



Оригинальная статья

УДК 622.785.5

DOI 10.17073/0368-0797-2021-3-184-191



СИСТЕМНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ИНТЕНСИВНОСТЬ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

С. Г. Савельев, М. Н. Кондратенко

■ Криворожский национальный университет (Украина, 50027, Днепропетровская обл., Кривой Рог, ул. Виталия Матусевича, 11)

Аннотация. Интенсивность аглопроцесса является одним из важных факторов, определяющих технико-экономическую эффективность агломерационного производства, которое обеспечивает доменный процесс основным видом окучкованного железорудного сырья. Скорость спекания аглошихты в решающей степени зависит от технологических параметров агломерационного процесса, поэтому системное исследование технологических параметров аглопроцесса, определяющих его интенсивность, представляет практический и научный интерес. Показано, что в чистом виде интенсивность аглопроцесса характеризуют вертикальная скорость спекания и интенсивность горения углерода аглошихты. Два других показателя – удельная производительность по годному агломерату и интенсивность тепловыделения в зоне горения – менее представительны для сравнительной оценки интенсивности спекания, поскольку их значения зависят соответственно от прочности спека и теплового эффекта горения углерода, т. е. факторов, которые выходят за рамки сущности понятия интенсивности агломерации. Поскольку содержание мелочи 5 – 0 мм на разных аглофабриках не одинаково, представительное сравнение производительности аглопроцесса возможно лишь с учетом суммарного выхода возврата на аглофабрике и мелочи 5 – 0 мм, образующейся по всему тракту транспортировки агломерата до доменной печи, либо результатов испытания прочности агломерата в барабане. Разработана комплексная системная классификация приемов интенсификации агломерационного процесса, основанная на вещественно-компонентном принципе с использованием четырех уровней разделения – объекты, направления, пути и методы, при котором каждый последующий уровень конкретизирует и развивает предыдущий. Ее достоинством является универсальность, позволяющая применять данную систему для систематизации и разделения практически всех уже известных и будущих приемов интенсификации процесса спекания.

Ключевые слова: аглопроцесс, интенсивность, шихта, система, скорость спекания, горение, показатель, приемы

Для цитирования: Савельев С.Г., Кондратенко М.Н. Системное исследование технологических параметров, определяющих интенсивность агломерационного процесса // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 184–191. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-184-191>

Original article

TECHNOLOGICAL PARAMETERS DETERMINING THE SINTERING PROCESS INTENSITY

S. G. Savel'ev, M. N. Kondratenko

■ Kryvyi Rih National University (11 Vitalii Matusevich Str., Kryvyi Rih, Dnipropetrovsk Region 50027, Ukraine)

Abstract. The sintering intensity is an important factor determining techno-economic efficiency of sinter production which provides the blast-furnace process with the main type of agglomerated iron ore raw materials. The charge sintering rate depends on technological parameters of the sintering process. Therefore, a systematic study of sintering technological parameters, which determine its intensity, is of practical and scientific interest. Indicators of the sintering process intensity are considered that assess it from both the mechanical and heat engineering positions. It is shown that in its purest form the sintering process intensity is characterized by the vertical agglomeration rate and combustion intensity of the sintering charge carbon. Two other indexes – the specific productivity for suitable sinter and intensity of heat output in the combustion zone – are less representative for the comparative estimation of sintering intensity, since their values depend on sintered mass strength and thermal effect of carbon combustion respectively. These factors go beyond the essence of the sintering intensity concept. Since content of fines of 5 – 0 mm at different sinter plants is not equal, representative performance comparison of sintering process is possible only taking into account the total amount of fines generated throughout the agglomerate transport path from sinter machine to blast furnace or the results of testing the agglomerate strength in a drum. A comprehensive systematic classification of techniques has been developed to intensify the sintering process based on the material-component principle using four levels of separation – objects, directions, paths and methods in which each subsequent level concretizes and develops the previous one. Its value is universality, which makes it possible to apply a systematization and separation system for almost all already known and future methods of sintering process intensification.

Keywords: sintering process, intensity, charge, system, sintering speed, combustion, indicator, techniques

For citation: Savel'ev S.G., Kondratenko M.N. Technological parameters determining the sintering process intensity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 184–191. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-184-191>

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития черной металлургии основным сырьем доменного процесса является офлюсованный железорудный агломерат, качество и себестоимость (цена) которого в значительной мере определяют технико-экономическую эффективность производства чугуна. Поэтому вопрос повышения интенсивности агломерационного процесса, т. е. усиления его напряженности, увеличения скорости протекания, представляет практический и научный интерес и является одной из актуальных задач научно-технического прогресса в агломерационном производстве.

