

УДК 004.942
МРНТИ 50.47.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-1-59-73>

¹Зарубин М.Ю.,

к.т.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-1415-5244,
e-mail: zarubin_mu@mail.ru

¹Исмаилов А.О.,

к.т.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: 0009-0000-5432-3364,
e-mail: rector@kineu.kz

^{1*}Зарубина В.Р.,

к.э.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-1376-9172,
*e-mail: zarubina_v@mail.ru

²Ыбытаева Г.С.,

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-4243-0928
e-mail: ybytayeva.galiya@gmail.com

³Есенкулова Ж.Ж.,

к.с.-х.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0003-2377-639X,
e-mail: zhauhar-kz@bk.ru

¹Костанайский инженерно-экономический университет им. М. Дулатова,
г. Костанай, Казахстан

²Международная образовательная корпорация, г. Алматы, Казахстан

³Университет Нархоз, г. Алматы, Казахстан

К ВОПРОСУ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СУШКИ КОНЦЕНТРАТА

Аннотация

В условиях обостряющихся экологических проблем планеты и продолжающегося усугубляться глобального энергетического кризиса возрастает роль оптимизирующих систем, в том числе и за счет снижения энергопотребления производства и, как следствие, уменьшения углеродной нагрузки. Актуальной данной проблема является и для одного из флагманов экономики Казахстана – горно-обогатительного сектора. Целью заявленного исследования является изучение возможности оптимизации одного из самых энергоемких этапов обогатительного передела руд черных металлов – сушки концентрата. В связи с экономическими аспектами исследование проведено на разработанных авторами цифровых имитационных моделях процесса сушки железорудного концентрата в сушильных барабанах БСА 3.5-27 в среде визуального моделирования Matlab. Авторами по результатам проведенных теоретических изысканий и натурных экспериментов построена модель исследуемого объекта с существующими системами автоматизации, предложена адаптивная оптимизирующая система управления технологическим процессом на основе нейронной сети радиально базисных функций. В качестве критерия управления для технологического процесса выбрано значение потребления газа для получения сушильного агента. По результатам сравнения работы цифровых моделей исходной исследуемой системы сушки концентрата и системы с адаптивным управлением оценено качество управления. Полученные результаты могут быть применены для модернизации систем управления процессов сушки обогатительных комплексов как железорудных ГОКов, так и других полезных ископаемых, используемых схожие технологии.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, нейронная сеть, оптимизация, адаптивное управление, сушка, снижение углеродной нагрузки.

Введение

Современные процессы обогащения руд металлов в большинстве своем протекают в жидких средах (воде, кислотах или щелочах). С учетом климата Казахстана в зимний период такие технологии порождают проблемы с транспортированием обогащенного концентрата. Например, измельченный и обогащенный концентрат при минусовых температурах смерзается и примерзает к бортам вагонов [1].

Другая проблема транспортировки, менее свойственная Казахстану, но также характерная для горно-обогатительной промышленности, заключается в том, что перед отправкой морским транспортом обогащенная руда должна соответствовать максимальному уровню влажности, установленному Международной морской организацией (ИМО) для безопасной перевозки сыпучих материалов на судах, известному как транспортируемый предел влажности (TML) [2, 3].

Поэтому все обогатительные предприятия холодных климатических зон или транспортирующие обогащенный промпродукт морским транспортом вынуждены нести дополнительные затраты, вызванные процессами обезвоживания концентрата (а зачастую в зимний период и его сушки), с целью исключения или минимизации рисков разжижения концентрата при перевозке морем или смерзания промпродукта (концентрата) при транспортировке в период отрицательных температур [4].

