

УДК 669.162.1.001.57

### ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОКУСКОВАННОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

**Я. А. Великохатко**

Криворожский национальный университет

ул. XXII Партсъезда 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: yanochkast1989@rambler.ru

**В. В. Лунёв**

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: mitlv@ukr.net

Показана важность использования математического моделирования при производстве окускованного железорудного сырья. Рассмотрены и систематизированы известные теоретические разработки математических описаний процессов производства агломерата и окатышей. Выполнен сравнительный анализ существующих методов математического моделирования процессов производства окускованного железорудного сырья. Исследована возможность применения моделей процессов производства окускованного железорудного сырья по различным технологическим схемам, а так же схемам цепи аппаратов. Доказана целесообразность интеграции математического моделирования в схему автоматизации производственных участков. Проанализирована и оценена возможность использования существующих математических моделей для решения задач, связанных с операциями процессов производства агломерата и окатышей. Исследована эффективность использования существующих математических моделей для интенсификации производственных процессов и проведения оптимизирующих мероприятий.

**Ключевые слова:** математическая модель, агломерация, окатыши, производство, автоматизация.

### ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОКУСКОВАНОЇ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

**Я. О. Великохатко**

Криворізький національний університет

вул. XXII Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: yanochkast1989@rambler.ru

**В. В. Луньов**

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: mitlv@ukr.net

Показана важливість використання математичного моделювання при виробництві окускованої залізорудної сировини. Розглянуто та систематизовано відомі теоретичні розробки математичних описів процесів виробництва агломерату та обкотишів. Виконано порівняльний аналіз існуючих методів математичного моделювання процесів виробництва окускованої залізорудної сировини. Досліджено можливість застосування моделей процесів виробництва окускованої залізорудної сировини за різними технологічними схемами та схемами ланцюга апаратів. Доведено доцільність інтеграції математичного моделювання в схему автоматизації виробничих ділянок. Проаналізовано та оцінено можливість використання існуючих математичних моделей для вирішення завдань, пов'язаних з операціями процесів виробництва агломерату та обкотишів. Досліджена ефективність використання існуючих математичних моделей для інтенсифікації виробничих процесів і проведення оптимізуючих заходів.

**Ключові слова:** математична модель, агломерація, обкотиші, виробництво, автоматизація.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Возможности передовых информационных технологий и современного программного обеспечения позволяют осуществлять оперативный анализ, технологическое руководство и комплексную автоматизацию производственных процессов. Необходимым условием для создания алгоритма управления процессами производства агломерата и окатышей является наличие логико-математической модели данных процессов. Модель должна наиболее полно соответствовать анализируемому процессу, тем или иным образом отражать его суть, а не только вероятность протекания.

В мировой практике процессы производства агломерата и окатышей являются основными способами окускования тонкодисперсного железорудного сырья. Эти технологические процессы характеризуются большим числом независимых переменных, наличием промежуточных переменных, скрещивающихся каналов и обратных связей. Базовая ин-

формация о них достаточно полная, но установленные взаимосвязи переменных процесса и их показателей выражены качественно или графически, а в случаях математического обобщения влияние наибольшей части лимитирующих характеристик отражено в открытом виде. До настоящего времени не созданы логико-математические модели процессов производства агломерата и окатышей, которые могли бы стать базой создания методики построения алгоритмов и их свойств.

В промышленной практике автоматизированы только отдельные узлы производства, но до сих пор комплексная автоматизация с использованием электронно-вычислительных машин во всех существующих технологических схемах отсутствует. По этой причине для эффективного протекания процессов требуется совершенное оперативное руководство со стороны технологического персонала. Для этого рабочие-технологи обязаны понимать взаимосвязь переменных процессов и их

выходных показателей. Технологический персонал должен уметь оперативно реагировать в случае изменения каких-либо обстоятельств процесса, пользуясь установленными графическими зависимостями, в которых допустимо упрощение представлений о процессах окускования. Современные технические возможности вычислительных машин и программного обеспечения позволяют максимально оперативно и эффективно вести процесс производства агломерата и окатышей. Однако, уровень математического описания теории процессов окускования, с учетом всех протекающих явлений, не позволяют произвести комплексную автоматизацию процесса производства окускованного железорудного сырья.

