Полученные результаты авторы объясняют тем, что торможение десульфурации при больших расходах топлива связано также с восстановлением $CaSO_4$, $BaSO_4$ и углеродом и растворением сульфитов в расплаве. Это подтверждается результатами анализа сульфатной серы в готовом агломерате и возврате при различном содержании углерода в шихте. На рис. 3 видно, что содержание сульфидной серы в агломерате возрастает в 3 раза при увеличении содержания углерода с 2 до 4.5 мас.%, а сульфатной – падает. В результате общее содержание серы в готовом агломерате меняется незначительно. Представленные результаты показывают, что существенно повлиять на обессеривание сульфатсодержащих руд путем увеличения углерода в шихте нельзя. Поэтому рассмотрим ряд других факторов, способствующих десульфурации.

Влияние добавок сульфидных руд. Результаты сопоставления степени десульфурации при агломерации сульфидных руд с содержанием $S_{общ}$ = 0.9 мас.% и сульфатных руд с содержанием $S_{общ}$ = 1-1.5 мас.% показаны на рис. 4. Обнаружено, что степень десульфурации сульфидной руды намного выше и при оптимальном расходе топлива достигает 95%. В случае сульфидной руды она не превышает 70 мас.%. Присадка в шихте сульфидных руд привела к улучшению обессеривания. Авторы объясняют свои результаты повышением температуры спекания за счет горения сульфидов.

Влияние крупности спекания руды. По данным лабораторных исследований степень обессеривания руды очень сильно зависит от крупности. Причем, чем ниже температура, тем это влияние сильнее, табл. 4.

Таблица 4

Влияние крупности руды на степень её десульфурации (мас.%) в течение 3мин.

Крупность руды, мм	Температура, °С	
	1200°С	1300°С
Менее 1	65	85
От 1 до 3	18	40
Более 3	10	25

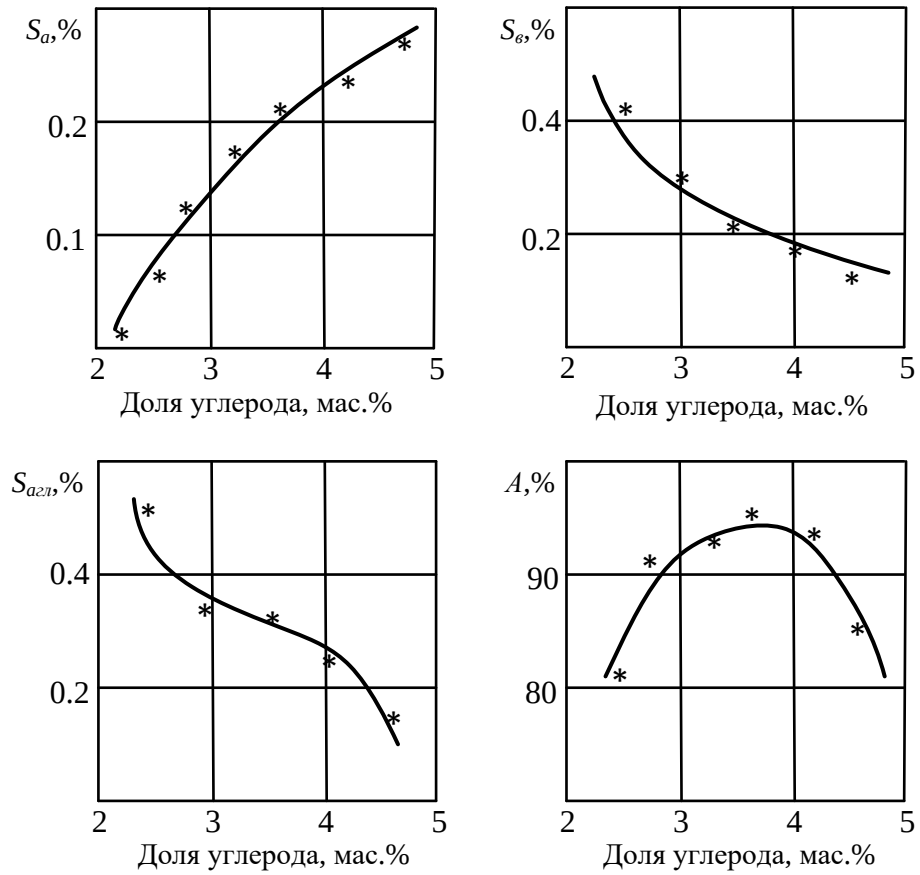

Рис. 3. Влияние массовой доли углерода на массовую долю сульфидной серы $S_а$ в агломерате, сульфатной в возврате $S_в$ и агломерате $S_{агл}$ и степень десульфурации A, мас.%

