УДК 517.9; 519.6 doi: 10.15827/0236-235X.151.542-550 2025. Т. 38. № 3. С. 542–550

Программная реализация математической модели системы прогнозирования состава рудного сырья

А.А. Быков [1]✉, В.И. Бобков [1], В.А. Орехов [1], С.В. Незамаев [2]

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, 214013, Россия
[2] АО «Первая горнорудная компания», г. Москва, 109004, Россия

Ссылка для цитирования
Быков А.А., Бобков В.И., Орехов В.А., Незамаев С.В. Программная реализация математической модели системы прогнозирования состава рудного сырья // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38. № 3. С. 542–550. doi: 10.15827/0236-235X.151.542-550

Информация о статье
Группа специальностей ВАК: 1.2.2
Поступила в редакцию: 22.10.2024 После доработки: 15.11.2024 Принята к публикации: 16.01.2025

Аннотация. В работе представлена математическая модель, описывающая процесс прогнозирования возможного состава рудного сырья в бункере запаса. Решается задача автоматизированной подачи сырья в дозировочно-смесительный комплекс агломерационной машины. Предусматривается обеспечение подачи необходимого качества шихты без предварительного анализа химическими лабораториями горно-обогатительных предприятий. В основе модели конфигурация бункера запаса рассмотрена в виде набора вычислительных ячеек, которые может занимать рудный материал. Размеры данных ячеек выбраны с учетом точности дозирования и погрешности аппроксимации, а также с целью уменьшения времени вычислений и экономии памяти компьютера. Представление бункера запаса таким методом позволяет осуществлять моделирование процесса расчета движения сырья для различных конструкций бункеров. Благодаря этому модель предоставляет возможность создавать и проводить исследования экспериментальных установок запаса дозировочно-смесительных комплексов. Математическая модель описывает простейшее взаимодействие частиц материала при их движении в бункере запаса. В случае необходимости она учитывает их более сложные силовые взаимодействия, что делает модель оптимальной для любого вида рудного сырья. На базе разработанной модели был предложен алгоритм, ставший основой для разработки цифрового комплекса автоматизации расчета исследуемых параметров. Программа автоматизации реализована с помощью языка программирования C++ с использованием кроссплатформенного редактора Visual Studio Code. Это позволило разработанному программному комплексу функционировать под управлением любой операционной системы. Для верификации предложенного метода были проведены натурные и вычислительные эксперименты. Результаты показали хорошее совпадение с существующими методами расчета состава рудного сырья.

Ключевые слова: математическая модель, вычислительный элемент, программный комплекс, автоматизированные системы управления, численные методы, бункер запаса, рудное сырье, компьютерное моделирование
Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2023-0012

Введение. Эффективность разработки АСУ *технологического процесса* (ТП) с использованием микропроцессорной техники в последние годы выросла за счет промышленного освоения компьютерной техники, предназначенной для функционирования в сложных технологических условиях. Наряду с внедрением прямого цифрового управления с использованием обычной контрольно-измерительной аппаратуры и средств автоматики определенный научный интерес вызывают задачи получения информации о ходе процесса на некоторых сложных технологических участках.

Например, на металлургическом комбинате при загрузке шихты на агломерационную машину площадью спекания 600 кв. м. с шириной паллет 5 м. с помощью ультразвуковых датчиков непрерывно контролируется высота слоя шихты на отражательном листе в пяти точках, равностоящих одна от другой. Регулирование уровня осуществляется пятью шиберами, расположенными вдоль барабанного питателя. Это позволяет более точно поддерживать уровень шихты по ширине агломерационной машины в отличие от практикуемого метода регулирования числа оборотов барабанного питателя. Необходимо отметить, что внедрение прямого цифрового управления обеспечит воздействие на датчики локальных регуляторов благодаря корректировке задания по информации, введенной в систему вручную или автоматически [1, 2].

Применение АСУ ТП обеспечивает более качественное управление и рациональное взаимодействие оперативного персонала с технологическим объектом, повышает оперативность функционирования системы, улучшает технико-экономические показатели процесса. Известно, что АСУ ТП представляют собой качественно новую ступень развития средств и методов управления с использованием современных экономико-математических методов, средств электронно-вычислительной и управляющей техники, а также новые организационные принципы управления.

На агломерационных фабриках технологическим объектом создаваемых АСУ ТП является комплекс технологического оборудования в совокупности с реализуемыми им функциями переработки сырья и превращения их в продукт окускования – агломерат с заданными свойствами и составом. Одной из основных особенностей технологического объекта стала поточность выполняемых им операций, способствующая обеспечению высокого уровня автоматизации. Другой особенностью является возможность декомпозиции процесса на ряд последовательных отдельных технологических операций, характеризующихся определенными задаваемыми критериями [3, 4].

