

З використанням розробленої імітаційної моделі технологічного комплексу підготовки шихти для виробництва агломерату виконано дослідження факторів, що впливають на стабілізацію якості шихти. Запропоновано будувати модель предметної області з використанням онтології, що дозволяє уникнути протиріч при визначенні типу ієрархії класів. Запропоновано також використовувати оригінальну процедуру ідентифікації середньозважених значень вмісту хімічних елементів і оксидів в ємності усереднення, а також використовувати для моделювання виникають нештатних ситуацій мультиагентний підхід

Ключові слова: імітаційна модель, стабілізація якості шихти, онтології, мультиагентний підхід

С использованием разработанной имитационной модели технологического комплекса подготовки шихты для производства агломерата выполнено исследование факторов, влияющих на стабилизацию качества шихты. Предложено строить модель предметной области с использованием онтологии, позволяющей избежать противоречий при определении типа иерархии классов. Предложено также использовать оригинальную процедуру идентификации средневзвешенных значений содержания химических элементов и оксидов в емкости усреднения, а также использовать для моделирования возникающих нештатных ситуаций мультиагентный подход

Ключевые слова: имитационная модель, стабилизация качества шихты, онтологии, мультиагентный подход

УДК 681.142.1.001.57

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37273

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОДГОТОВКИ ШИХТЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА

Б. Б. Зобнин

Доктор технических наук, профессор*

О. А. Горбенко

Аспирант*

Кафедра информатики

И. А. Ажица

Аспирант*

E-mail: azhipaigor@gmail.com

Р. А. Яковлев*

roma0604@yandex.ru

*Кафедра информатики

Уральский Государственный

Горный Университет

ул. Куйбышева, 30, г. Екатеринбург,

Российская Федерация, 620144

1. Введение

Необходимым условием повышения эффективности металлургических процессов является обеспечение более высокой стабильности качественных характеристик шихты по сравнению с существующими показателями.

Обеспечение конкурентно способности существующих металлургических предприятий России требует их коренной модернизации, начиная с процессов подготовки металлургического сырья к плавке.

Фактически колебания содержания Fe в рудной смеси, поступающей в агломерацию, составляют 1,5–2 %. Если выйти на уровень общемировых достижений по стабильности химического состава рудного сырья, то можно снизить расход топлива в агломерации и доменном производстве минимум на 7–10 %.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Традиционный подход к решению задачи оперативного смешивания предполагает, что существует мно-

жество допустимых рецептов смешивания, которое задано аналитически с помощью системы равенств и неравенств вида [1]:

$$x_i^k = u_i^k y^k \quad i = 1, \dots, n_k, \quad (1)$$

где k соответствует номеру смесительной операции, каждая из которых описывает определенный вид товарной продукции, полученный в результате выполнения смесительной операции; x_i^k , y^k – i -й входной и общий выходной потоки операции, u_i^k – i -я составляющая вектора управления, связанного с перераспределением входных потоков.

Полагаем, что $u^k \in U_k$, где U_k – множество допустимых рецептов смешивания.

$$\sum_{i=1}^{n_k} u_i^k = 1, \quad \underline{u}_i^k \leq u_i^k \leq \overline{u}_i^k, \quad (2)$$

где $\underline{u}_i^k, \overline{u}_i^k$ – заданные вещественные числа.

Зависимость качественных показателей смеси от управляющих воздействий принимаем линейной:

$$v_s^k = \sum_{i=1}^{n_k} v_{si}^k u_i^k \quad s=1, \dots, m_k, \quad (3)$$

где v_s^k – значение s -го качественного показателя товарных бокситов k -го сорта; v_{si}^k – значение s -го качественного показателя i -го входного потока; m_k – число контролируемых качественных показателей.

Полагаем, что v_{si}^k являются заданными величинами, а на значения v_s^k наложены ограничения вида

$$\underline{v}_s^k \leq v_s^k \leq \overline{v}_s^k, \quad (4)$$

где $\underline{v}_s^k, \overline{v}_s^k$ – заданные числа.