Несмотря на наличие большого числа монографий, статей, проведенных научно-технических конференций, посвященных интенсификации агломерационного процесса [1 – 6], показатели интенсивности аглопроцесса, влияние на них различных технологических параметров изучены недостаточно. Такое положение негативно сказывается на развитии агломерационного производства, так как не позволяет приводить надежное сравнение интенсивности хода агломерационных машин, эффективности различных методов интенсификации процесса спекания железорудной шихты, оценивать резервы улучшения технико-экономических показателей работы аглофабрик. Настоящая работа посвящена комплексному системному исследованию показателей интенсивности агломерационного процесса, технологических параметров производства, определяющих интенсивность агломерации железорудных материалов.

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Как правило [7, 8], оценка интенсивности аглопроцесса (интенсивности работы агломерационной машины) проводится с помощью двух показателей:

- удельной производительности агломашины q , т/(м²·ч), измеряемой в тоннах годного агломерата, производимого на 1 м² площади спекания агломашины в «горячий» час, т. е. без учета времени простоев агломашины;

- вертикальной скорости спекания v , мм/мин, измеряемой длиной пути, проходимой зоной горения твердого топлива в единицу времени.

Сравнительно недавно предложены [9] еще два показателя интенсивности аглопроцесса, оценивающие его с топливно-энергетической позиции:

- интенсивность горения твердого топлива шихты I_T (или углерода, если в составе аглошихты имеются другие компоненты, содержащие горючий углерод, I_Y), кг/(м²·с), равная массе твердого топлива (горючего углерода), сгорающего в единицу времени на единице площади спекания;

- интенсивность тепловыделения в зоне горения – зоне формирования агломерата G , Дж/(м²·с), равная ко-

личеству тепла, выделяющегося в зоне горения в единицу времени на единице площади спекания.

Для расчета этих характеристик необходимы данные о массовой доле топлива (горючего углерода) в шихте $C_{ш}$, доли ед. и удельной теплоте сгорания углерода в аглошихте c_y , Дж/кг.

Особенностью агломерационного процесса, которую необходимо учитывать при оценке его интенсивности, является комплексный характер процесса, включающий три последовательных технологических стадии:

- подготовка шихты к спеканию;
- спекание шихты;
- дробление спека и выделение из него возврата.

Приняв следующие обозначения: ρ – насыпная масса шихты, кг/м³; v – вертикальная скорость спекания, м/с; k – выход годного агломерата из шихты, доли ед., запишем обобщающий показатель интенсивности аглопроцесса, называемый удельной производительностью агломашины q_r :

$$q_r = \rho v k. \quad (1)$$

С учетом важности показателя вертикальной скорости спекания агломерационной шихты, существенный практический и теоретический интерес представляет задача ее расчетного определения. Вертикальную скорость спекания предложено [10] рассчитывать по формуле

$$v = \frac{w_0}{V_r \rho}, \quad (2)$$

где v – вертикальная скорость спекания, м/с; w_0 – скорость фильтрации газа в слое, м/с; V_r – удельный выход агломерационного газа, м³/кг сухой шихты; ρ – насыпная масса агломерационной шихты, кг/м³.

В то же время известно [10], что вертикальная скорость спекания прямо пропорциональна газопроницаемости спекаемого слоя R , м³/(м²·мин.), теплоемкости просасываемого газа c_r и обратно пропорциональна кажущейся теплоемкости шихты $c_{каж.ш}$:

$$v = k' \frac{c_r}{c_{каж.ш}} R, \quad (3)$$

где k' – коэффициент пропорциональности.

Сравнение формул (2) и (3) показывает их одинаковый физический смысл, поскольку удельный выход агломерационного газа V_r есть не что иное, как отношение кажущейся теплоемкости шихты $c_{каж.ш}$ к теплоемкости просасываемого газа c_r [8].

Проблема расчетного определения вертикальной скорости спекания заключается не столько в сложности точного учета всех факторов, влияющих на величину кажущейся теплоемкости шихты, и неоднозначности методик ее определения, сколько в необходимости знания величины скорости фильтрации газа в слое для кон-

кретных условий агломерации, что требует проведения опытного спекания. Однако в ходе опытного спекания появляется возможность экспериментального определения вертикальной скорости спекания по формуле

$$v = \frac{H}{\tau}, \quad (4)$$

где H – высота спекаемого слоя шихты, м; τ – время спекания.

При этом задача расчетного определения вертикальной скорости спекания теряет актуальность.

В этой связи на основе формулы (2) разработана математическая модель процесса перемещения зоны горения спекаемого слоя аглошихты [11], позволяющая рассчитывать вертикальную скорость спекания без получения предварительной информации о скорости фильтрации газа в слое. Модель представлена в виде расширяющейся сети отдельных взаимосвязанных зависимостей, выделенных в самостоятельные подмодели.