С учетом энергозатрат сушки качество оптимизации управления техпроцессом начинает играть значимую роль как в себестоимости получаемого конечного промпродукта, так и в энергозатратах предприятия, требующих резервирования дополнительных квот. Изменение же технологий обогащения или сушки с переходом на инновационные, более совершенные решения для многих предприятий практически нереализуемо по множеству причин, начиная от проработанности этих инновационных технологий, заканчивая неподъемностью трат на модернизацию. Поэтому, несмотря на предысторию исследований и вроде бы найденные «оптимальные» решения, раз за разом происходит возврат к вопросу модернизации (или развития) оптимизации управления техпроцессами обогатительного передела в общем и техпроцессами обезвоживания и сушки в частности [5, 6].

Объектом представляемого в статье исследования является барабанный сушильный агрегат (БСА) БС 3.5-27 с тарельчатыми (дисковыми) питателями ДТ-20 и газовоздушным калорифером ГВК-10), применяемый на большинстве обогатительных фабрик, например, на фабрике сушки АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» [7]. Сушка концентрата осуществляется в таких сушильных барабанах топочными газами, получаемыми в процессе сгорания природного газа в газовоздушных калориферах (что дополнительно приводит предприятия к необходимости приобретения квот на выбросы CO₂).

Предметом исследования является нейросетевой регулятор для оптимизации управления технологическим процессом сушки железорудного концентрата по параметрам энергопотребления. Точнее, на данном этапе исследования предметом является цифровая компьютерная имитация объекта и модернизируемой нейросетевой системы управления в связи с коммерческой недоступностью для авторов проведения натурных экспериментов.

Проведенный анализ технологических процессов сушки на обогатительных фабриках Казахстана (да и стран Евразийско-Азиатского экономического союза) позволяет говорить о типовой, разработанной еще (как и применяемое оборудование) в советский период схеме сушки, построенной на применении барабанных сушильных агрегатов БСА. Автоматизация техпроцесса (ТП) построена по классической трехуровневой схеме, где нижний уровень реализует стабилизацию теплового и аэродинамического режимов, средний уровень не реализован вообще, а верхний уровень сводится к применению систем диспетчерского управления [8].

Оптимизация на втором уровне техпроцесса сушки до сих пор широкомасштабно не применяется. Такое состояние на удивление сохраняется, несмотря и на заложенные в автоматику

PLC нижнего уровня возможности наращивания и иерархического развития, и, в общем-то, на сведенные для третьего уровня ERP-систем данные техпроцессов.

С учетом большого количества потенциально влияющих на техпроцесс факторов и отсутствия исследований по формализации зависимостей исследуемого техпроцесса от влияния этих факторов (и, естественно, взаимовлияния) авторами в работе предпринята попытка развить исследования применения PLC в оптимизации сушки на новом уровне с применением аппарата искусственных нейронных сетей, способных работать как с большим количеством входных параметров, так и выявлять в процессе настройки (обучения) скрытые зависимости.

Для этого авторами в статье выставлена гипотеза о возможности построения эффективной системы управления с оптимизацией техпроцесса сушки на основе нейрорегулятора без проведения формализации влияния вектора входных (управляющих и возмущающих) параметров на параметр энергопотребления (с сохранением критериев качества сушки).

В рамках задач при доказательстве гипотезы

- ♦ построена компьютерная цифровая модель техпроцесса сушки железорудного концентрата и доказана ее адекватность реальному техпроцессу в рамках исследуемой задачи;
- ♦ построен оптимизирующий техпроцесс сушки нейрорегулятор на различных архитектурах нейросетей и на основе реализованных его цифровых моделей оценены параметры эффективности оптимизации управления по параметру энергоэффективности (точнее, снижения объемов потребления природного газа).

Обзор литературы

В связи с более мягким зимним периодом для большинства англоязычных стран проблема сушки концентрата так остро не стоит. Предприятиям в большинстве своем достаточной является схема обезвоживания до влажности 7–10%. Наиболее часто оказываются востребованными операции обезвоживания [9]. Дополнительная сушка концентрата не востребована и не осуществляется.

Повышение эффективности сушки инновационными методами предполагается в большей степени изменением технологической схемы – внесением СВЧ нагреванием концентрата [10]. Реже предлагаются схемы классической автоматизации второго уровня на основе ПИ и ПИД-регуляторов [11,12], в ряде работ [13, 14] предлагаются решения, построенные на нечеткой логике.