В случае статической постановки задачи требуется найти значения переменных u_i^k, y^k , удовлетворяющих, кроме ограничений (1), (2), (3), (4), дополнительным ограничениям на запасы исходных компонентов

$$u_i^k y^k = \overline{x}_i^k. \quad (5)$$

И плановым ограничениям

$$y^k \geq \underline{y}^k \quad (6)$$

Среди зарубежных крупных компаний, занимающихся автоматизацией процесса смесеприготовления, можно выделить немецкую компанию Siemens, швейцарскую компанию ABB Switzerland Ltd, финскую компанию Outotec.

Заявленная компанией комплексная система мониторинга сырьевых материалов [2] "Сименс" Simine^{CIS} MAQ, позволяет осуществлять непосредственное планирование качества и составление шихты. Она охватывает всю производственную цепочку от поступающего на предприятие сырья (с рудника или по железной дороге) до складских помещений и обеспечивает точное изображение штабеля и его содержимого в трех измерениях. Оператор обладает информацией об имеющихся на складе материалах, их качественных характеристиках в любой момент времени. Применение этого решения вместе с модулем Simine^{CIS} MOM. Модульная структура решения Simine^{CIS} MAQ подразумевает, что она может гибко адаптироваться к условиям и технологии транспортировки, существующим на конкретном предприятии. В зависимости от этих условий устанавливаются различные модули, такие как: интерфейс импорта данных (например, по сырью, поступающему с рудника, баржи или железнодорожных вагонов). Конфигурируемый мониторинг материалов с постоянным подключением к системе управления. Управление штабелем в трехмерной проекции. Модуль мониторинга материалов (Material Tracking), который является основным в решении Simine^{CIS} MAQ, наносит на карту весь маршрут движения материалов, от их поступления до отгрузки. Модуль управления штабелем интегрирует данные со штабелей и бункеров в единый поток материалов. Его центральная функция заключается в прорисовке контура штабеля и качества содержащихся в нем компонентов на основе оперативных технологических данных. Полученная структура штабеля сохраняется в базе данных с каче-

ственной и количественной информацией для каждого его кубического метра. Она обновляется в режиме онлайн всякий раз, когда происходят изменения. Самая последняя конфигурация штабеля и данные по материалу, сохраненные в базе данных, визуализируются в различных формах. Помимо нанесения на карту контура поверхности, система отображает разными цветами различные классы и типы материалов. Главной функцией системы поддержки планирования качества является раннее прогнозирование качества шихты. Используя виртуальную сетку, можно выбирать любые зоны, для которых система сразу произведет расчет получаемого качества шихты.

Исходные данные, используемые для решения задачи управления процессом смешивания в горной промышленности, имеют ряд особенностей:

- наличие как численных, так и качественных показателей, что усложняет их совместную обработку;
- большой процент пропущенных значений, не позволяющих использовать весь объем имеющихся данных при статистическом анализе и моделировании;
- наличие недостоверных данных, связанных с ошибками при регистрации и вводе показателей или являющихся артефактами.

В настоящее время большое внимание уделяется автоматизации контроля и управления технологическими процессами в условиях нештатных и аварийных ситуаций. Но уровень их сложности настолько высок, что оператор физически не в состоянии быстро и адекватно отреагировать на опасные ситуации и тем более их спрогнозировать

Разработка программ, автоматизирующих этот процесс, пока также не приносит желаемых результатов ввиду сложной логики принятия решений. Традиционные пути решения этой проблемы состоят во введении различного рода экспертных систем (в том числе, использующих технологии искусственных нейронных сетей).

Для процессов смесеприготовления характерно возникновение конфликтных ситуаций, препятствующих формированию гомогенной шихты. Конфликтные ситуации связаны, в частности, с невозможностью реализовать графики-задания, определяющие соотношения компонентов шихты, из которых формируется товарная руда; с ограниченными запасами компонентов шихты, а также с несоответствием фактического качества компонентов шихты результатам анализов.

Вероятность возникновения конфликтных ситуаций может быть минимизирована путем выбора сценариев формированию гомогенной шихты в мультиагентных системах.