Расчет интенсивности горения углерода может быть выполнен по формуле [12]

$$I_y = \frac{w_o C_{ш}}{V_r}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (5)$$

На основе формулы (4) устанавливается связь между различными показателями интенсивности аглопроцесса (см. таблицу).

Недостатком показателей интенсивности агломерации, расчет которых производится с использованием коэффициента выхода годного агломерата из шихты k , является нечеткость термина «годный агломерат». Массовая доля мелочи класса 5 – 0 мм в годном агломерате (товарном или готовом продукте) на разных аглофабриках колеблется в пределах 8,1 – 20,4 % [13], что обусловлено различиями в шихтовых и технологических условиях спекания, а также в технологии обработки спека. Это существенно влияет на величину коэффициента выхода годного агломерата из шихты и, следовательно, на значения показателей интенсивности.

Количественная оценка производительности агломерационного процесса при изменении прочностных характеристик (массовой доли мелочи) годного агломерата показала [14], что представительная оценка удельной производительности аглопроцесса в промышленных условиях возможна лишь с учетом суммарного выхода возврата, образующегося по всему тракту транспортировки агломерата до доменной печи, либо по результатам испытания прочности агломерата в барабане.

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПА КЛАССИФИКАЦИИ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ

ИНТЕНСИВНОСТЬ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

В соответствии с общими принципами интенсификации химико-технологических процессов, предложенными В.Е. Лотошем [15], классифицировать приемы интенсификации необходимо на основе разделения факторов, эффективно влияющих на скорость процесса и выход продуктов взаимодействия, на кинетические и термодинамические. Анализ этих принципов, которые можно назвать кинетико-термодинамическими, показывает, что в силу своей направленности на процессы, обусловленные протеканием химических реакций, они не вполне приемлемы для классификации приемов интенсификации процесса агломерации, поскольку в ходе последнего, наряду с химическими процессами, происходят также сложные физические и физико-химические превращения. Кроме того, в аглопроцессе, как правило, не ставится задача достижения максимального выхода продуктов химического взаимодействия реагирующих веществ.

Научное обобщение и систематизация общих закономерностей технологии агломерации позволили выработать, как наиболее приемлемый из ряда возможных, вещественно-компонентный принцип классификации приемов интенсификации аглопроцесса. Этот принцип основан на разделении приемов интенсификации в соответствии с веществами или компонентами системы, участвующими в процессе агломерации, на которые оказывается воздействие, приводящее к изменению их

Соотношения между показателями интенсивности аглопроцесса

Relationship between indicators of sintering process intensity

| Показатели интенсивности | v , м/с | q_r , кг/(м ² ·с) | I_y , кг/(м ² ·с) | G , Дж/(м ² ·с) |
|--|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Вертикальная скорость спекания v , м/с | $\frac{H}{\tau}$ | $\frac{q_r k}{\rho}$ | $\frac{I_y C_{ш}}{\rho}$ | $\frac{G}{\rho} C_{ш} c_y$ |
| Удельная производительность по годному агломерату q_r , кг/(м ² ·с) | $\rho v k$ | $H \rho \frac{k}{\tau}$ | $I_y \frac{k}{C_{ш}}$ | $G \frac{k}{C_{ш}} c_y$ |
| Интенсивность горения углерода аглошихты I_y , кг/(м ² ·с) | $\rho v C_{ш}$ | $C_{ш} \frac{q_r}{k}$ | $H \rho \frac{C_{ш}}{\tau}$ | $\frac{G}{c_y}$ |
| Интенсивность тепловыделения в зоне горения топлива G , Дж/(м ² ·с) | $\rho v C_{ш} c_y$ | $q_r C_{ш} \frac{c_y}{k}$ | $I_y c_y$ | $H \rho C_{ш} \frac{c_y}{\tau}$ |

состава и свойств. Согласно этому принципу приемы интенсификации можно разделять на группы, изменяющиеся:

- твердожидкостную составляющую взаимодействующей системы (подготовленную к спеканию аглошихту);

- газоздушную часть системы, подаваемую в спекаемую шихту.

При этом приемы, направленные на изменение твердожидкостной составляющей системы, в свою очередь разделяются, в зависимости от направления и результата воздействия, на твердокомпонентные, жидкостные, шихтовые, грануляционные.

Приемы, направленные на изменение состава, свойств, других характеристик газа, который подают в слой, в зависимости от результата разделяются на изменяющиеся:

- состав газа;

- температуру газа;

- скорость прохождения газа через слой обрабатываемого материала;

- режим подачи газа в слой обрабатываемого материала;

- место и направление подачи газа в слой материала.