Анализ советской научной литературы по техпроцессу сушки концентрата [15–18] выявил интересный аспект: уже в 80-е годы XX века были успешно разработаны и реализованы программно-аппаратные решения для системы управления второго уровня иерархии. Эти разработки были испытаны в результате ряда натурных экспериментов и продемонстрировали эффективность предложенных тогда решений на ряде фабрик: производственного объединения «Апатит», Сысертского асбестоуправления комбината «Ураласбест», объединения «Борошиловградуглеобогащение» и «Тоолсеский» [16–18].

Согласно [16] внедрение тех разработок сделало возможным значительное сокращение затрат (снижение затрат по одному агрегату в современном эквиваленте достигало 33,6 тысячи долларов США в год).

Анализ литературы по техпроцессу сушки концентрата позволил утверждать, что

- ♦ протекающие процессы в сушильных агрегатах достаточно полно изучены;
- ♦ имеются формализованные характеристики сушильных барабанов как объектов управления,
- ♦ сформулированы критерии управления сушкой в виде экстремальной задачи управления и данная задача математически решена;
- ♦ приближенные решения задачи реализованы на базе ЭВМ серии СМ-2М (советский аналог IBM 360), прошли опытную эксплуатацию на ряде действующих фабрик и доказали свою экономическую эффективность.

Однако, учитывая развитие как аппаратной базы, так и алгоритмических решений почти за 45 лет, можно сделать предположение о высоком потенциале оптимизации сушки на современных цифровых платформах (если даже простейший перенос тех решений способен значительно увеличить рентабельность сушки).

Следует отметить как значимый фактор и потерю по истечении срока действия охранной силы выданных патентов и авторских свидетельств.

Следует отметить и существенный качественный скачок в развитии цифровой инфраструктуры техпроцесса – как вычислительных возможностей промышленных контроллеров, так и используемых алгоритмов обработки информации и принятия решений. В цифровые решения активно внедряются методы искусственного интеллекта, основанные на алгоритмах имитации отжига (SA), эволюционного моделирования (ЕМ), например, генетических алгоритмах (GA) и, само собой, на основе нейросетевых решений (в том числе и NPU).

Наличие перспектив оптимизации управления техпроцессом сушки и потенциальные возможности цифровых контроллеров позволяют говорить об актуальности возобновления исследований по оптимизации сушки концентрата и снижению воздействия на экологию планеты.

Накопленный существенный мировой опыт и авторский задел по применению управления на основе искусственного интеллекта позволили предположить перспективность поиска решения поставленной задачи на основе нейрорегуляторов (или систем с их элементами) [19].

Материалы и методы

Получение разгонных характеристик оборудования осуществлено методами натурального эксперимента путем съема данных с работающего фабричного оборудования как реакция на единичное ступенчатое воздействие.

Получение теплофизических характеристик железорудного концентрата проведено методом смешения с использованием адиабатического калориметра. Материалом выступал спрессованный влажный (с влажностью 9.8%) концентрат. Теплофизические характеристики моделируемых в исследовании газов взяты из справочной литературы.

Построение математических и цифровых моделей объекта и системы проведено на основе анализа научной и технической литературы, обработки данных натурных экспериментов, аппроксимации, методов обучения нейронных сетей.

В качестве аппроксимирующих методов использованы методы кусочно-линейной интерполяции, многочлена Лагранжа, С-сплайна, сплайна Акимы. В качестве нейросетевых – метод на основе нейросети радиально базисной функции.

Аппроксимация и моделирование произведены на нормализованных и приведенных к равномерной сетке данных протоколов работы оборудования.

При исследовании свойств моделируемых систем применены методы теории автоматического управления, такие как исследование динамических характеристик системы с помощью преобразований Лапласа.