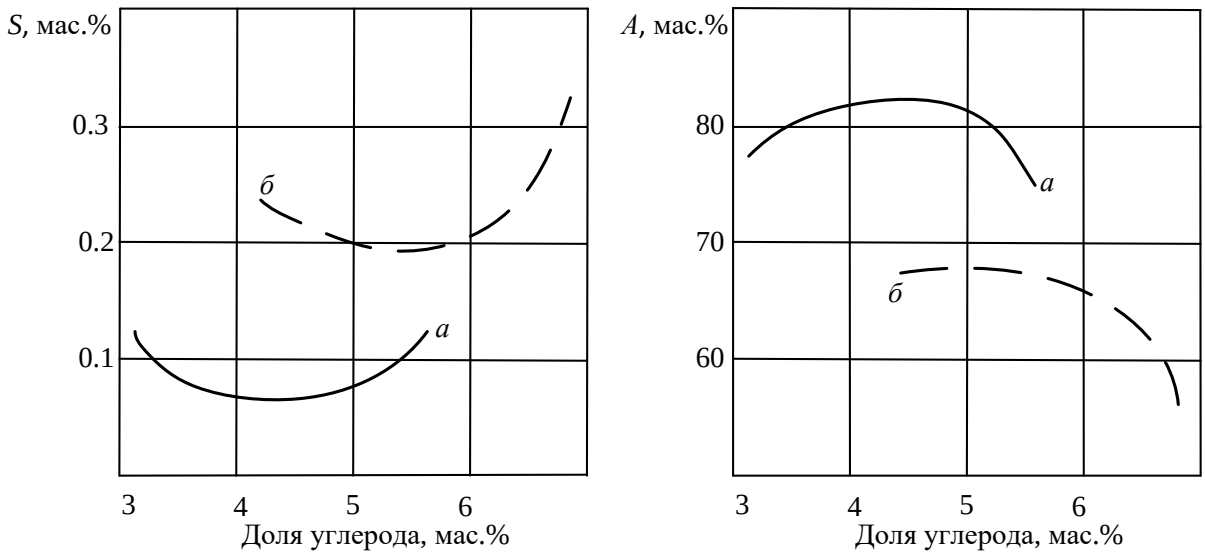

Рис. 4. Влияние массовой доли углерода на массовую долю серы в агломерате *S*, мас.% и степень десульфурации *A*, мас.% при спекании железорудного агломерата при основности 1.15 – *а*, и 0.7 – *б*

Исследовали влияния водяного пара на спекание смесей высокосернистой руды ($S_{общ}$ =6,342 мас.%) и малосернистой руды ($S_{общ}$ =0,399 мас.%) в лабораторных условиях выявили ухудшение процесса десульфурации. Отмечается падение температуры спекания с одновременным увеличением содержания закись железа. Это свидетельствует об интенсификации процессов восстановления в высокотемпературной зоне [25].

По мнению авторов, присутствие водорода замедляет горение вследствие уменьшения концентрации кислорода, а понижение температуры отрицательно сказывается на скорости диссоциации сульфатов. Кроме того, водяной пар способствует более низкотемпературному восстановлению окиси железа до закиси. Последняя, приводит к снижению температуры плавления железо-кальций-силикатных систем и снижает период «сухого» горения топлива.

Заключение

Таким образом, анализ влияния технологических факторов на десульфурацию офлюсованных сульфатсодержащих шихт показывает, что наиболее действенным является снижение крупности руды и введение плавких добавок, снижающих вязкость шлака. Следует, однако, заметить, что действие первого фактора ограничено возможностями дробильных отделений и трудностями спекания мелкозернистых шихт, а снижение плавкости шихты может привести к ухудшению горения и падению технико-экономических показателей процесса. Разработка дополнительных мер, позволяющих получать малосернистый агломерат из сульфатсодержащих руд, тормозится отсутствием исследований по кинетике основных реакций, определяющих конечное содержание серы в агломерате.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Основными реакциями, определяющими конечное содержание серы в офлюсованном агломерате, являются: а) диссоциация $CaSO_4$, $BaSO_4$, находящихся в контакте с окислами кремния, железа и алюминия; б) поглощение сернистого газа соединениями кальция во влажной шихте; в) восстановление сульфатов твердым углеродом и газообразным CO.