Вычислительная модель агента является многозадачной. В агенте отдельные задачи (или *поведения*) могут выполняться одновременно. Каждая функциональная возможность и/или сервис, предоставляемый агентом, должны быть реализованы как одно поведение или их набор [3]. Внутренний планировщик, скрытый от разработчика, автоматически управляет планированием поведений. Навязываемое платформой разделение функционала агента на набор поведений позволяет легко распараллелить исполнение независимых поведений. По умолчанию менеджеру поведений каждого агента внутри платформы выделяется свой поток, и все поведения агента выполняются

внутри этого потока. Для большого количества простых поведений такая политика распределения ресурсов подходит лучше в том смысле, что переключение поведений внутри одного потока происходит быстрее, чем переключение множества слабо загруженных потоков [4–7].

3. Цель и задачи исследования

Цель выполняемого исследования заключается в разработке новых методов и алгоритмов контроля и управления сложными нестационарными технологическими комплексами смесеприготовления с использованием имитационного моделирования.

Основой выбора сценариев развития технологического комплекса является имитационная модель (ИМ), позволяющая в оперативном плане минимизировать риск нарушений технологического процесса, а в стратегическом плане – выбрать наиболее рациональный комплекс сценариев развития рудоподготовительного комплекса.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. С использованием онтологии построить модель предметной области, позволяющей интегрировать разнородные информационные ресурсы на концептуальном уровне.
2. Разработка структуры имитационной модели технологического комплекса подготовки шихты для производства агломерата.
3. Разработка способа идентификации коэффициента передачи динамического звена, описывающего изменения средневзвешенных значений содержаний химических элементов и оксидов в емкости усреднения в процессе ее заполнения.
4. Разработать программное обеспечение интеллектуальной системы управления процессом рудоподготовки и диагностики процесса формирования штабеля с использованием среды многоагентного моделирования NetLogo.
5. Моделирование процесса формирования штабеля с использованием имитационной модели.
6. Интерпретация результатов моделирования.

4. Методы построения адекватной имитационной модели формирования штабеля на складе концентратов

Модель предметной области предложено строить с использованием онтологии, способствующей интеграции разнородных информационных ресурсов на концептуальном уровне. Под онтологией понимается структура в виде графа или сети, состоящая из набора концептов (классов), набора бинарных связей между концептами и набора экземпляров классов – записей, соответствующих классам или отношениям. Благодаря онтологии пользователь будет получать ресурсы, семантически релевантные запросам [8, 13–15]. Визуализация онтологии позволяет посетителю Web-ресурса видеть связь между различными материалами на нем и облегчает навигацию по portalу.

ИМ представляет собой особый способ исследования объектов сложной структуры, заключающийся в воспроизведении численным образом всех входных и выходных переменных каждого элемента объекта. ИМ позволяет учесть не только статические взаимосвязи между элементами системы, но и динамические аспекты функционирования технологического комплекса.

Использование ИМ требует проведения вычислительных экспериментов с целью оценки ее адекватности, устойчивости результатов имитации и чувствительности ИМ к изменениям управляющих и возмущающих воздействий.

При имитационном моделировании должны быть предусмотрены средства автоматизации представления и интерпретации результатов моделирования, а также возможность управления имитационным экспериментом и сбора статистики в процессе моделирования, наличие средств отладки и диагностики.

Цель имитационного эксперимента – проверка применимости предложенных моделей, методов и выбранных инструментальных средств для решения задачи.

Имитационная модель построена при следующих допущениях.

1. Известны сменные задания по каждому k-му классу железорудного сырья и соотношения грубые/тонкие.
2. Известен график перевозки на склад концентратов в течение смены.
3. Известна общая масса материала k-го класса в вертушке, содержание компонента в k-м классе материала вертушки и время подачи вертушки на узел разгрузки думпкаров.
4. При формировании штабеля происходит расслоение частиц по фракциям, так как более крупные частицы скатываются к основанию формируемого штабеля. Сегрегация материала в процессе формирования штабеля учитывается коэффициентом трения качения частицы по поверхности откоса слоя.
5. Известны параметры штабеля.