Качественные математические модели процессов производства окускованного железорудного сырья должны систематизировать и оптимизировать разработки теории процессов производства агломерата и окатышей. Математические модели должны включать описание взаимосвязей факторов, лимитирующих процессы и их влияние на качество продуктов окускования.

Так как процессы можно проводить по различным технологическим схемам, в качественных моделях отражены те общие для всех вариантов моменты, которые представляют суть процессов и не зависят от способа их осуществления. Анализ ведется таким образом, что по существу создается самостоятельная модель каждой рассматриваемой технологической схемы окускования сырья.

Методика математического описания работы промышленных агрегатов должна строиться на их теоретическом анализе работы. Необходимо количественно учитывать действия и силы, возникающие в процессе работы производственных агрегатов. Соблюдение выведенных критериев моделирования позволит добиться воспроизводимости результатов для агрегатов различных размеров.

С точки зрения математического моделирования процессы окускования являются комплексными динамическими системами, которые характеризуются наличием обратных связей между переменными и на которые влияет их прошлое. Комплексная математическая модель производственного процесса позволит произвести оптимальную автоматизацию процесса и работать в направлении интенсификации производственных процессов, как в области сырьевой базы, так и для поиска принципиально новых решений в технологии производства. Для комплексных математических моделей процессов производства агломерата и окатышей правильное решение нельзя найти аналитическим или интуитивным путем. Известны математические модели процессов, которые включают в себя симуляционные модели нелинейных дифференциальных уравнений.

Комплексные схемы формирования показателей процессов окускования и уточненные факторы, на которых должно базироваться их моделирование, могут послужить в качестве основы для разработки алгоритмов их управления и комплексной автоматизации с применением передовых информационных технологий [1–3].

Наиболее быстрое и эффективное применение в промышленной практике находят комплексные математические описания графических моделей оперативного руководства процессом. Однако, благодаря развитию в сфере информационных технологий, которые необходимо включать в концептуальную модель производственного комплекса [4], имеется возможность не только определять математические описания сложных графических зависимостей, но и управлять производством агломерата и окатышей посредством полной автоматизации процесса с автоматическим определением оптимальных параметров и режимов процесса.

Целью работы является анализ и оценка возможности использования существующих математических моделей для решения задач, связанных с операциями процессов производства окускованного железорудного сырья.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Моделирование процессов производства агломерата и окатышей должно вмещать совокупность важнейших свойств, присущих объектам исследований. При создании математических моделей необходимо учитывать многочисленные параметры этого процесса. Для эффективного учета всех параметров, принимающих участие в процессе окомкования, необходима их систематизация. Например, систематизация параметров позволит алгоритмизировать процесс спекания агломерата. При построении модели спекания агломерата математические зависимости, описывающие явления, которые происходят в процессе перемещения зоны горения по высоте слоя аглошихты, можно разделить на факторы, лимитирующие процесс, как со стороны состава шихты, так и по техническим параметрам процесса. Важными входными параметрами являются следующие: содержание основных компонентов в шихте; влажность шихты; газопроницаемость шихты; высота слоя шихты; расход воздуха на процесс; условия зажигания – температура горна (температура среды в горне), температура зажигания (температура над поверхностью спекаемой шихты), обобщенная температура термообработки. Важными выходными параметрами являются показатели качества протекания процесса, а именно: скорость спекания; состав и температура отходящих газов; массовая доля закиси железа в готовом продукте; разряжение; время спекания. Возмущающими воздействиями являются динамические параметры процесса спекания: изменение состава шихты; изменение влажности шихты; изменение степени уплотнения шихты; изменение высоты слоя шихты; изменение скорости движения аглоленты; подсосы холодного воздуха; изменение разряжения над зажигаемым слоем; изменение соотношения топливо-воздух. На сегодняшний день не существует математических моделей процесса, которые описывали бы все из вышеперечисленных параметров и воздействий одновременно. Сложность создания такой модели заключается в наличии большого числа явлений, протекающих в процессе перемещения зоны горения по высоте слоя аглошихты, которые необходимо описать математически. В настоящее время техни-