Результаты и обсуждение

Анализ технологических схем горно-обогатительных предприятий исследуемого пространства позволяет говорить как о достаточно ограниченном спектре используемого оборудования, так и о высокой степени типизированности техпроцессов сушки. В упрощенном виде мнемосхема наиболее часто встречающегося при анализе предприятий техпроцесса с уже имеющимися АСУ для сушки железорудного концентрата может быть представлена рисунком 1 (в РК, например, такие схемы нашли применение в АО «ССГПО» и ТОО «Оркен»).

Для доказательства гипотезы и проведения машинного исследования произведена формализация математических моделей технологического процесса сушки и построенных на их основе цифровых имитационных моделей.

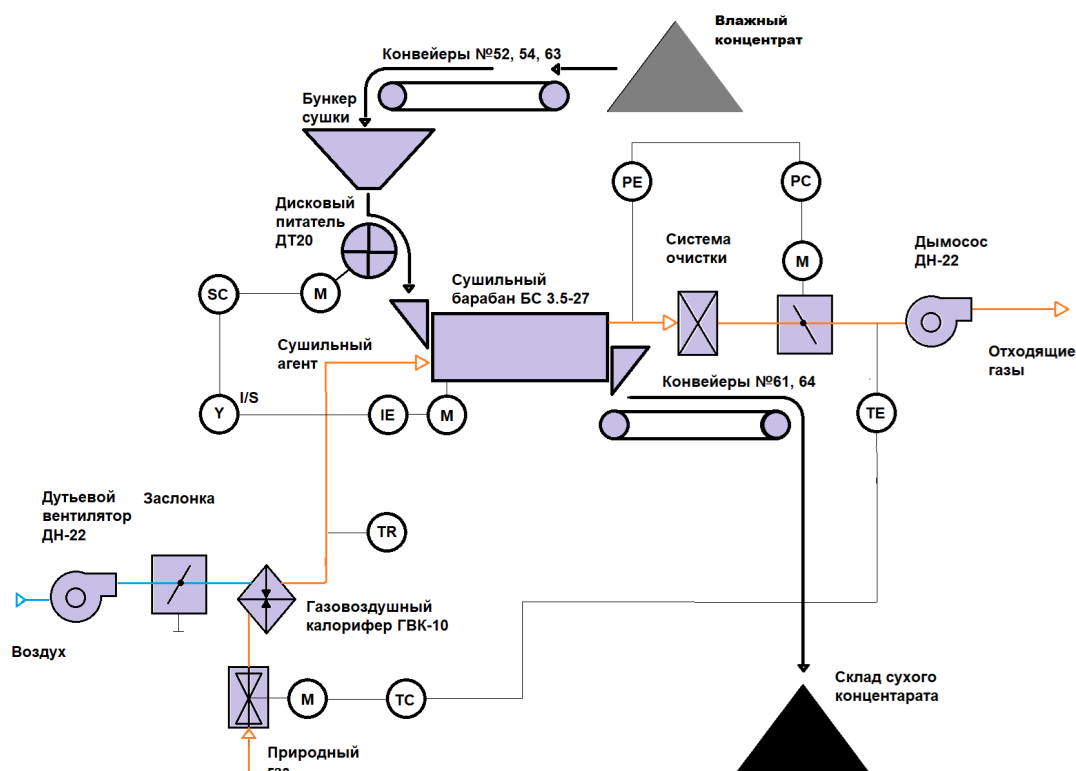


Рисунок 1 – Схема типового техпроцесса сушки концентрата

Для построения математических зависимостей авторами проведено исследование разгонных характеристик подбъектов управления. Графики переходных процессов САР разряжения, температуры отходящих газов, стабилизации соотношения «газ/воздух» представлены на рисунке 2.