Наиболее эффективно создание АСУ ТП с применением микропроцессорной техники. Это позволяет перейти к замене жесткой схемной логики в область процедурного и объектно-ориентированного программирования, что дает возможность заменить разработку локальных систем традиционного управления операциями программирования, обработки данных и выборки управляющих воздействий, а также перенастроить системы при необходимости изменения задач управления [5].

Применение современной микропроцессорной техники позволяет избежать использования традиционной контрольной аппаратуры, заменив ее отображениями на мониторах, уменьшить габариты или исключить сооружение щитов и панелей и улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики средств автоматизации. Компьютерная техника может широко использоваться для обработки технико-экономической информации и накопления данных с целью совершенствования алгоритмов управления. В наибольшем объеме с помощью вычислительных машин возможно решение задач управления и расчета технико-экономических показателей различного горно-металлургического оборудования, применяемого на агломерационных фабриках. При этом с помощью современной микропроцессорной техники можно перейти к задаче оптимизации управления по категориям повышения качества сырья и агломерата, повышения надежности работы оборудования и сокращения энергетических затрат. Иерархическая структура систем управления позволяет централизованно управлять информационными потоками, осуществлять децентрализованное и дистанционное регулирование и обеспечивать оптимизацию агломерационного процесса [6].

Созданием достаточно полного математического обеспечения, включая математические модели технологических процессов и разработанных на их основе алгоритмов для реализации в ПО АСУ ТП, специалисты занимаются давно [7]. Эта задача не потеряла актуальности до сих пор. Кроме того, большинство существующих иностранных систем недоступно, поэтому востребованы отечественные системы для обеспечения технологической безопасности, в часности, металлургического производства.

Разработку высокоавтоматизированных систем управления в этой сфере необходимо начинать с решения самых простых задач, алгоритм которых отражает зависимости между технологическими параметрами, полученными на практике (то есть физическими моделями): управление дозировкой компонентов шихты, коррекция задания регулятору загрузки шихты на машину и т.п. После создания простейших программных составляющих их можно будет объединить в мощную АСУ ТП, управляющую либо всем агломерационным процессом, либо функционированием металлургических комбинатов в целом.

В данной работе представлена математическая модель и программный комплекс, позволяющий модернизировать дозировочно-смесительный процесс на рудных предприятиях. Существует две реализации дозировочно-смесительных линий: горизонтальная и вертикальная [8]. В большинстве случаев используется горизонтальная компоновка. Вертикальная отличается компактностью расположения оборудования и экономией электроэнергии при производстве шихты. Для реализации производственного процесса в вертикальной системе используется часто один бункер, позволяющий обеспечить суточную норму сырья. При замешивании материала применяются системы на основе подачи воды и пара, в результате вторые позволяют дополнительно регулировать температуру сырья [9]. Таким образом, актуальна задача разработки компьютеризированных систем расчетов, которые должны обеспечивать сравнительную характеристику различных вариантов дозировочно-смесительных линий с целью выбора наиболее оптимальной.

Построение математической модели прогнозирования состава рудного сырья дозировочно-смесительного комплекса

Математическое моделирование процесса анализа и расчета рудных сырьевых материалов позволит сохранить качество шихты, поступающей из бункера запаса в бункер дозатора без участия химической лаборатории, и существенно повысить оптимизацию работы цеха подготовки шихты. Химический анализ позволяет проверить лишь незначительную часть используемого материала и требует значительных временных интервалов, что замедляет процесс производства. В современных условиях для обеспечения выплавки материалов, соответствующих мировым стандартам, необходимо реализовать контроль состава сырья каждого дозирования, при этом время анализа должно быть меньше времени транспортировки материала в плавильную установку. Реализовать такой подход можно либо с помощью автоматического экспресс-анализа, что требует специализированного дорогостоящего оборудования, чаще всего иностранного производства, либо на основе расчета прогноза состава рудного сырья с выборочным контролем химической лабораторией [10,11]. Кроме того, на большинстве отечественных предприятий существующие дозировочно-смесительные линии выполняют большое количество операций, связанных с перегрузкой материала из одной емкости в другую, что значительно удлиняет время подачи материала в цех плавления. Представленная модель исключает данный процесс, предполагая загрузку материала в емкость, где будет производиться дозирование и смешивание. В качестве такой емкости можно использовать бункер запаса, оснащенный пневматическим смесителем, который обладает малой массой, прост и надежен в эксплуатации. Таким образом, использование разработанной модели позволит улучшить управление дозировочной системой обогатительных и рудоплавильных предприятий, что повысит их производительность и позволит сэкономить электроэнергию, затрачиваемую на дозировочно-смесительные процессы.