Предложено расчет значений коэффициента передачи динамического звена, описывающего изменения средневзвешенных значений содержаний химических элементов и оксидов в емкости усреднения в процессе ее заполнения производить по формуле [9]:

$$K = (Y_k - Y_{k-1}) / (1 - (Y_{k+1} - Y_k) / (Y_k - Y_{k-1})). \quad (7)$$

При этом расчет массы i-го сырьевого компонента, поступающего в формируемый штабель за (k–1)-й, k-й, (k+1)-й интервалы времени, производится по формуле:

$$\left. \begin{aligned} S_{Q_i}^{k-1} &= t_0 * \sum_{m=k-1}^k Q_i(t_m), \\ S_{Q_i}^k &= t_0 * \sum_{m=k}^{k+1} Q_i(t_m), \\ S_{Q_i}^{k+1} &= t_0 * \sum_{m=k+1}^{k+2} Q_i(t_m), \end{aligned} \right\}$$

где $Q_i(t_m)$ – расход i-го компонента в момент времени t_m , кг/с; t_0 – интервал квантования, с.

Расчет содержаний химических элементов и оксидов в i-м сырьевом компоненте, поступающем в

штабель за (k-1)-й, k-й, (k+1)-й интервалы времени, производится по формуле:

$$\left. \begin{aligned} S_{v_i}^{k-1} &= t_0 * \sum_{m=k-1}^k v_i(t_m), \\ S_{v_i}^k &= t_0 * \sum_{m=k}^{k+1} v_i(t_m), \\ S_{v_i}^{k+1} &= t_0 * \sum_{m=k+1}^{k+2} v_i(t_m), \end{aligned} \right\}$$

где v_{si}^k – содержание значение s-го качественного показателя i-го входного потока в момент времени t_m , %.

Расчет средневзвешенных значений содержаний химических элементов и оксидов в емкости усреднения за (k-1)-й, k-й, (k+1)-й интервалы времени производится по формуле:

$$\left. \begin{aligned} Y_{k-1} &= \left(\sum_{i=1}^n S_{Q_i}^{k-1} * S_{v_i}^{k-1} \right) / \sum_{i=1}^n S_{Q_i}^{k-1}, \\ Y_k &= \left(\sum_{i=1}^n S_{Q_i}^k * S_{v_i}^k \right) / \sum_{i=1}^n S_{Q_i}^k, \\ Y_{k+1} &= \left(\sum_{i=1}^n S_{Q_i}^{k+1} * S_{v_i}^{k+1} \right) / \sum_{i=1}^n S_{Q_i}^{k+1}. \end{aligned} \right\}$$

Моделирование технологических ситуаций проводилось на основе результатов опробования материальных потоков на участке усреднения концентратов. При этом для каждой моделируемой ситуации использовалась одинаковая по числу значений выборка, в частности, использовались усредненные данные о расходах компонентов с интервалом в 10 минут, и данные о химическом составе материальных потоков с интервалом в одну смену (8 часов) (рис. 1).