Очевидно, что в рамках предложенного принципа классификации можно выделить группы комбинированных приемов, сочетающих, например, одновременное изменение структуры спекаемой шихты и параметров газа, подаваемого в аглошихту. Так, способ агломерации [16] двухслойной шихты с различной весовой концентрацией твердого топлива в верхнем (C_B) и нижнем (C_H) слоях и определенным изменением соотношения C_B/C_H в зависимости от удельного расхода тепла на зажигание и дополнительный нагрев слоя, т. е. в зависимости от параметров газа, подаваемого в слой, позволяет увеличить удельную производительность на 3–5 %.

Исследование совместного влияния интенсифицирующих факторов на показатели спекания агломерата показало [17], что в агломерационном процессе проявляются принципы затухания (максимальный эффект от применения каждого мероприятия по совершенствованию технологического процесса достигается при условиях, противоположных тем, к которым ведет данное мероприятие) и сочетания (наиболее эффективны сочетания таких мероприятий, которые действуют на основные процессы в противоположных направлениях), применяемые для анализа явлений доменной плавки [18].

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ КЛАССИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИЕМОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

При рассмотрении технологических приемов повышения производительности агломерационных машин

В.И. Коротич [19] приводит и анализирует важнейшие факторы, интенсифицирующие аглопроцесс, однако целостной классификации приемов не предлагает.

Некоторое приближение к классификации технологических приемов интенсификации агломерационного процесса проявляется в схеме структурированных мероприятий для оптимизации целевой функции «удельная производительность» агломашины [20]. Показано, что производительность агломашины напрямую зависит от скорости горения углерода топлива в слое шихты, зависящей от ее газопроницаемости. При этом улучшение степени окомкования может быть реализовано путем предварительной подпрессовки шихты [21]. Увеличить скорость передвижения фронта горения целесообразно [20] за счет увеличения газопроницаемости шихты, использования высокорекреационного топлива и увлажнения воздуха над спекаемым слоем путем распыления воды [22]. Очевидно, что предложенная схема мероприятий не может считаться комплексной системной классификацией приемов интенсификации агломерационного процесса.

Для решения этой задачи предлагается применить основанную на вещественно-компонентном принципе четырехуровневую систему классификации – объекты, направления, пути и методы, каждый последующий уровень которой конкретизирует и развивает предыдущий (рис. 1, 2).

В соответствии с предложенной системой рекомендуются следующие определения (характеристики) уровней классификации:

- объекты – исходные материалы (вещества) процесса спекания, на которых направлены воздействия, приводящие к интенсификации процесса. Элементами первого уровня (объектами воздействия) могут быть твердые компоненты шихты, жидкость, увлажняющая твердые компоненты шихты (вода), шихта и газ (теплоноситель и окислитель), подаваемый в слой аглошихты;

- направления – совокупность технологических приемов совершенствования процесса спекания, объединенных наиболее общим целевым подходом к воздействию на определенный объект, участвующий в процессе спекания. Так, целями воздействия на шихту могут быть снижение ее кажущейся теплоемкости, уменьшение насыпной массы, улучшение газопроницаемости, совершенствование параметров и структуры отдельных гранул, совершенствование структуры спекаемого слоя. Целями воздействия на газ, подаваемый в шихту, могут быть увеличение его расхода (перепада давления при прохождении через слой), повышение окислительной способности, совершенствование режима подачи в слой и др.;

- пути – совокупность технологических приемов, имеющих одинаковые особенности движения в определенном направлении интенсификации. Так, направление улучшения газопроницаемости шихты может быть реализовано путем оптимизации крупности компонен-