Первоначально для создания общей модели прогноза состава используемого сырья бункер запаса предлагается разбить на простейшие элементы-соты, занимаемые рудным материалом. Размер используемой соты должен соответствовать необходимой точности дозирования сырья с целью обеспечения допустимого значения погрешности аппроксимации. Таким образом, внутреннюю поверхность бункера можно математически задать следующим образом:

$$f(x, y, z) = \begin{cases} f_1(x, y), & z = 0, \\ f_2(x, y, z), & 0 < z < h, \\ f_3(x, y), & h \le z \le H, \end{cases}$$

где H – общая высота бункера; h – высота конической части; $f_1(x, y)$ – функция, задающая границу отверстия разгрузки; $f_2(x, y, z)$ – функция, определяющая область конической или пирамидальной части бункера; $f_3(x, y)$ – функция, определяющая область параллелепипедной или цилиндрической части бункера. Таким образом, элементно-ячеистая модель поверхности бункера описывается тремя математическими функциями, вид которых зависит от технологических параметров исследуемого бункера запаса.

Задание поверхности бункера в разработанной модели представлено в общем виде, поэтому позволяет рассматривать как простейшие поверхности, чаще всего встречающиеся в производстве, так и более специфические формы. На рисунке 1. представлено графическое отображение модели бункера запаса.

Для описания поверхности засыпанного в бункер материала, которая постоянно меняется

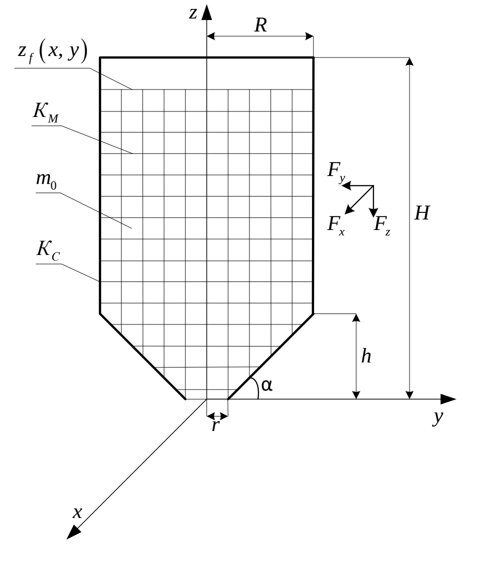

Рис. 1. Графическое представление модели бункера запаса рудных материалов

Fig. 1. Graphical representation of the ore stockpile bin model

в процессе работы установки, необходимо ввести четвертую математическую функцию $f_4(x, y, z)$, принимающую значение $f_4(x, y, z)$: $z = z_0$ в элементарном случае.

Введем обозначения для точки (x, y, z) относительно поверхности $f_i(x, y, z)$, где $i = 1 \ldots 4$: $x, y, z = f_i(x, y, z)$ – точка принадлежит поверхности; $x, y, z < f_i(x, y, z)$ – точка лежит внутри поверхности; $x, y, z > f_i(x, y, z)$ – точка лежит за пределами поверхности.

Сила, действующая на элемент материала, находящегося в бункере, может быть задана стандартно:

$$F(x, y, z) = \\ = \sqrt{F_x^2(x, y, z) + F_y^2(x, y, z) + F_z^2(x, y, z)},$$

где F_x, F_y, F_z – составляющие данной силы на соответствующие координатные оси. Эти составляющие представим в следующем виде:

$$F_x(x, y, z) = \begin{cases} 0, \quad x, y < f_1(x, y), \\ -m(x, y, z)\, g \cos\alpha \times \\ \times(\sin\alpha - k(x, y, z)\cos\alpha), \\ x, y \geq f_1(x, y); \end{cases}$$

$$F_y(x, y, z) = \begin{cases} 0, \quad x, y < f_1(x, y), \\ -m(x, y, z)\, g \cos\alpha \times \\ \times(\sin\alpha - k(x, y, z)\cos\alpha), \\ x, y \geq f_1(x, y); \end{cases}$$

$$F_z(x, y, z) = \begin{cases} -m(x, y, z)\, g(1 - k(x, y, z)), \\ x, y < f_1(x, y), \\ -m(x, y, z)\, g \sin\alpha \times \\ \times(\sin\alpha - k(x, y, z)\cos\alpha), \\ x, y \geq f_1(x, y), \end{cases}$$

где z_f – координата точки на верхней поверхности $f_4(x, y, z)$, располагающейся над базовым элементом; $m(x, y, z)$ – масса засыпанного материала над элементом; $k(x, y, z)$ – коэффициент трения в элементе, который задан с помощью выражения

$$k(x, y, z) = \begin{cases} K_C, \quad x, y, z = f_2(x, y, z) U f_3(x,), \\ K_M, \quad x, y, z < f_2(x, y, z) U f_3(x, y), \\ 0, \quad z = 0, \end{cases}$$

где K_M – внутриматериальный коэффициент трения; K_C – коэффициент трения о стенки бункера.