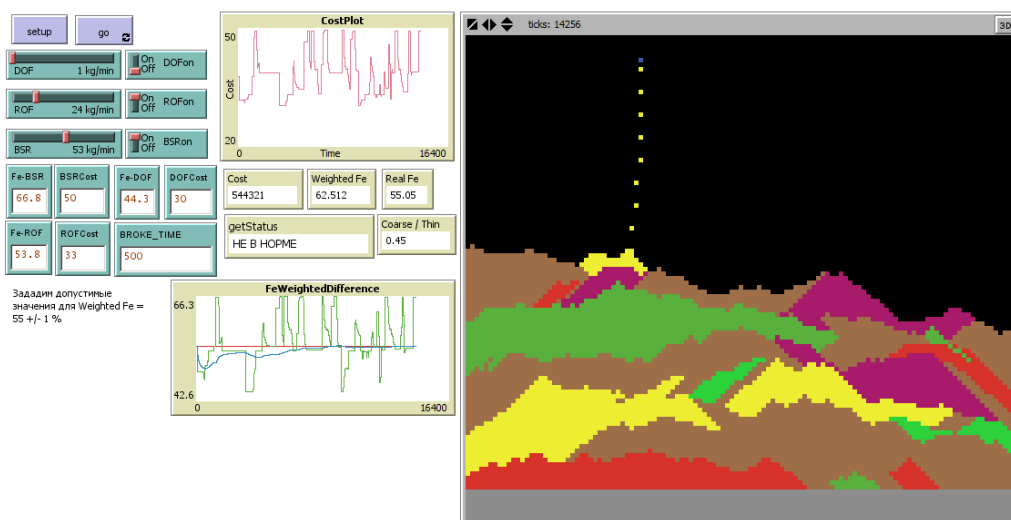


Рис. 1. Результаты имитационного моделирования процесса формирования штабеля на складе концентратов. Различными цветами показаны компоненты шихты

Эти действия выполняются в различных масштабах времени. Для имитации процесса опробования на содержание железа в партиях накладывается шум, соответствующий дисперсии содержания железа в этих компонентах сырья.

Модель формирования и разгрузки штабеля на складе концентрата строится при допущении, что состав входного материального потока не успеваеет существенно измениться за время загрузки одного слоя материала в штабель. Полагаем, что известен расход подаваемого материала и его качественные характеристики, при этом состав материала, разгружаемого из штабеля, будет определяться технологией разгрузки штабеля в течение всего времени разгрузки (рис. 2).

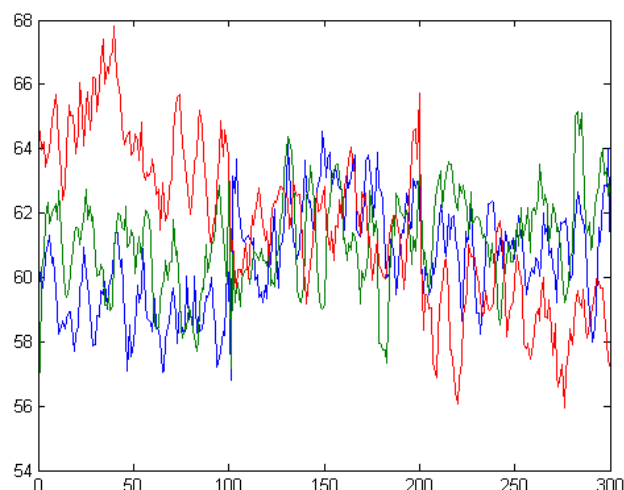


Рис. 2. График содержания железа в компонентах (зеленый – соколовский концентрат, красный – михайловский концентрат, синий – лебединский концентрат, по оси абсцисс время (часы), по оси ординат содержание железа в компонентах (%))

Резкие изменения амплитуды (рис. 2) свидетельствует о переходе на различные рудные склады.

Для разработки программного обеспечения интеллектуальной системы управления процессом рудоподготовки и диагностики процесса формирования штабеля предлагается использовать среду многоагентного моделирования NetLogo, которая служит для моделирования ситуаций, возникающих в сложных технологических комплексах [10]. Создатель модели может давать указания сотням и тысячам независимых "агентов", действующим параллельно. Это открывает возможность для объяснения и понимания связей между поведением отдельных технологических звеньев и явлениями, которые происходят на макроуровне [11–15].

5. Обсуждение результатов моделирования качества шихты

На выходе двухштабельной усреднительной системы низкочастотные изменения состава материала описываются кусочно-постоянной функцией, изменяющейся с периодом T . В любой момент времени должна быть известна масса сырья, уже загруженного в штабель, и его качественные характеристики.

При этом дисперсия содержания железа в шихте, отгружаемой со склада, рассчитывается по формуле:

$$D_{\Delta\alpha}(T_3) = M \left\{ (1 - \xi^2) [\Delta\alpha_{\text{ш}}(T_3)]^2 + \frac{\xi^2}{T_3} \int_0^{T_3} [\Delta\alpha_{\text{ш}}(t)]^2 dt \right\}, (8)$$

где $\xi = 1 - \left(\frac{V_{\text{эф}}}{V}\right)$ – характеризует гомогенизационную

способность циклической усреднительной системы; $V_{\text{эф}}$ – объем зоны интенсивного перемешивания при выгрузке шихты со склада концентрата; V – рабочий объем штабеля; T_3 – время загрузки штабеля. $\Delta\alpha_{\text{ш}}$ – отклонение содержания железа в штабеле от заданного значения.