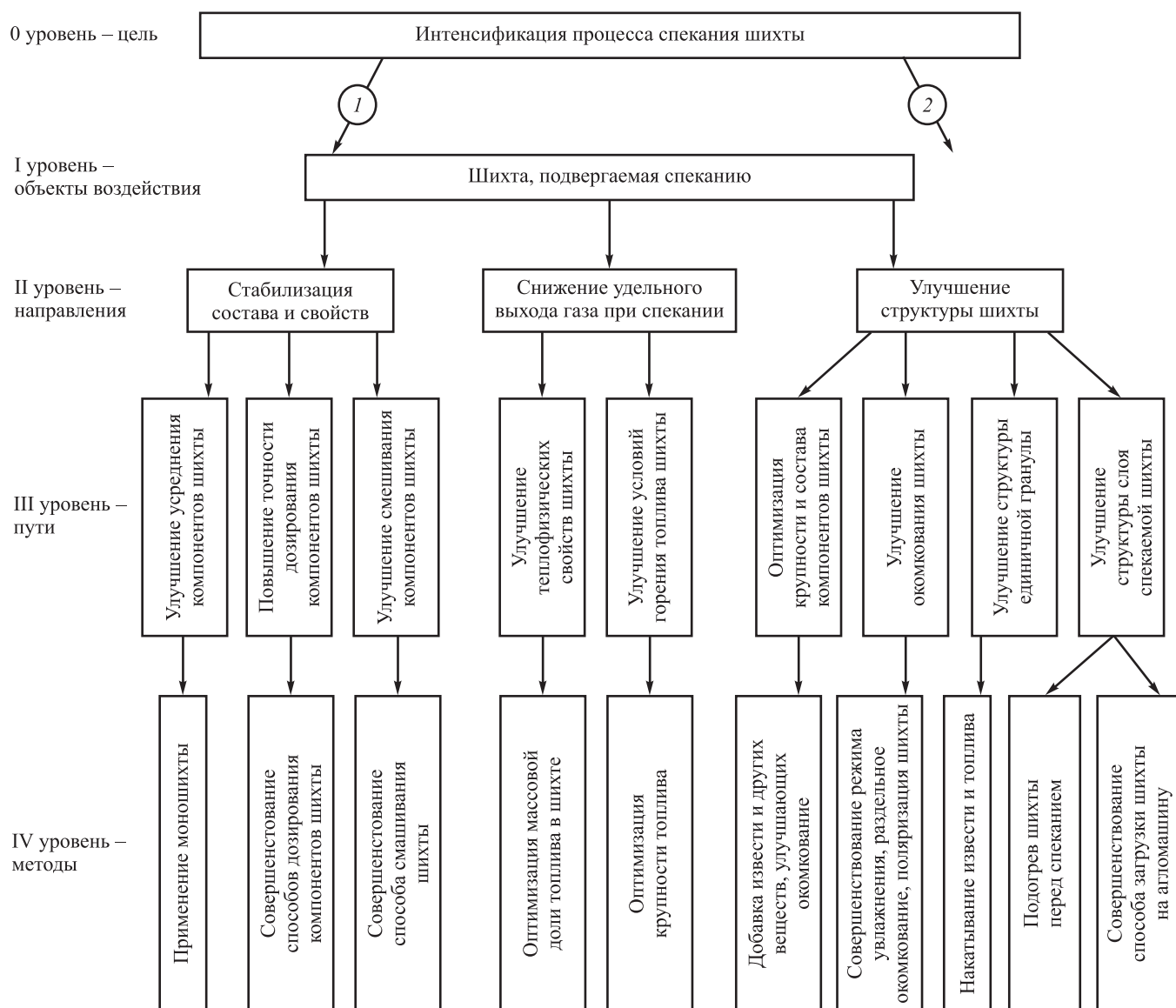


Рис. 1. Твердожидкостная часть комплексной системной классификации приемов интенсификации агломерационного процесса

Fig. 1. Solid-liquid part of the complex system classification of sintering process intensification techniques

тов шихты, применения добавок, улучшающих окомкование, стабилизацией качества компонентов шихты и ее состава, совершенствованием способа и режима окомкования;

– методы (способы) – необходимая и достаточная совокупность технологических приемов и параметров реализации определенного пути совершенствования процесса, обеспечивающих достижение поставленной цели – интенсификации спекания. Так, совершенствование способа и режима окомкования может быть реализовано изменением параметров режима увлажнения, раздельным окомкованием компонентов шихты и др.

Таким образом, каждый из первых трех уровней может иметь два или более узлов (блоков), в которых, в свою очередь, могут сходиться несколько технологических приемов последующего (более детального) уровня классификации.

Достоинством разработанной классификации является ее универсальность, позволяющая применять данную систему для систематизации и разделения практически всех уже известных и будущих приемов интенсификации процесса спекания.

Выводы

Среди известных показателей интенсивности аглопроцесса наиболее представительными являются вертикальная скорость спекания и интенсивность горения углерода аглошихты, которые характеризуют напряженность процесса в чистом виде, т. е. без привязки к технологическим параметрам процесса. Другие показатели интенсивности аглопроцесса – удельная производительность по годному агломерату и интенсивность тепловыделения в зоне горения менее представительны