2. Показано, что диссоциация сульфатов кальция и бария, контактирующих с окислами кремния, железа и алюминия, возможна при *t*>1000-1100°C. Снижение содержания кислорода в газовой фазе способствует понижению этой температуры.

3. Данные по кинетике реакций, определяющих содержание серы в готовом агломерате, практически отсутствуют. Известно, что диссоциация сульфатов протекает со скоростью, обеспечивающей степень десульфурации 70-80 мас.%, за время 2-3 мин. Понижается только при *t*>1200-1300°C при условии жидкофазного контакта с окислами кремния, железа и алюминия. Контакт улучшается при введении добавок, снижающих вязкость агло-расплава.

4. Для разработки способов глубокой десульфурации сульфатсодержащих офлюсованных шихт необходимы, прежде всего, исследования по кинетике реакций высокотемпературной диссоциации барита и сульфата кальция в условиях, приближенных к агломерационным.

Литература

1. Цирлин А.М., Гагарина Л.Г., Балунов А.И. Синтез теплообменных систем, интегрированных с технологическим процессом // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 3. С. 347 – 358.

2. Li, J., An, H.-F., Liu, W.-X., Yang, A.-M., Chu, M.-S. Effect of basicity on metallurgical properties of magnesium fluxed pellets // Journal of Iron and Steel Research International. 2020. № 27 (3). P. 239 – 247.

3. Meshalkin V.P., Orekhov V.A., Dli M.I., Bobkov V.I., Chistyakova T.B. Method to Calculate the Limiting and Optimal Conditions of the Chemical and Energy Engineering Process of Calcination of Lump and Pelletized Phosphate Ore Raw Materials on the Grate of a Traveling-Grate Roasting Machine // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2023. Vol. 57. № 4. P. 450 – 458.

4. Пучков А.Ю., Лобанева Е.И., Култыгин О.П. Алгоритм прогнозирования параметров системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1. С. 55 – 68.

5. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I., Fedulov A.S. Mathematical simulation of chemical and energotechnological processes and procedures of coke fines burning in agglomerated layer // CIS Iron and Steel Review. 2020. № 19. P. 13 – 17.

6. Dli M.I., Vlasova E.A., Sokolov A.M., Morgunova E.V. Creation of a chemical-technological system digital twin using the Python language // Journal of Applied Informatics. 2021. Vol. 16. № 1 (91). P. 22 – 31.

7. Belyakov N.V., Nikolina N.V. Plant protection technologies: From advanced to innovative // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1942 (1). P. 012072.

8.. Meshalkin V.P, Bobkov V.I., Dli M.I., Garabadzhiu A.V., Panchenko S.V., Orekhov V.A. Experimental Studies of the Physicochemical Process of Heating Ore Phosphorites // Russian Journal of General Chemistry, 2023. Vol. 93. № 3. P. 686 – 693.

9. Пучков А.Ю., Дли М.И., Прокимнов Н.Н., Шутова Д.Ю. Многоуровневые алгоритмы оценки и принятия решений по оптимальному управлению комплексной системой переработки мелкодисперсного рудного сырья // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 6. С. 102 – 121.

10. Zhu X., Ji Y. A digital twin–driven method for online quality control in process industry // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. № 119 (5-6). P. 3045 – 3064.

11. Орехов В.А. Математическое моделирование процессов образования шлама в рудно-термических печах при переработке фосфатного рудного сырья // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 7. С. 78 – 86.

12. Shekhovtsov V.V., Vlasov V.A., Skripnikova N.K., Semenovykh M.A. Structure Formation of Concrete Systems Modified By Nonstandard Particles // Russian Physics Journal 2021. № 63 (9). P. 1590 – 1595.

13. Bobkov V.I., Dli M.I., Sokolov A.M., Rubin Y.B. Analysis of chemical-metallurgical agglomeration processes during charge sintering // CIS Iron and Steel Review. 2020. 20. P. 7 – 11.

14. Ming Yan, Xinnan Song, Jin Tian, Xuebin Lv, Ze Zhang, Xiaoyan Yu and Shuting Zhang. Construction of a New Type of Coal Moisture Control Device Based on the Characteristic of Indirect Drying Process of Coking Coal // Energies 2020. № 13 (16). P. 4162.