Данная сила сообщает частицам рудного сырья ускорение, которое также можно представить в базисном разложении:

$$a_x(x, y, z) = F_x(x, y, z) / m_0,$$
$$a_y(x, y, z) = F_y(x, y, z) / m_0,$$
$$a_z(x, y, z) = F_z(x, y, z) / m_0.$$

Приобретя рассмотренное ускорение, частица сырья при отсутствии влияния других частиц способна переместиться на расстояние, представленное в проекциях на каждую координатную ось:

$$l_x(x, y, z) = a_x(x, y, z)t^2/2,$$
$$l_y(x, y, z) = a_y(x, y, z)t^2/2,$$
$$l_z(x, y, z) = a_z(x, y, z)t^2/2,$$

где t – время выгрузки однократного заполнения бункера рудным материалом, величина которого зависит от дозатора рассматриваемой модели устройства.

Представленная математическая модель справедлива, если при взаимодействии частиц рудного сырья учитываются только силы трения, возникающие между ними, а между тем при реальном движении возникают и другие виды воздействия, например, столкновение частиц [12].

Данная модель вполне может учитывать дополнительные взаимодействия, если ее применять с использованием следующих условий. Во-первых, движение частиц необходимо рассматривать, начиная с центральной части бункера, где движению рудного материала ничего не мешает и другие воздействия практически отсутствуют, кроме тех, которые обусловлены силами трения. Во-вторых, на следующем этапе изучается движение в вертикальных столбах рудного сырья, располагающегося над отверстием бункера запаса. В-третьих, на основе анализа движения выгруженных элементов сырья моделируется местоположение частиц при попадании в исследуемый бункер. При этом частица может располагаться либо у стенки бункера, либо занимать свободное место над отверстием в центре бункера. При этом разрабатываемая в дальнейшем система автоматизации управления загрузкой сырья в бункер для адекватной работы представленной математической модели должна исключать возможность опоражнивания или переполнения бункеров, а при укладке на агломерационную ленту обеспечивать равномерное уплотнение при заданной высоте сырья. Система управления при размещении рудного материала также должна анализировать соответствие угла откоса естественному: если наблюдается нарушение данного параметра, то система должна обеспечить осыпание материала до совпадения с установленным углом.

Кроме того, представленный метод позволяет на основе химического анализа загружаемого сырья рассчитать для каждого слоя необходимое число элементов бункера и смоделировать состав рудного материала на выходе из бункера. Данный процесс моделируется на базе формулы

$$K_i = \sum_{j=1}^{n} m_j K_{ij} / m,$$

где n – количество загружаемых в бункер слоев; K_i – концентрация химического элемента i, входящего в состав сырья; m – количество элементов рудного сырья в загрузке; K_{ij} – концентрация в слое j загрузки элемента i; m_j – количество ячеек-сот слоя j бункера в исследуемой загрузке.

Разработанная модель также позволила выявить и учесть, что при движении материалов образуются три области в бункере: область перемешивания рудного сырья, область, в которой отсутствует сырье, и область, в которой материал не двигается при ссыпании. Кроме того, расчеты, полученные с помощью представленной модели, продемонстрировали, что процесс разгрузки бункера происходит перемешиванием материала из разных слоев. Данный результат требует учета расположения слоев материала при корректировке рецепта шихты во избежание недостатков, связанных с химической неоднородностью засыпаемых партий.

Алгоритм реализации математической модели расчета состава рудного сырья в бункере запаса дозировочно-смесительного комплекса

На базе предложенной математической модели был разработан алгоритм, на основе которого создана цифровая система прогнозирования расчета состава сырья при загрузке в бункер. Блок-схема данного алгоритма представлена на рисунке 2.