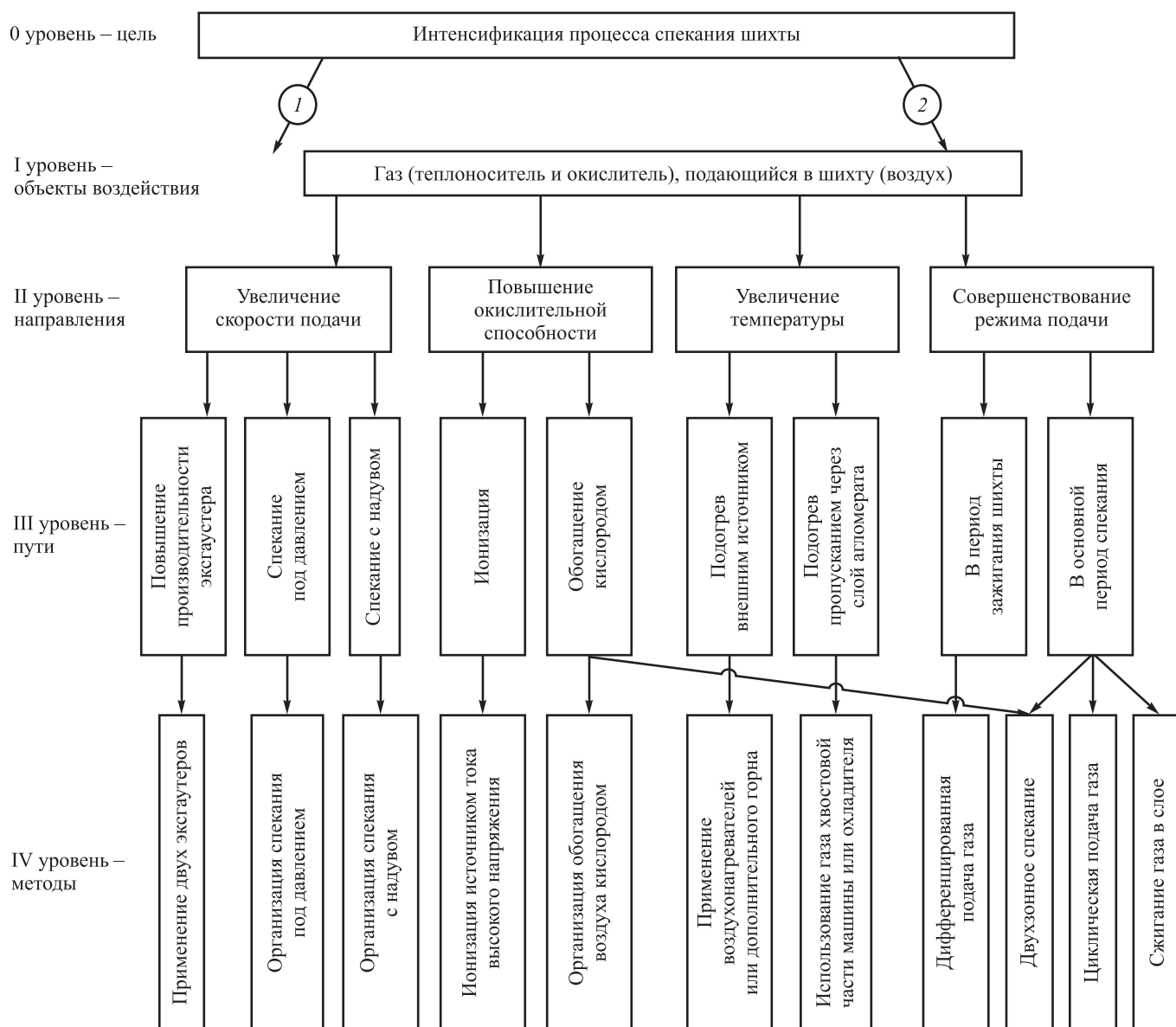


Рис. 2. Газовоздушная часть комплексной системной классификации приемов интенсификации агломерационного процесса

Fig. 2. Gas-air part of the complex system classification of sintering process intensification techniques

для сравнительной оценки интенсивности спекания. Это связано с тем, что их значения зависят соответственно от выхода годного агломерата из шихты (т. е. выхода спека из шихты и технологии его обработки) и теплового эффекта горения углерода, а это факторы, которые выходят за рамки сущности понятия интенсивности агломерации и отличаются в разных условиях спекания.

Использование при расчете показателей интенсивности спекания значения коэффициента выхода годного агломерата из шихты затрудняет их сравнительную оценку, что связано с нечеткостью термина «годный агломерат», массовая доля мелочи в котором существ-

венно различается на различных аглофабриках. Представительное сравнение производительности аглопроцесса возможно лишь с учетом суммарного выхода возврата, образующегося по всему тракту транспортировки агломерата до доменной печи, либо результатов испытания прочности агломерата в барабане.