ческие возможности в области информационных технологий позволяют решить эту задачу. Компьютерное моделирование позволяет производить переработку больших количеств информации в составе математических моделей сложных металлургических процессов. Математическое моделирование – это практически единственный метод решения научных задач особой сложности. Группировка вышеупомянутых параметров процесса спекания была произведена на основе общей схемы технологического объекта исследований (ТОИ) (рис. 1).

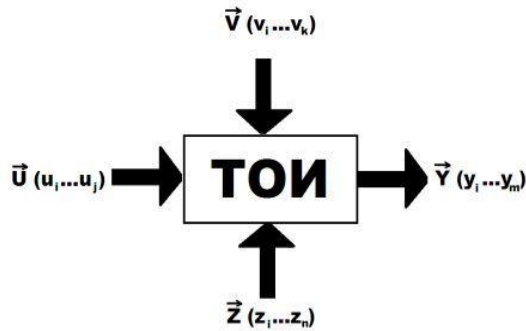


Рисунок 1 – Технологический объект исследований

Данная схема учитывает все входные, выходные и возмущающие параметры, о которых говорилось выше, а так же помогает визуализировать предложенную методику создания математической модели процесса спекания. Здесь  $\vec{U}$  – вектор контролируемых управляющих входов (расход сырых материалов, энергии и т.д.);  $\vec{V}$  – вектор контролируемых возмущений (качественные показатели сырья, параметры состояния оборудования и т.д.);  $\vec{Z}$  – вектор неконтролируемых возмущений (динамические характеристики процесса, обусловленные выбором схемы цепи аппаратов моделируемого технологического процесса);  $\vec{Y}$  – вектор выходов объекта (показатели состояния технологического процесса, качественные или количественные показатели промежуточных или конечных продуктов, технико-экономические показатели производства). Математическая модель представляет собой зависимость  $Y = f(U, V, Z)$ . Вид данной функции зависит от предмета исследований и определяет метод построения модели. В исследовании процессов окискования железорудных материалов функция может зависеть от времени или иметь существенные ограничения независимых переменных. Когда речь идет о процессе функционирования системы со сложной внутренней структурой, аналитическое описание делается обычно практически невозможным, потому что характеристики модели должны отвечать с достаточной точностью характеристикам моделируемого процесса. Общая элементарная модель в результате проведения на ней экспериментов систематизируется в отдельные блоки. Модель, предложенная Л.А. Люстерником и В.И. Соболевым [5], состоит из блоков, отвечающих отдельным этапам работы над моделью. Основное преимущество «блочной» методики создания комплексной математической модели процессов окискования заключается в легкости

осуществления необходимых корректировок программы, вызванных изменением стратегии на каком-нибудь этапе исследования или большей детализацией отдельной работы. Вся работа сводится, в основном, к изменению одного блока.

Математическая модель процессов, протекающих при производстве окискованного железорудного сырья, должна описывать реальные процессы в математических зависимостях. В работе [6] изложены основные этапы разработки комплексной математической модели, отвечающей требованиям максимальной адекватности реальным теплофизическим и физико-химическим процессам, протекающим в слое при обжиге железорудных окатышей. Данная математическая модель применена на производстве. Она позволяет отрабатывать и оптимизировать тепловые схемы при реконструкции действующих и создании новых обжиговых агрегатов. Это осуществляется путем учета взаимосвязей коллекторов на современных обжиговых машинах за счет рекуперации газовых потоков. Данная математическая модель не является комплексной математической моделью спекания, т.к. не учитывает все взаимосвязи и зависимости, протекающие при обжиге.