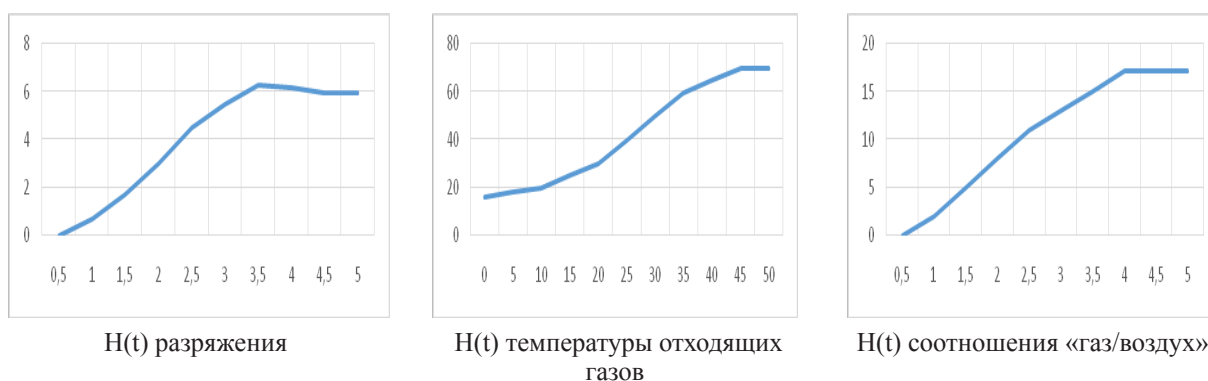


Рисунок 2 – Графики снятых разгонных характеристик

Помимо объектов (сушильного барабана, газовоздушного калорифера и дискового питателя) для модели исследованы три системы автоматической стабилизации параметров процесса (системы стабилизации скорости питателя, стабилизации разряжения в барабане и стабилизации температуры отходящих газов на выходе барабана) и системы ручного управления соотношением «газ/воздух».

Оптимизация управления техпроцессом сушки в исследовании произведена в настоящий момент только по одному выходному параметру – исследованию возможности снижения расхода природного газа за счет регулирования соотношения «газ/воздух» как реакции на возмущающее воздействие (изменения состава природного газа). Другие однопараметриальные системы оптимизирующего управления могут быть построены по аналогии с исследуемой.

При исследовании выявлено, что основное влияние на техпроцесс при изменении состава природного газа и, как следствие, соотношения «газ/воздух» происходит в газозвдушном калорифере ГВК-10 и влияет на температуру и объем образуемого сушильного агента. При этом технологическая карта требует стабилизации параметра температуры сушильного агента ТСА. Формализованные закономерности математических функций процесса сушки по выбранному критерию оптимизации могут быть представлены зависимостями как на рисунке 3.

Функции переменных VCA и TCA являются многопараметриальными и носят нелинейный характер. Формализация таких зависимостей кроме математических сложностей еще и достаточно трудоемка – требует огромного практически сложно реализуемого по технологическим ограничениям объема натурных исследований. Обычно недостающие значения вычисляют различными методами аппроксимации [20].

В исследовании аппроксимация зависимостей VCA и TCA произведена по нормализованным данным протоколов работы фабрики сушки АО «ССГПО». Для аппроксимации реализованы и исследованы типовые алгоритмы интерполяции с помощью методов кусочно-линейной интерполяции, многочлена Лагранжа, С-сплайна, сплайна Акимы.