Комплексную системную классификацию технологических приемов интенсификации агломерационного процесса целесообразно осуществлять на основе вещественно-компонентного принципа с использованием четырех уровней разделения – объекты, направления, пути и методы, при котором каждый последующий уровень конкретизирует и развивает предыдущий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Вегман Е.Ф., Пыриков А.Н., Жак А.Р. Интенсификация агломерационного процесса. М.: Машиностроение, 1995. 126 с.
2. Шурхал В.А. Интенсификация процессов окускования железорудных материалов // Черная металлургия. 1985. № 13. С. 7–27.
3. Интенсификация процессов окускования рудных материалов: Сборник научных трудов / Под ред. В.А. Шурхала. Киев: Наукова думка, 1987. 176 с.
4. Кривенко С.В., Томаш А.А., Русских В.П. Интенсификация процесса агломерации за счет увеличения скорости горения топлива в слое // Металл и литье Украины. 2009. № 7–8. С. 63–68.
5. Плотников В.В., Сайдгареев Л.Н. Інтенсифікація агломераційного процесу за рахунок вдосконалення технології комбінованого огрудкування і завантаження шихти // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2012. Вип. 25. С. 41–46.
6. Besta P., Wicher P. The optimization of the production of sinter as the feedstock of the blast furnace process // Metalurgija. 2017. Vol. 56. No. 1–2. P. 131–134.
7. VDOKUMENTS. Sintering plant at a glance. 72 p. Available at URL: <https://vdocuments.mx/sintering-plant-at-a-glance.html>
8. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. Научное издание. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. 400 с.
9. Савельев С.Г., Шаповалов В.А. Показатели интенсивности агломерационного процесса // Вісник Криворізького технічного ун-ту: Зб. наукових праць. 2008. Вип. 21. С. 78–82.
10. Сырье для черной металлургии: Справочное издание: В 2-х т. Т. 1. Сырьевая база и производство окускованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / Под ред. В.М. Чижиковой. М.: Машиностроение-1, 2001. 896 с.
11. Савельев С.Г., Великохатко Я.А. Математическое моделирование процесса перемещения зоны горения при спекании аглошихты // Вісник Криворізького техн. ун-ту: Зб. наук. праць. 2014. Вип. 37. С. 108–113.
12. Савельев С.Г. Развитие представлений о тепловых показателях агломерационного процесса // Металургія. Наукові праці Запорізької держ. інжен. акад. 2017. Вип. 2 (38). С. 81–84.
13. Журавлев Ф.М., Лялюк В.П., Кассим Д.А. и др. Окускованный, полностью офлюсованный железорудный материал для доменной плавки с лучшими характеристиками агломерата и окатышей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 1. С. 31–38.
14. Семакова В.Б., Пилугин Е.И. Исследование показателей производительности агломерационного процесса // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2015. № 1. (30). С. 41–50.
15. Лотош В.Е. Фундаментальные основы природопользования: В 4-х кн. Книга 1. Технологии основных производств в природопользовании. 4-е изд. доп. Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2007. 561 с.
16. А.с. 1790616 СССР, МКИ5 С 22 В 1/16. Способ агломерации / Б.М. Боранбаев, Н.С. Минаков, Ю.С. Юсфин и др.; заявл. 04.05.90; опубл. 23.01.93, Бюл. № 3.
17. Безверхий И.В., Томаш А.А. Исследование влияния интенсифицирующих факторов на показатели процесса агломерации // Наукові праці ДонНТУ, Металургія. Вип. 11 (159). 2009. С. 3–12.
18. Товаровский И.Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сборник научных трудов. 2014. Вип. 28. С. 117–131.
19. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. М.: Металлургия, 1978. 208 с.
20. Совершенствование технологии и оборудования производства железорудного сырья для современной доменной плавки /
1. Vegman E.F., Pyrikov A.N., Zhak A.R. *Intensification of Sintering Process*. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 126 p. (In Russ.).
2. Shurkhal B.A. Intensification of iron ore materials agglomeration. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 1985, no. 13, pp. 7–27. (In Russ.).
3. *Intensification of Ore Materials Agglomeration: Proceedings*. Shurkhal B.A. ed. Kiev: Naukova dumka, 1987, 176 p. (In Russ.).
4. Krivenko S.V., Tomash A.A., Russkikh V.P. Sintering process intensification by increasing the fuel burning rate in a layer. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2009, no. 7-8, pp. 63–68. (In Russ.).
5. Plotnikov V.V., Saitgareev L.N. Sintering process intensification by improving the technology of combined pelletizing and charge loading. *Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki*. 2012, issue 25, pp. 41–46. (In Ukr.).
6. Besta P., Wicher P. The optimization of the production of sinter as the feedstock of the blast furnace process. *Metalurgija*. 2017, vol. 56, no. 1-2, pp. 131–134.
7. VDOKUMENTS. *Sintering plant at a glance*. 72 p. Available at URL: <https://vdocuments.mx/sintering-plant-at-a-glance.html>
8. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhskii G.N. *Sintering of Ore Materials*. Yekaterinburg: USTU-UPI, 2003, 400 p. (In Russ.).
9. Savel'ev S.G., Shapovalov V.A. Intensity parameters of sintering process. *Visnik Krivoriz'kogo tekhnichnogo un-tu: zb. naukovikh prats'*. 2008, issue 21, pp. 78–82. (In Russ.).
10. *Raw Materials for Ferrous Metallurgy: Reference edition. In 2 vols. Vol. 1: Raw Material Base and Production of Agglomerated Raw Materials (raw materials, technologies, equipment)*. Chizhikova V.M. ed. Moscow: Mashinostroenie-1, 2001, 896 p. (In Russ.).
11. Savel'ev S.G., Velikokhat'ko Ya.A. Mathematical modeling of combustion zone movement during sintering charge agglomeration. *Visnik Krivoriz'kogo tekhn. un-tu: zb. nauk. prats'*. 2014, issue 37, pp. 108–113. (In Russ.).
12. Savel'ev S.G. Development of ideas on thermal parameters of sintering process. *Metalurgiya. Naukovi pratsi Zaporiz'koi derzhavnoi inzhenernoi akademii*. 2017, no. 2 (38), pp. 81–84. (In Russ.).
13. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Kassim D.A. etc. Agglomerated, fully offluxed iron ore material for blast furnace smelting with the best characteristics of sinter and pellets. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2015, no 1, pp. 31–38. (In Russ.).
14. Semakova V.B., Pilyugin E.I. Research of sintering process productivity indicators. *Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki*. 2015, no. 1(30), pp. 41–50. (In Russ.).
15. Lotosh V.E. *Fundamental Principles of Nature Management. In 4 books. Book 1: Technologies of Main Production in Nature Management*. Yekaterinburg: Ural Univ. of Railway Transport, 2007, 561 p. (In Russ.).
16. Boranbaev B.M., Minakov N.S., Yusfin Yu.S. etc. *Method of sintering*. Certificate of authorship USSR no. 1790616, MPK5 C22B 1/16. *Bulleten' izobretenii*. 1993, no. 3. (In Russ.).
17. Bezverkhii I.V., Tomash A.A. Influence of intensifying factors on sintering process indicators. *Naukovi pratsi DonNTU, Metalurgiya*. 2009, no. 11 (159), pp. 3–12. (In Russ.).
18. Tovarovskii I.G. Normative assessment of impact of blast furnace smelting parameters on coke consumption and productivity. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy: Proceedings*. 2014, no. 28, pp. 117–131. (In Russ.).
19. Korotich V.I. *Fundamentals of Theory and Technology of Raw Materials Preparation for Blast Furnace Melting*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 208 p. (In Russ.).
20. Lyalyuk V.P., Stupnik N.I., Zhuravlev F.M. etc. *Improving the Technology and Equipment for Iron Ore Raw Materials Production for*