15. Tomtas P., Skwiot A., Sobiecka E., Obraniak A, Ławińska K., Olejnik T.P. Bench Tests and CFD Simulations of Liquid–Gas Phase Separation Modeling with Simultaneous Liquid Transport and Mechanical Foam Destruction // Energies. 2021. № 14 (6). P. 1740.

16. Деревянко М.С., Кондратьев А.В. Исследование фазовых превращений и термодинамических свойств оксидных систем // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 3. С. 188 – 189.

17. Nayak D., Ray N., Dash N., (...), Pati S., De P.S. Induration aspects of low-grade ilmenite pellets: Optimization of oxidation parameters and characterization for direct reduction application // Powder Technology. 2021. 380. P. 408 – 420.

18. Li J., An H.-F., Liu W.-X., Yang A.-M., Chu M.-S. Effect of basicity on metallurgical properties of magnesium fluxed pellets // Journal of Iron and Steel Research International. 2020. № 27 (3). P. 239 – 247.

19. Пучков А.Ю., Соколов А.М., Федотов В.В. Нейросетевой метод анализа процессов термической обработки окомкованного фосфатного рудного сырья // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 5. С. 62 – 76.

20. Kossoy A. Effect of thermal inertia-induced distortions of DSC data on the correctness of the kinetics evaluated // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. Т. 143. № 1. С. 599 – 608.

21. Wang S., Guo Y., Zheng F., Chen F., Yang L. Improvement of roasting and metallurgical properties of fluorine-bearing iron concentrate pellets // Powder Technology. 2020. 376, P. 126-135.

22. Tian Y., Qin, G., Zhang Y., Zhao L., Yang T. Experimental research on pellet production with boron-containing concentrate // Characterization of Minerals, Metals, and Materials. 2020. P. 91 – 102.

23. Tian H., Pan J., Zhu D., Wang D., Xue Y. Utilization of Ground Sinter Feed for Oxidized Pellet Production and Its Effect on Pellet Consolidation and Metallurgical Properties // Minerals, Metals and Materials Series. 11th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. 2020. P. 857 – 866.

24. Орехов В.А. Цифровизированное многомасштабное моделирование тепло-технологических рудовосстановительных процессов в электротермической фосфорной печи // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. № 4. С. 31 – 35.

25. Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjayev A.A. Technological parameters of the process of producing metallized iron concentrates from poor raw material // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. № 8 (11). P. 600 – 603.

References

1. Cirlin A.M., Gagarina L.G., Balunov A.I. Sintez teploobmennyh sistem, integrirovannyh s tehnologicheskim processom. Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii. 2021. T. 55. № 3. S. 347 – 358.

2. Li, J., An, H.-F., Liu, W.-X., Yang, A.-M., Chu, M.-S. Effect of basicity on metallurgical properties of magnesium fluxed pellets. Journal of Iron and Steel Research International. 2020. № 27 (3). P. 239 – 247.

3. Meshalkin V.P., Orekhov V.A., Dli M.I., Bobkov V.I., Chistyakova T.B. Method to Calculate the Limiting and Optimal Conditions of the Chemical and Energy Engineering Process of Calcination of Lump and Pelletized Phosphate Ore Raw Materials on the Grate of a Traveling-Grate Roasting Machine. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2023. Vol. 57. № 4. P. 450 – 458.

4. Puchkov A.Ju., Lobaneva E.I., Kultygin O.P. Algoritm prognozirovanija parametrov sistemy pererabotki othodov apatit-nefelinovyh rud. Prikladnaja informatika. 2022. T. 17. № 1. S. 55 – 68.

5. Meshalkin V.P., Bobko, V.I., Dli M.I., Fedulov A.S. Mathematical simulation of chemical and energotechnological processes and procedures of coke fines burning in agglomerated layer. CIS Iron and Steel Review. 2020. № 19. P. 13 – 17.

6. Dli M.I., Vlasova E.A., Sokolov A.M., Morgunova E.V. Creation of a chemical-technological system digital twin using the Python language. Journal of Applied Informatics. 2021. Vol. 16. № 1 (91). P. 22 – 31.

7. Belyakov N.V., Nikolina N.V. Plant protection technologies: From advanced to innovative. Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1942 (1). P. 012072.

8.. Meshalkin V.P, Bobkov V.I., Dli M.I., Garabadzhiu A.V., Panchenko S.V., Orekhov V.A. Experimental Studies of the Physicochemical Process of Heating Ore Phosphorites. Russian Journal of General Chemistry, 2023. Vol. 93. № 3. P. 686 – 693.