Разработанный алгоритм учитывает основные технологические параметры расчета со-

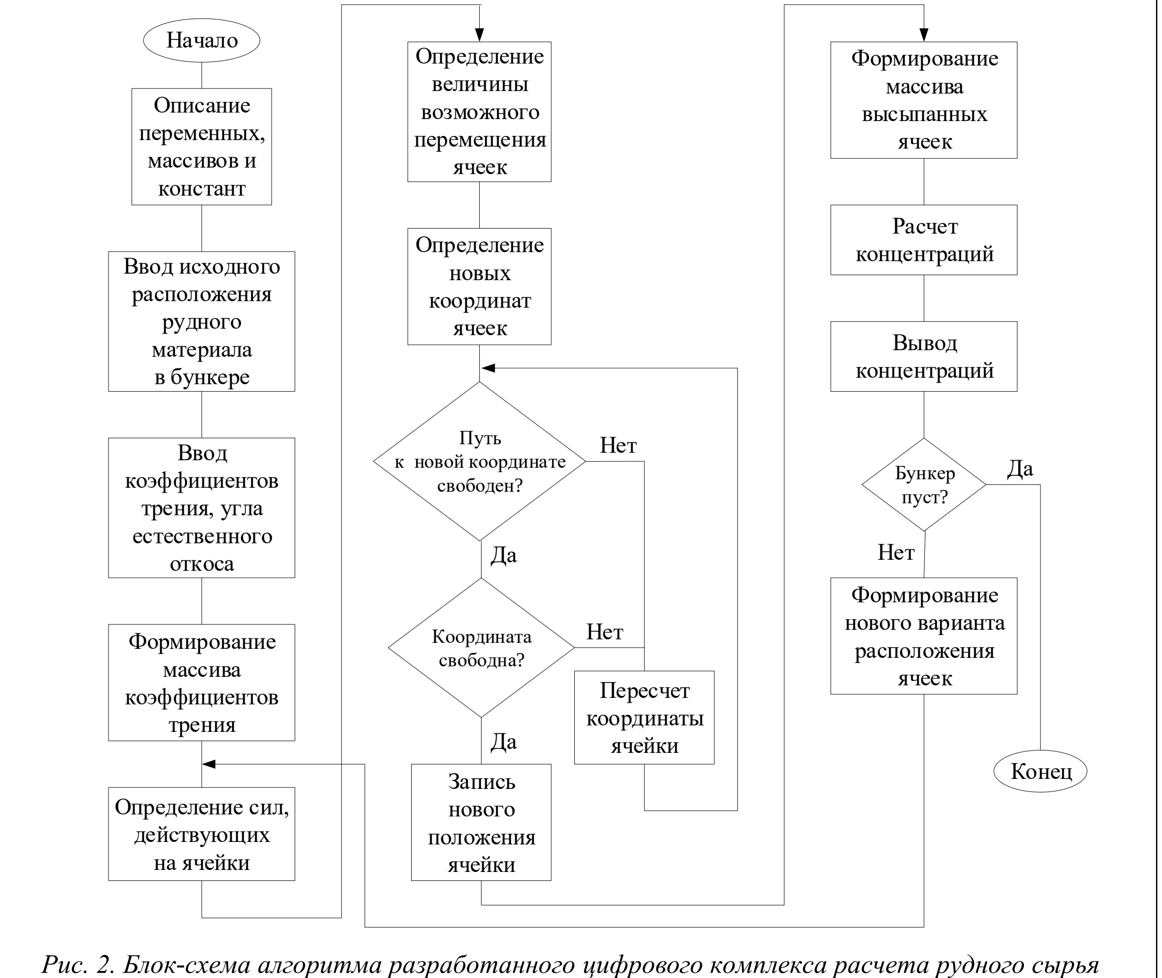

Рис. 2. Блок-схема алгоритма разработанного цифрового комплекса расчета рудного сырья

Fig. 2. Flowchart of the developed digital ore raw material calculation package

става рудного сырья в бункере запаса. Вначале вводятся базовые геометрические параметры исследуемого бункера: высота, длина, ширина, указывается трехмерная форма данного агрегата и параметры взаимодействия частиц сырья: коэффициенты трения, углы откоса и расположение рудного материала. На основании данных параметров производится разбиение бункера на элементарные вычислительные ячейки и определяются силы, действующие на них. В дальнейшем алгоритм производит расчет движения частиц сырья, и определяются концентрации составляющих рудного сырья.

На основании разработанного алгоритма был создан программный комплекс, архитектура которого представлена на рисунке 3.

Разработанная программа также позволяет исследовать зависимость скорости высыпания материала от высоты его слоя и изменения геометрии самого бункера. Результаты исследования необходимы при разработке систем автоматизации аппаратов шихтовального цеха, так как уменьшение слоя замедляет процесс дозирования и требует добавления материала в бункер. Программный комплекс наделен возможностью графического представления всех исследуемых зависимостей, это делает эксперимент более наглядным и информативным. На основании разработанного алгоритма можно оперативно в процессе производства скорректировать состав рудного сырья с целью выполнения норм расхода первоначально засыпаемого материала.

Цифровой программный комплекс расчета состава рудного сырья в бункере запаса

Программная реализация предложенной модели была осуществлена на базе языка программирования C++, как наиболее популярного при разработке промышленных систем автоматизации. В результате получен программный комплекс расчета состава рудного сырья в бункере запаса, который можно широко использовать при формировании систем автоматизации шихтовальных машин, применяемых в большинстве отраслей современной металлургической промышленности. Для обеспечения возможности функционирования под управлением любой операционной системы программный комплекс создан на основе известного кроссплатформенного комплекса Visual Studio-Code.