В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, Ф.М. Журавлев и др. Кривой Рог: Дионат, 2017. 368 с.

21. Засельский В.И., Пополов Д.В. Повышение качества агломерата и производительности агломашины путем подпрессовки шихты // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2010. № 5. С. 34–36.
22. Datta S.S., Das B.K., Balaji S.A., Das A. Process improvement in sintering by bed humidification // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2006. Vol. 1. P. 207–213.

Modern Blast Furnace Smelting. Kryvyi Rih: Dionat, 2017, 368 p. (In Russ.).

21. Zasel'skii V.I., Popolov D.V. Improving the quality of sinter and productivity of the sintering machine by charge pressing. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2010, no 5, pp. 34–36. (In Russ.).
22. Datta S.S., Das B.K., Balaji S.A., Das A. Process improvement in sintering by bed humidification. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2006, vol. 1, pp. 207–213.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Геннадиевич Савельев, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и литейного производства, Криворожский национальный университет

E-mail: comher@bk.ru

Марина Николаевна Кондратенко, старший преподаватель кафедры металлургии черных металлов и литейного производства, Криворожский национальный университет

Sergei G. Savel'ev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metals and Foundry, Kryvyi Rih National University

E-mail: comher@bk.ru

Marina N. Kondratenko, Senior Lecturer of the Chair of Ferrous Metals and Foundry, Kryvyi Rih National University

Поступила в редакцию 02.07.2020
После доработки 27.09.2020
Принята к публикации 01.03.2021

Received 02.07.2020
Revised 27.09.2020
Accepted 01.03.2021