9. Puchkov A.Ju., Dli M.I., Prokimnov N.N., Shutova D.Ju. Mnogourovnevye algoritmy ocenki i prinjatija reshenij po optimal'nomu upravleniju kompleksnoj sistemoj pererabotki melkodispersnogo rudnogo syr'ja. Prikladnaja informatika. 2022. T. 17. № 6. S. 102 – 121.

10. Zhu X., Ji Y. A digital twin–driven method for online quality control in process industry. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. № 119 (5-6). P. 3045 – 3064.

11. Orehov V.A. Matematicheskoe modelirovanie processov obrazovanija shlama v rudno-termicheskih pechah pri pererabotke fosfatnogo rudnogo syr'ja. Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2023. № 7. S. 78 – 86.

12. Shekhovtsov V.V., Vlasov V.A., Skripnikova N.K., Semenovykh M.A. Structure Formation of Con-crete Systems Modified By Nonstandard Particles. Russian Physics Journal 2021. № 63 (9). P. 1590 – 1595.

13. Bobkov V.I., Dli M.I., Sokolov A.M., Rubin Y.B. Analysis of chemical-metallurgical agglomeration processes during charge sintering. CIS Iron and Steel Review. 2020. 20. P. 7 – 11.

14. Ming Yan, Xinnan Song, Jin Tian, Xuebin Lv, Ze Zhang, Xiaoyan Yu and Shuting Zhang. Construction of a New Type of Coal Moisture Control Device Based on the Characteristic of Indirect Drying Process of Coking Coal. Energies 2020. № 13 (16). P. 4162.

15. Tomtas P., Skwiot A., Sobiecka E., Obraniak A, Ławińska K., Olejnik T.P. Bench Tests and CFD Simulations of Liquid–Gas Phase Separation Modeling with Simultaneous Liquid Transport and Mechanical Foam Destruction. Energies. 2021. № 14 (6). P. 1740.

16. Derevjanko M.S., Kondrat'ev A.V. Issledovanie fazovyh prevrashhenij i termodinamicheskih svojstv oksidnyh system. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija. 2022. T. 65. № 3. S. 188 – 189.

17. Nayak D., Ray N., Dash N., (...), Pati S., De P.S. Induration aspects of low-grade ilmenite pellets: Optimization of oxidation parameters and characterization for direct reduction application. Powder Technology. 2021. 380. P. 408 – 420.

18. Li J., An H.-F., Liu W.-X., Yang A.-M., Chu M.-S. Effect of basicity on metallurgical properties of magnesium fluxed pellets. Journal of Iron and Steel Research International. 2020. № 27 (3). P. 239 – 247.

19. Puchkov A.Ju., Sokolov A.M., Fedotov V.V. Nejrosetevoj metod analiza processov termicheskoj obrabotki okomkovannogo fosfatnogo rudnogo syr'ja. Prikladnaja informatika. 2022. T. 17. № 5. S. 62 – 76.

20. Kossoy A. Effect of thermal inertia-induced distortions of DSC data on the correctness of the kinetics evaluated. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. T. 143. № 1. S. 599 – 608.

21. Wang S., Guo Y., Zheng F., Chen F., Yang L. Improvement of roasting and metallurgical properties of fluorine-bearing iron concentrate pellets. Powder Technology. 2020. 376, P. 126-135.

22. Tian Y., Qin, G., Zhang Y., Zhao L., Yang T. Experimental research on pellet production with boron-containing concentrate. Characterization of Minerals, Metals, and Materials. 2020. P. 91 – 102.

23. Tian H., Pan J., Zhu D., Wang D., Xue Y. Utilization of Ground Sinter Feed for Oxidized Pellet Production and Its Effect on Pellet Consolidation and Metallurgical Properties. Minerals, Metals and Materials Series. 11th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. 2020. P. 857 – 866.

24. Orehov V.A. Cifrovizirovannoe mnogomasshtabnoe modelirovanie teplo-tehnologicheskih rudovosstanovitel'nyh processov v jelektrotermicheskoj fosfornoj pechi. Jenergobezopasnost' i jenergosberezhenie. 2023. № 4. S. 31 – 35.

25. Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjayev A.A. Technological parameters of the process of producing metallized iron concentrates from poor raw material. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. № 8 (11). P. 600 – 603.