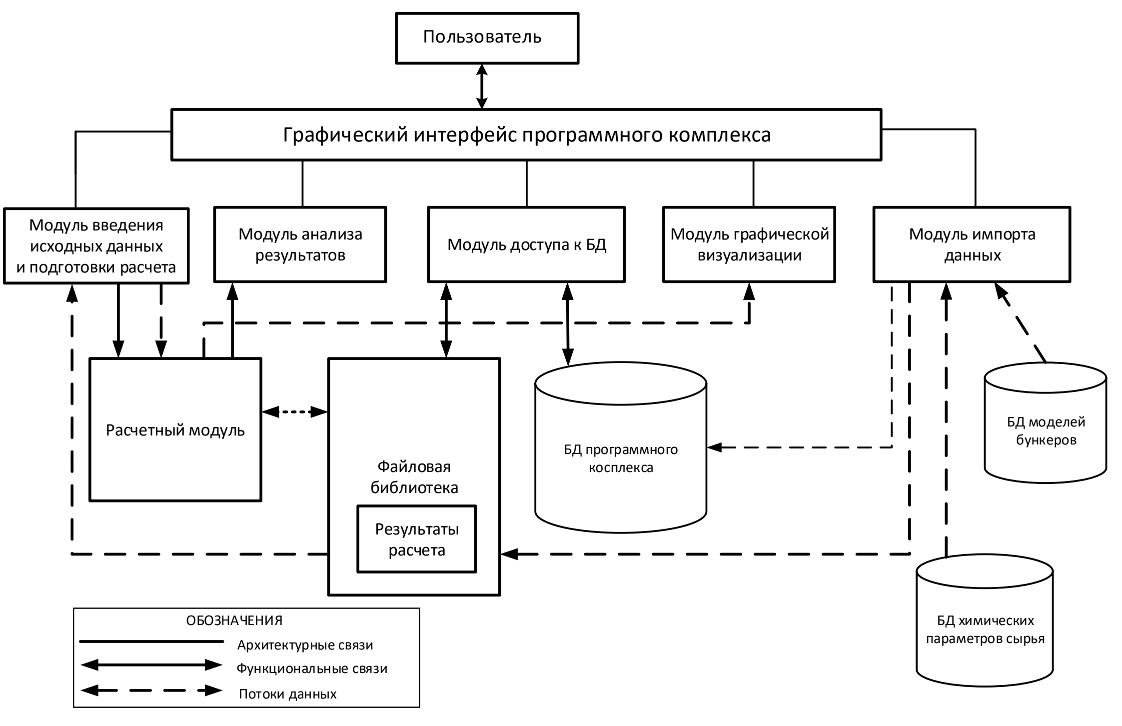

Рис. 3. Архитектура разработанного программного комплекса

Fig. 3. Architecture of the developed software package

Разработанный программный комплекс имеет в своем распоряжении многофункциональный графический интерфейс. С его помощью исследователь может задать основные параметры изучаемого объекта, а также указать метод засыпки сырья в бункер и интервал размеров элементов сырьевого материала. Расчет может осуществляться и без введения всех требуемых параметров, а только тех, которые либо известны пользователю, либо его интересуют. В этом случае система укажет, какие расчеты она может провести. В функции программного комплекса входят расчет химического состава и качества сырья в бункере запаса, определение параметров коррекции состава сырья, расчет ошибок дозирования и проверки соответствия формы дозатора поставленным задачам и целям оптимальной работы оборудования.

В составе программного комплекса размещена база существующих моделей бункеров запаса и основные параметры различных видов рудного сырья. При этом система позволяет пользователю самостоятельно дополнять существующую базу и вносить в нее свои расчеты. Для ввода первоначальных параметров рассчитываемой системы разработана специальная форма (http://www.swsys.ru/uploaded/image/2025-3/5.jpg).

При выборе пункта меню «Ввод данных» система позволяет задать первоначальные параметры самого бункера и параметры расположения сырья, которые в дальнейшем применяются для проведения необходимых расчетов. Часть данных пользователь вводит вручную, а часть из БД в соответствии с существующими технологическими параметрами дробильно-сортировочной установки. Кроме того, на основе существующей БД пользователь может задать химический состав рудного сырья. После чего следует зайти в меню «Расчет бункера» и выбрать необходимые варианты технологических расчетов. В результате система выдает нужные численные значения. Для проведения анализа состава первоначального сырья в программе существует специальный пункт меню «Анализ», который позволяет осуществить данную операцию и выдать рекомендации по возможному улучшению его состава. Для большей наглядности и возможности проведения научно-технического анализа программный комплекс формирует графическое представление полученных зависимостей. В систему встроены основные функциональные зависимости, характерные для рассмотрения особенностей работы бункеров запаса (http://www.swsys.ru/uploaded/image/2025-3/6.jpg).

Кроме того, в разработанном программном комплексе возможен сетевой обмен результатами расчетов различных пользователей по их желанию. Это позволит в дальнейшем сформировать общую научную систему исследований процесса функционирования и расчета бункеров запаса дозировочно-смесительных комплексов.

Заключение

Проверка адекватности представленной модели и программного комплекса осуществлялась на основе сопоставления натурных экспериментов и результатов вычислений разработанной программы. Натурные эксперименты проводились с использованием бункеров двух наиболее распространенных форм – конусообразной и пирамидальной. В качестве сыпучего материала использовался песок черного и белого цвета.