В работе [7] была сделана попытка сравнить и структурировать все существующие математические модели агломерационного процесса. В этой работе дан исчерпывающий анализ существующих математических моделей аглопроцесса с учетом многочисленных характеристик основных входных, выходных и возмущающих параметров процесса. В большинстве случаев математические модели в публикации излагаются не полностью, ряд процессов и их эффектов в моделях не учтены или учтены в упрощенном виде. Возникают трудности при воссоздании их для исследования процесса спекания в каких-либо конкретных условиях. Рассмотренные математические модели различных типов построены, в основном, с помощью методов статистической термодинамики, которая не учитывает время протекания процесса. Численные методы решения являются приближенными, и их погрешность по координате во времени не приведена. Так же возникают трудности при проверке адекватности какой либо модели. Поэтому в работе [7] выполнено тестирование отдельных основных алгоритмов и взята за основу модель конвективного теплообмена с добавками других расчетных алгоритмов в качестве подмоделей. Моделирование всей совокупности процессов, осуществляемых при производстве окискованного железорудного сырья, является сложной теоретической и технической задачей, которую можно решить путем применения системного подхода к процессу, как к сложному структурированному объекту исследования. Так, в работе [8] процесс спекания аглошихты был рассмотрен как процесс перемещения зоны высоких температур по слою спекаемой шихты. Определена и обоснована одна из важнейших технологических характеристик производства агломерата – вертикальная скорость спекания, которая является выражением интенсивности аглопроцесса. В резуль-

тате анализа многообразных факторов, влияющих на вертикальную скорость спекания, и их взаимозависимости, становится очевидным, что наиболее удобной для практического использования формой представления метода расчетного определения этого показателя аглопроцесса является математическая модель перемещения зоны горения твердого топлива при спекании агломерационной шихты. Для составления идеальной конструкции описываемого процесса перемещения зоны горения твердого топлива в агломерационной шихте, называемой содержательной моделью, использована формула (1)

$$v_c = w_o / (V_r \cdot \rho), \quad (1)$$

где  $v_c$  – вертикальная скорость спекания, м/с;  $w_o$  – скорость фильтрации газа в слое, м/с;  $V_r$  – удельный выход агломерационного газа, м<sup>3</sup>/кг сухой шихты;  $\rho$  – насыпная масса агломерационной шихты, кг/м<sup>3</sup>, поскольку в результате сравнительного исследования установлено, что она обладает наибольшей универсальностью и пригодностью для практического применения. В пользу такого выбора свидетельствует также то, что в области повышенного содержания углерода в шихте (более 4 %), несмотря на уменьшение кажущейся теплоемкости шихты вследствие увеличения массовой доли углерода в ней, скорость спекания снижается, хотя согласно формуле, основанной на отношении теплоемкостей газов и шихты, должна увеличиваться. Основными структурными элементами модели являются параметры шихты и параметры газа, которые характеризуют начальное состояние системы. Параметры агломерационной шихты, характеризующие начальное состояние системы, включают в себя: содержание отдельных компонентов шихты; массовую долю углерода в топливе, СаО в известняке и СаО<sub>акт</sub> в извести; фракционный состав топлива и шихты; высоту слоя спекаемой шихты. Входными параметрами модели, устанавливаемыми при выполнении расчетов для конкретного случая спекания, являются: состав газа на входе в слой; скорость просасывания воздуха через спекаемый слой; истинная плотность шихтовых компонентов. Согласно принятой содержательной модели, рассматриваемые процессы сгруппированы в следующие подсистемы: скорости фильтрации газа в слое; удельного выхода агломерационного газа; насыпной массы окомкованной шихты. Параметром выхода является вертикальная скорость спекания аглошихты. Полученное численное описание процесса движения зоны горения при спекании аглошихты является локальной динамической моделью, адекватность которой подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований. Несмотря на локальный характер разработанной модели, благодаря своей многогранности, она учитывает основные вещественно-структурные параметры процесса спекания аглошихты, влияющие на скорость перемещения зоны горения, и в этом качестве может рассматриваться как упрощенный аналог универсального

модельного программного комплекса агломерационного процесса. Разработанная математическая модель процесса перемещения зоны горения твердого топлива в спекаемом слое агломерационной шихты, позволяет изучать зависимость вертикальной скорости спекания от параметров вещественного состава и структурно-газодинамических характеристик слоя аглошихты.