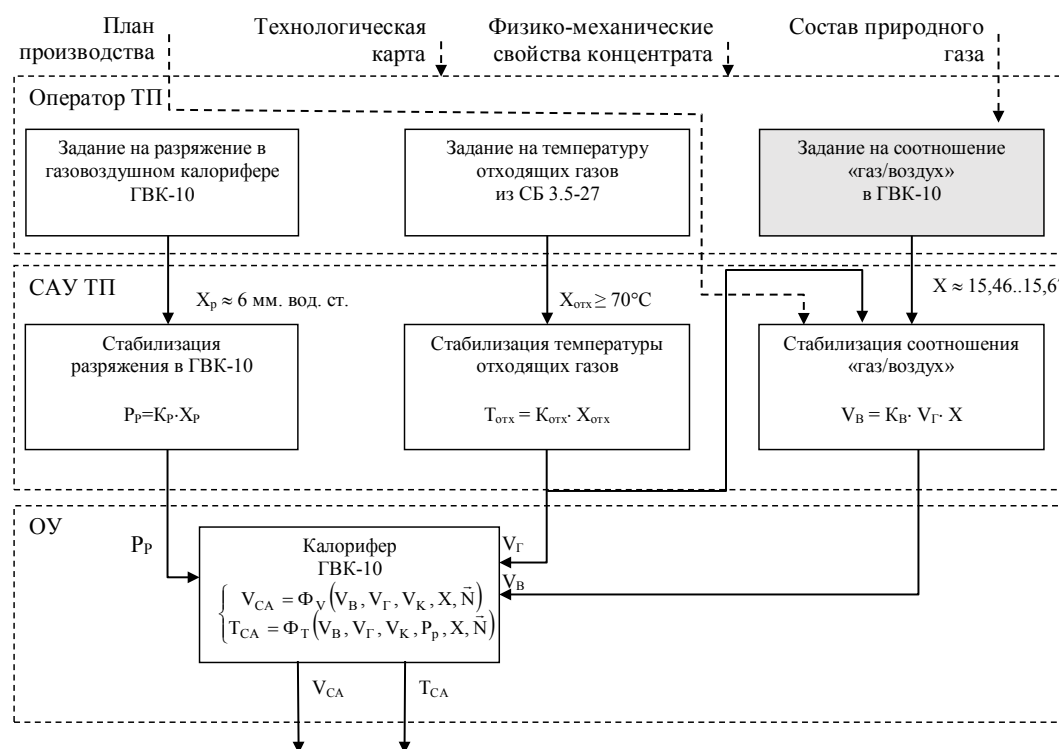


Рисунок 3 – Математическая модель системы сушки с управлением по параметру соотношения «газ/воздух»

Хотя для нейронных сетей в задачах аппроксимации также могут быть использованы различные конфигурации (например, сети прямого и обратного распространения ошибки, сети радиального базиса или спроектированы собственные архитектуры [22]), в представленном исследовании сравнение производилось только с аппроксимацией сетями радиального базиса (RBF NN).

Таблица 1 – Время выполнения интерполяции модели, секунды

Алгоритм интерполяции	Время интерполяции, секунды
Кусочно-линейная интерполяция	0,27
Многочлен Лагранжа	1,69
Кубический сплайн	0,53
Сплайн Акимы	0,43
Нейросеть RBF NN	1,11

Исследование скорости алгоритмов интерполяции данных выполнено на компьютере на базе процессора Intel Core i3-5005U с частотой 2GHz и объемом ОЗУ 4GB.

Цифровая модель технологического процесса сушки концентрата (точнее, ее подсистемы генерации сушильного агента с заданными параметрами температуры ТСА получаемого сушильного агента) построена в toolbox Simulink пакета Matlab и представлена на рисунке 4.

На данном этапе введено упрощение – исследуется подача условного двухкомпонентного газа как смеси метана (CH_4) и пропана (C_3H_8). Возмущающим фактором для систем управления взято изменение соотношения этих газов.

В качестве Matlab-функций использованы внутренние для системы «Dryer drum» сгенерированные функции интерполяции V_m и T_m . Функция ТСА вычислена по уравнению теплового баланса. Также по уравнению теплового баланса вычислена внутренняя функция объема выделяемой энергии $GapG$ (из подсистемы «Dryer drum» как параметр $GapG$ для отображения не выведен). Функция получения объема сушильного агента VCA вычислена из химической формулы горения би-газа в атмосфере воздуха (с учетом условия соотношения «газ/воздух»).