Результат работы бункера оценивался с точностью 0,5–1 % с помощью заранее подготовленных эталонов. Одновременно был произведен расчет состава материала с помощью разработанного программного комплекса. Отклонение экспериментальных и расчетных данных в конусообразном бункере составило не более 3 %, а в пирамидальном не превышало 5 %. Внедрение разработанной программной среды позволило, во-первых, снизить брак в составе дозировки сырья на 10,65 % при отсутствии модернизации технологического оборудования; во-вторых, осуществлять быструю модификацию сырья с целью улучшения качества производства; в-третьих, на основе данных прогноза корректировать настройки используемых дозаторов. Совместное применение данного программного комплекса и автоматизированных систем дозировки сырья помогло существенно ускорить необходимые расчеты при повышении достоверности получаемых результатов. Кроме того, уменьшены процент ручного труда, а также время внутрицикловых простоев оборудования, что позволяет сократить энергопотребление всего дозировочно-смесительного комплекса. Программный комплекс в дальнейшем может составить основу современных типовых АСУ ТП управления и оптимизации дозировочно-смесительных линий на базе существующей вычислительной техники.

Список литературы

1. Бобков В.И., Быков А.А., Орехов В.А., Незамаев С.В. Особенности теплотехнического расчета обжиговых и агломерационных машин для сырья фосфатных руд // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 3. С. 10–15. doi: 10.17513/snt.39939.
2. Tesser R., Santacesaria E. Revisiting the role of mass and heat transfer in Gas–Solid catalytic reactions. Processes, 2020, vol. 8, no. 12, art. 1599. doi: 10.3390/pr8121599.
3. Дли М.И., Пучков А.Ю., Прокимнов Н.Н., Окунев Б.В. Нечеткологическая модель многостадийной химико-энерготехнологической системы переработки мелкодисперсного рудного сырья // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 3. С. 92–104.
4. Антипина Е.В., Мустафина С.А., Антипин А.Ф. Программная реализация алгоритма поиска оптимального температурного режима каталитического процесса // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 1. С. 106–112. doi: 10.15827/0236-235X.137.106-112.
5. Пучков А.Ю., Панченко С.В., Черновалова М.В. Программа моделирования теплофизических процессов в руднотермических печах при изменении управляющих воздействий // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 3. С. 523–529. doi: 10.15827/0236-235X.131.523-529.
6. 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. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-5-62-76.
7. Pedro A.A. Thermal monitoring of the electrode and bath in an ore-roasting furnace during downtime. Steel in Translation, 2013, vol. 43, pp. 110–112. doi: 10.3103/S0967091213020149.
8. Tian H., Pan J., Zhu D., Wang D. et al. Utilization of ground sinter feed for oxidized pellet production and its effect on pellet consolidation and metallurgical properties. In: MMMS. Proc. Int. Symposium on High-Temperature Metallurgical, 2020, pp. 857–866. doi: 10.1007/978-3-030-36540-0_76.
9. Бобков В.И., Быков А.А., Незамаев С.В. Анализ технологических показателей переработки фосфоритовой руды для электровозгонки жёлтого фосфора // Успехи современного естествознания. 2024. № 3. С. 100–107. doi: 10.17513/use.38236.
10. Иващук О.Д., Нестерова Е.В., Игрунова С.В. и др. Автоматизация оценивания эффективности усреднения товарного концентрата руды // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 10. С. 39–44.
11. Лопатина Т.Д., Тихонов М.Р., Чудинова М.А. Сравнительный анализ методов управления временем для целей автоматизации технологических процессов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технич. науки. 2023. № 4. С. 82–85.
12. Борисов В.В., Курилин С.П., Луферов В.С. Нечеткие реляционные когнитивные темпоральные модели для анализа и прогнозирования состояния сложных технических систем // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1. С. 27–38.

Software & Systems doi: 10.15827/0236-235X.151.542-550 2025, 38(3), pp. 542–550

A mathematical model for ore composition forecasting system: Software implementation

Aleksander A. Bykov [1]✉, Vladimir I. Bobkov [1], Vladimir A. Orekhov [1], Sergey V. Nezamaev [2]

[1] National Research University "MEI" in Smolensk, Smolensk, 214013, Russian Federation
[2] JSC "First Mining Company", Moscow, 109004, Russian Federation

For citation
Bykov, A.A., Bobkov, V.I., Orekhov, V.A., Nezamaev, S.V. (2025) 'A mathematical model for ore composition forecasting system: Software implementation', *Software & Systems*, 38(3), pp. 542–550 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.151.542-550
Article info
Received: 22.10.2024 After revision: 15.11.2024 Accepted: 16.01.2025

Abstract. The paper presents a mathematical model for predicting potential ore composition variations in stockpile bins. It solves the task of automated raw material feeding to the sintering machine's batching and mixing system. The developed system ensures delivery of proper burden materials without preanalysis from chemical laboratories at mining and processing facilities. The model is based on a stock hopper configuration that is considered as a set of computational cells occupied by ore material. Authors selected the cell dimensions to optimize dosing accuracy, minimize approximation errors, reduce computation time, and conserve computer memory. This method of bin representation enables dynamic material flow simulation for diverse bin designs. Thus, the model provides an opportunity to create and conduct research on experimental installations of batching and mixing complexes. The mathematical model describes both the simplest interaction of material particles during their movement in the reserve hopper. If necessary, it takes into account their more complex force interactions, which makes the model optimal for any type of ore raw materials. Based on this model, the authors developed an algorithm for a digital automation system to compute the studied parameters. The automation program is implemented using the C++ programming language and the cross-platform Visual Studio Code editor. Therefolre the developed software system can operate in any operating system. The authors conducted both physical experiments and computational simulations to verify the proposed method. The results demonstrate strong agreement with conventional ore composition calculation methods.