В исследовании математических описаний процесса грануляции железорудных окатышей методика создания универсальной математической модели аналогична вышеописанной. Для определения требуемых параметров технологического процесса, а так же для поиска новых технологических решений, необходимо описание всех явлений процесса грануляции. Однако, сложность эксплуатации промышленного оборудования и невозможность проведения экспериментальных исследований значительно усложняет процесс оптимизации и усовершенствования данной технологической операции.

Математическое описание процесса грануляции позволит осуществить поиск новых решений в оптимизации технологии производства окатышей. Существующие математические описания процессов грануляции не учитывают все физико-химические преобразования и закономерности, возникающие при окатывании, большинство из них направлены на регулировку скорости вращения окомкователя. В модели [9] входными параметрами являются: скорость вращения чаши, влажность шихты, содержание в шихте железа. Показателями производительности процесса являлись разность выходов окатышей кондиционного размера и крупных кусков (-20 мм), прочность окатышей на сбрасывание. Данную модель можно использовать для прогнозирования процесса окомкования на промышленных установках. Для оптимизации получения окатышей в работе [10] при заданной влажности шихты рекомендуют регулировать скорость вращения чаши или производительность гранулятора, однако, в работе не учтены зависимости изменения качественных параметров шихты. Имеющиеся на сегодняшний день математические модели грануляции железорудных окатышей подобны вышеописанным моделям и направлены на оптимальную регулировку промышленного оборудования. Так же неизвестны математические модели, учитывающие динамические характеристики окомкователя.

Создание универсальной математической модели процесса грануляции железорудных окатышей является на сегодняшний день актуальной задачей. Однако, ввиду сложности учета всех факторов, определяющих эффективность процесса грануляции, а так же отсутствия математических зависимостей некоторых физических явлений, не существует универсального математического описания процесса грануляции. Известные математические формулы, по которым определяется скорость роста окатышей, могут быть применены для оценки отдельных конкретных экспериментов, но использовать их для оценки и объяснения общих положений

нельзя. Сложно учесть все параметры, влияющие на процесс грануляции. При создании математической модели грануляции необходимо учитывать ряд факторов, обусловленных свойствами материала, поступающего на гранулятор и физическими явлениями, возникающими в процессе грануляции: зернистость, влагоемкость тонкоизмельченного материала, силы, вызванные капиллярным разряжением, электростатические силы, силы когезии, молекулярные силы и др. Главным численным показателем при построении модели должна быть скорость окомкования или интенсивность окомкования (время пребывания материала в тарели окомкователя). При постоянных технологических параметрах работы оборудования (угол наклона, скорость вращения) на скорость окомкования в равнозначной степени оказывают влияние влажность материала и его свойства. Параметрами качества сырых окатышей можно принять: форму и размер, механическую прочность (выраженную коэффициентом комкуемости), пористость и величину поверхности гранул. Универсальная математическая модель процесса грануляции сырых окатышей даст возможность поиска новых технологических решений, повышающих эффективность процесса грануляции, а так же позволит избежать проведения дорогостоящих промышленных экспериментов и сократить цепочку мероприятий «теория-эксперимент-результат».