При $\xi=0$ получается модель идеального перемешивания. При $\xi=1$ усреднение практически отсутствует. Сглаживающий эффект при усреднении оказывается тем больше, чем меньше период колебаний входного потока по сравнению с периодом загрузки штабеля.

Полученный критерий имеет ясный физический смысл. При неидеальном перемешивании материала в штабеле необходимо сочетать стремление к компенсации средних по штабелю отклонений показателей качества шихты (первое слагаемое критерия (1), с требованием текущей стабилизации показателей качества шихты, поступающей на вход участка усреднения (второе слагаемое критерия (1)).

6. Выводы

1. Показано, что использование онтологии верхнего уровня в качестве основы для онтологии предметной области позволяет избежать противоречий при определении типа иерархии классов, а также определить базовый словарь (тезаурус) для описания объектов предметной области.

2. Обоснована структура имитационной модели, включающая в себя блоки:

- формирования функций распределения партий привозного сырья при известном графике-задании подачи сырья с учетом нарушений графика;

- формирования функций распределения потоков шихты на сборном конвейере, подающим его на автостеллу с учетом синхронизации потоков местного и привозного сырья;

- формирования функций погрешностей измерения массовых расходов компонентов шихты и содержания железа в этих компонентах;

- формирования функций пространственного распределения содержания железа в штабеле с учетом положения автостеллы;

- формирования потоков железорудной части шихты, подаваемой на аглофабрики, при известном регламенте работы грейферных кранов;

- расчета объемов аномальных зон в штабеле и укладки содержания железа в штабеле;

- блока расчета погрешности синхронизации потоков местного и привозного сырья (отношение периодов, в течение которых потоки синхронны, к общему периоду формирования штабеля).

3. Разработан способ идентификации коэффициента передачи динамического звена, описывающего изменения средневзвешенных значений содержаний химических элементов и оксидов в емкости усреднения в процессе ее заполнения, позволяющий уменьшить величину отклонений прогнозируемого средневзвешенного значения содержания железа на складе концентрата от заданного значения.

4. Разработано программное обеспечение интеллектуальной системы управления процессом рудоподготовки и диагностики процесса формирования штабеля, позволяющее адекватно реагировать на ситуации, возникающие в процессе работы усреднительного комплекса.

5. Выполнено моделирование процесса формирования штабеля с использованием имитационной модели, включающее в себя исследованы зависимости характеристик формируемого штабеля от различных типов нарушений в работе усреднительного комплекса. Получены оценки тенденций изменения контролируемых параметров при нарушениях синхронизации работы усреднительного комплекса, а также определены вклады изменения технологических процессов в возникновение и величину аномальных зон в штабеле. В частности, влияния спектра возмущающего воздействия, обусловленного параметрами импульсной случайной последовательности подачи порций сырья (например, железнодорожных составов) на склад привозных руд на качество усреднения.

По результатам имитационного моделирования, разработана модель прогнозирования качественных характеристик штабеля, позволяющая качественно оценивать влияние нарушений в работе усреднительного комплекса на характеристики шихты. Данная модель использует продукционно-фреймовое представление знаний, в котором статические знания о предметной области имеют вид фреймовой иерархии, а в качестве динамических знаний о переходах между состояниями используются продукционные правила прямого и обратного вывода.

6. Результаты моделирования показывают, что стабилизация качества шихты оказывает влияние и на экономику производства: уменьшение средних квадратичных отклонений вещественного состава руд с 0,8 % до 0,4 % снижает затраты производства на 0,1–0,3 руб. на 1 т концентрата; снижение среднего квадратичного отклонения удельного расхода тепла на обжиг окатышей с 40 до 20 кДж/кг повышает удельную производительность обжиговой машины на 8–10 %; уменьшение выхода некондиционной продукции в аглопроизводстве на 2 %, что эквивалентно дополнительному выпуску 4 млн. т в год высококачественного агломерата.