Keywords: mathematical model, computational element, software package, automated control systems, numerical methods, stockpile bin, ore raw materials, computer modeling

Acknowledgements. The study was completed in terms of the state assignment, project no. FSWF-2023-0012

References

1. Bobkov, V.I., Bykov, A.A., Orekhov, V.A., Nezamaeva, S.V. (2024) 'Features of thermal engineering calculation of roasting and sintering machines for raw materials of phosphate ores', *Modern High Tech.*, (3), pp. 10–15 (in Russ.). doi: 10.17513/snt.39939.

2. Tesser, R., Santacesaria, E. (2020) 'Revisiting the role of mass and heat transfer in Gas–Solid catalytic reactions', *Processes*, 8(12), art. 1599. doi: 10.3390/pr8121599.

3. Dli, M.I., Puchkov, A.Yu., Prokimnov, N.N., Okunev, B.V. (2023) 'A fuzzy logical model of a multistage chemical and energy technological system for processing fine ore raw materials', *Applied Inform.*,18(3), pp. 92–104 (in Russ.).

4. Antipina, E.V., Mustafina, S.A., Antipin, A.F. (2022) 'Software implementation of the algorithm for finding the optimal temperature condition of the catalytic process', *Software & Systems*, 35(1), pp. 106–112 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.137.106-112.

5. Puchkov, A.Yu., Panchenko, S.V., Chernovalova, M.V. (2020) 'The simulation program for thermophysical processes in ore-thermal furnaces when changing the control actions', *Software & Systems*, 33(3), pp. 523–529 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.131.523-529.

6. Puchkov, A.Yu., Sokolov, A.M., Fedotov, V.V. (2022) 'Neural network method for analyzing the processes of heat treatment of pelletized phosphate ore raw materials', *Applied Informatics*, 17(5), pp. 62–76 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-5-62-76.

7. Pedro, A.A. (2013) 'Thermal monitoring of the electrode and bath in an ore-roasting furnace during downtime', *Steel in Translatio*n, 43, pp. 110–112. doi: 10.3103/S0967091213020149.

8. Tian, H., Pan, J., Zhu, D., Wang, D. et al. (2020) 'Utilization of ground sinter feed for oxidized pellet production and its effect on pellet consolidation and metallurgical properties', *In*: *MMMS. Proc. Int. Symposium on High-Temperature Metallurgical*, pp. 857–866. doi: 10.1007/978-3-030-36540-0_76.

9. Bobkov, V.I., Bykov, A.A., Nezamaev, S.V. (2024) 'Analysis of technological indicators of processing phosphorite ore for electric distillation of yellow phosphorus', *Successes of Modern Natural Science*, (3), pp. 100–107 (in Russ.). doi: 10.17513/use.38236.

10. Ivashchuk, O.D., Nesterova, E.V., Igrunova, S.V. et al. (2023) 'Automation of evaluating the effectiveness of averaging commercial ore concentrate', *Modern High Technologies*, (10), pp. 39–44 (in Russ.).

11. Lopatina, T.D., Tikhonov, M.R., Chudinova, M.A. (2023) 'Comparative analysis of time management methods for the purposes of process automation', *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Ser.: Natural and Tech. Sci.*, (4), pp. 82–85.

12. Borisov, V.V., Kurilin, S.P., Luferov, V.S. (2022) 'Fuzzy relational cognitive temporal models for analyzing and state prediction of complex technical systems', *J. of Applied Informatics*, 17(1), pp. 27–38 (in Russ.).

Авторы

Быков Александр Александрович [1], к.п.н, доцент, alex1by@mail.ru

Бобков Владимир Иванович [1], д.т.н, доцент, профессор, vovabobkoff@mail.ru

Орехов Владимир Александрович [1], к.т.н., старший преподаватель, fundukoff@mail.ru

Незамаев Сергей Владимирович [2], генеральный директор, pgrk@armz.ru

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, 214013, Россия

[2] АО «Первая горнорудная компания», г. Москва, 109004, Россия

Authors

Aleksander A. Bykov [1], Cand. of Sci. (Education), Associate Professor, alex1by@mail.ru

Vladimir I. Bobkov [1], Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor, vovabobkoff@mail.ru

Vladimir A. Orekhov [1], Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer, fundukoff@mail.ru

Sergey V. Nezamaev [2], Director General, pgrk@armz.ru

[1] National Research University "MEI" in Smolensk, Smolensk, 214013, Russian Federation

[2] JSC "First Mining Company", Moscow, 109004, Russian Federation