**ВЫВОДЫ.** На основе анализа существующих на сегодняшний момент математических моделей процессов, протекающих при производстве окускованного железорудного сырья, была оценена возможность применения математического моделирования этих процессов для автоматизации и оптимизации производства. Существует необходимость объединения многочисленных параметров в структурную схему с наличием подсистем. На данном этапе можно сказать, что не все процессы, происходящие при грануляции и термообработке шихты, нашли отражения в численных математических зависимостях. Разработана и обоснована методика создания алгоритма математических моделей процессов окускования железорудных материалов. Показана важность группировки отдельных математических описаний вышеупомянутых процессов в структурную схему, включающую подсистемы и подмодели, характеризующиеся взаимосвязями. При этом отмечается возможность легкой регулировки комплексной модели путем замены или изменения, дополнения какой-либо её подсистемы. Рассмотренные основные модели процессов окомкования, спекания и обжига показывают необходимость применения системного подхода к исследуемому объекту. Разработанная в работе [5] математическая модель, процесса перемещения зоны горения твердого топлива по высоте слоя аглошихты, дает возможность оптимизировать технологический процесс путем применения комплекса мероприятий, изучить их совместное влияние на готовый продукт, агрегат, выявить экономическую эффективность и целесообразность

проведения различных интенсифицирующих мероприятий одновременно.

Процесс разработки моделей не будет завершен при её создании, поскольку модель в дальнейшем будет дорабатываться с учетом новых закономерностей, устанавливаемых в результате исследования процессов производства агломерата и окатышей. Таким образом, универсальная математическая модель процессов спекания, обжига или грануляции будет являться адекватной и эффективной в ходе своего использования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боковикова А.Х., Малкин В.М., Меламуд С.Г. Комплексный расчет тепло-массообменных процессов при окислительном обжиге на конвейерной машине // *Сталь*. – 1995. – № 4. – С. 8–10.
2. Ляшенко В.П. Математична модель переносу речовини під час спікання порошкових матеріалів // *Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського*. – 2010. – Вип. 5/2010 (64). – С. 58–64.
3. Пазюк М.Ю., Качан Ю.Г., Ренгевич О.В. Математическая модель процесса окомкования шихтовых материалов в барабанном грануляторе // *Теория и практика металлургии*. – 1997. – № 3. – С. 40–41.
4. Конох И.С., Найда В.В. Анализ актуальности развития информационных технологий для оптимизации работы первой стадии обогатительной фабрики ПГОКа // *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. – 2014. – Вип. 5/2014 (88). – С. 71–76.
5. Люстерник Л.А., Соболев В.И. Краткий курс функционального анализа. – М.: Высшая школа, 1982. – 271 с.
6. Боковиков Б.А., Брагин В.В., Малкин В.М. и др. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата. – *Сталь*. – 2010. – № 9. – С. 84–87.
7. Кабаков З.К., Елисеев А.А. Математическая модель газодинамики в слое шихты, спекаемом на агломашине // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2006. – № 3. – С. 10–12.
8. Савельев С.Г., Великохатко Я.А. Математическая модель процесса перемещения зоны горения при спекании аглошихты // *Вісник Криворізького національного університету*. – 2014. – Вип. 37. – С. 108–113.
9. Исаев Е.А. Алгоритм интенсификации окомкования материалов в чашевом окомкователе // *Херсон*. 1998. – 9 с. – Деп. в УкрНИИ НТИ 30 мая 1999. – № 1169УК-99 Деп.
10. Чернецкая И.Е., Исаев Е.А., Лебеденко Ю.А. Система автоматической оптимизации окомкования железорудного концентрата в условиях ЦГОКа // *ААЭКС*. 2004. № 2 (14). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aeecs.org/cherneckaya-ie-isaev-ea-lebedenko-yua-sistema-avtomaticheskoi-optimizacii-okomkovaniya-jelezorudnogo-koncentrata-v-usloviyah-cgoka.html>

## USING OF THE MATHEMATICAL MODELING IN PRODUCTION OF AGGLOMERATED IRON ORE

Y. Velikohatko

Kryvyi Rih National University

vul. XXII Parts'ezda, 11, Krivoy Rog, 50027, Ukraine. E-mail: yanochkast1989@rambler.ru