Интеллектуальная система управления процессом рудоподготовки, содержит, наряду с традици-

онным контуром управления, принципиально новые части: динамическую экспертную систему и базу знаний реального времени, накапливающую текущие знания о внешних и внутренних процессах.

Система учитывает знания оператора и снабжает имеющимися знаниями экспертную систему. Эту систему рационально исследовать в среде моделирования NetLogo.

Литература

1. Дудников, Е. Е. Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством [Текст] / Е. Е. Дудников, Ю. М. Цодиков. – М.: Энергия, 1979. – 272 с.
2. Metals Technologies [Electronic resource] / Available at: <http://www.industry.siemens.com/verticals/metals-industry/en/metals/pages/home.aspx>
3. Amelina, N. Local voting protocol in decentralized load balancing problem with switched topology, noise, and delays [Text] / N. Amelina, O. Granichin, A. Kornivets // In: Proc. of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control. – Firenze, Italy, 2013. – P. 4613–4618. doi: 10.1109/cdc.2013.6760611
4. Patterson, T. State-space models of individual animal movement [Text] / T. Patterson, L. Tomas, C. Wilcox, O. Ovaskainen // Trends in Ecology and Evolution. – 2008. – Vol. 23, Issue 2. – P. 87–94. doi: 10.1016/j.tree.2007.10.009
5. Liu, R. Modeling the dynamics of woody plant-herbivore interactions with age-dependent toxicity [Text] / R. Liu, S. A. Gourley, D. L. DeAngelis, J. P. Bryant // Journal of Mathematical Biology. – 2012. – Vol. 65, Issue 3. – P. 521–552. doi: 10.1007/s00285-011-0470-0
6. DeAngelis, D. L. Plant allocation of carbon to defense as a function of herbivory, light and nutrient availability [Text] / D. L. DeAngelis, S. Ju, R. Liu, J. P. Bryant, S. A. Gourley // Theoretical Ecology. – 2012. – Vol. 5, Issue 3. – P. 445–456. doi: 10.1007/s12080-011-0135-z
7. Wang, Y. Uni-directional consumer-resource theory characterizing transitions of interaction outcomes [Text] / Y. Wang, D. L. DeAngelis, J. N. Holland, // Ecological Complexity. – 2011. – Vol. 8, Issue 3. – P. 249–257. doi: 10.1016/j.ecocom.2011.04.002
8. Зобнин, Б. Б. Технологии преобразования нанопылей в нанокompозиты [Текст] / Б. Б. Зобнин, О. А. Горбенко, С. А. Сорочкин // Новые огнеупоры. – 2015. – № 15. – С. 57–60.
9. Патент на изобретение N 2366495 по заявке 2008119863/15(023282) [Текст] / Зобнин Б. Б., Сурин А. А., Головырин С. С., Коротков В. И. – Способ управления процессом смешивания сыпучих компонентов. – Дата подачи заявки 19.05.08
10. Wilensky, U. NetLogo: A Simple Environment for Modeling Complexity [Text] / U. Wilensky. – Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling Northwestern University, Evanston, Illinois, 2011. – Article 12.
11. Zobnin, B. Expert system for sintering process control based on the information about solid-fuel flow composition [Text] / B. Zobnin, S. Yendiyarov, S. Petrushenko // Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, France. – 2012. – Issue 68. – P. 861–868.
12. Hebel, J. Semantic Web Programming [Text] / J. Hebel, M. Fisher, R. Blace. – USA.: Wiley Publishing, 2009. – 650 p.
13. Liyang, Y. A Developer's Guide to the Semantic Web [Text] / Y. Liyang. – Springer-Verlag, USA, New York, 2011. – 608 p. doi: 10.1007/978-3-642-15970-1
14. Allemang, D. Semantic Web for the Working Ontologist. 2nd edition [Text] / D. Allemang, J. Hendler. – Waltham, 2011. – 354 p.
15. Segaran, T. Programming the Semantic Web [Text] / T. Segaran, J. Taylor. – USA, O'Reilly, 2009. – 302 p.