V. Lunev

Zaporizhzhya National Technical University

vul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063, Ukraine. E-mail: mitlv@ukr.net

**Purpose.** To prove the expediency of integration of mathematical modeling in the scheme of automation of industrial sites. To review and systemize the theoretical development of mathematical descriptions of processes for production of sinter and pellets. **Methodology.** We have established the importance of using mathematical modeling in the production of agglomerated iron ore. We have done a comparative analysis of existing methods of mathematical modeling of processes of iron ore agglomerates production. **Results.** We have found the possibility of using models of the processes of production of agglomerated iron ore on various technological schemes, as well as circuit devices. We have analyzed and evaluated the possibility of using the existing mathematical models for solving problems related to the operations of the processes of sinter and pellets production. We have investigated the effectiveness of the use of existing mathematical models for production processes of intensified and optimizing activities. **Originality.** Not all processes, which are taking place in the granulation and heat treatment charge, are reflected in the numerical mathematical relationships. For the first time we have developed and created the technique of development of agglomerated iron ore. **Practical value.** Qualitative mathematical models of processes of production of agglomerated iron ore must organize and optimize the development of the theory of processes for production of sinter and pellets. References 7, figures 1.

**Key words:** mathematical model, agglomeration, pellets, production, automation.

## REFERENCES

1. Bokovikova, A.H., Malkin, V.M. and Melamud, S.G. (1995), "The complex calculation of heat mass transfer processes under oxidative firing on the conveyor machine", *Stal*, no. 4, pp. 8–10.
2. Lyashenko, V.P. (2010), "A mathematical model of substance transfer during sintering of powder materials", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 5, no. 64, pp. 58–64.
3. Pazyuk, M.Yu., Kachan, Yu.G. and Rengevich, O.V. (1997), "A mathematical model of the process of pelletizing the raw materials in a drum granulator", *Teoriya i praktika metalurgii*, no. 3, pp. 40–41.
4. Konoh, I.S. and Naida, V.V. (2014), "Analysis of the relevance of information technologies for the optimization of the first stage dressing mill PGOK", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 5, no. 88, pp. 71–76.
5. Lyusternik, L.A. and Sobolev, V.I. (1982), *Kratkiy kurs funktsionalnogo analiza* [A short course of functional analysis], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
6. Bokovikov, B.A., Bragin, V.V., Malkin, V.M. et al. (2010), "Mathematical model of the burning conveyor machines as a tool to optimize the thermal circuit unit", *Stal*, no. 9, pp. 84–87.
7. Kabakov, Z.K. and Eliseev A.A. (2006), "A mathematical model of gas dynamics in the layer of the charge sintered in the sintering machine", *Izvestiya vuzov. Chernaya metalurgiya*, no. 3, pp. 10–12.
8. Savelyev, S.G. and Velikohatko, Y.A. (2014). "A mathematical model of the process of moving the combustion zone during sintering sinter mix", *Visnyk Kryvorizkogo natsionalnogo universitetu*, iss. 37, pp. 108–113.
9. Isaev, E.A. (1998), "Algorithm intensification pelletizing materials in a bowl pelletizer", Kherson. *Deposition in UkrNII NTI*, May 30 1999, #1169UK-99 Dep.
10. Chernetskaya, I.E., Isaev, E.A. and Lebedenco, Yu.A. (2004), "Automatic optimization of iron ore pelletizing under CGOK", *Avtomatika. Avtomatizatsiy. Elektronnye komplekсы i sistemy*, no. 2 (14), available at: <http://www.aaecs.org/cherneckaya-ie-isaev-ea-lebedenko-yua-sistema-avtomaticheskoi-optimizacii-okomkovaniya-jelezorudnogo-koncentrata-v-usloviyah-goka.html> (accessed August 13, 2015).

Стаття надійшла 3.08.2015.