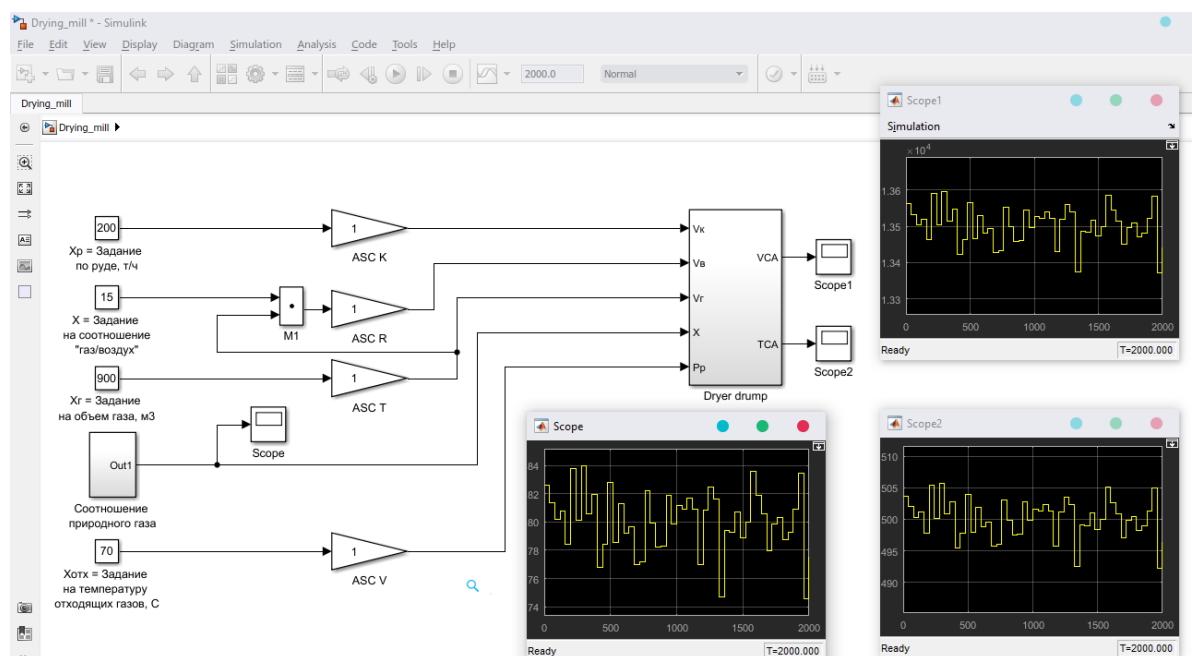


Рисунок 4 – Модель техпроцесса сушки (без системы 2 уровня)

Полученные при моделировании значения температура ТСА сушильного агента с достаточной степенью совпадают с получаемыми на реальном оборудовании и лежат в интервале 480...520 °C.

Объемы полученного сушильного агента VCA и объемы выделяемой энергии приблизительно соответствуют заявленным паспортным параметрам используемой модели газовоздушного калорифера и условиям технологического процесса при схожих параметрах природного газа.

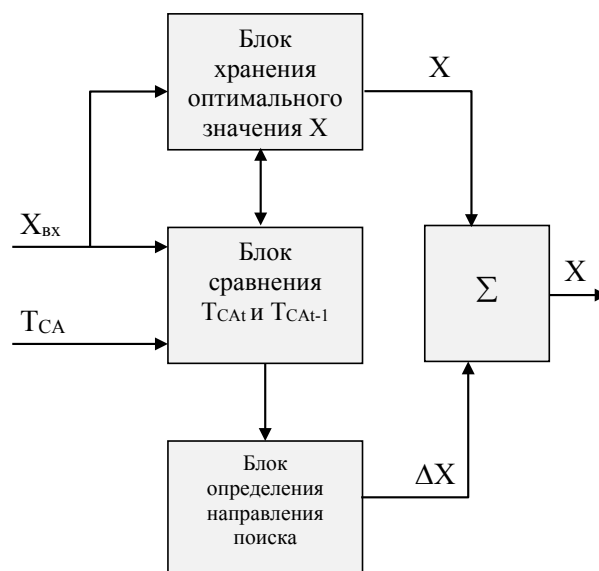
Совпадение результатов натурного и модельного экспериментов позволяет говорить об адекватности полученной модели техпроцессу в рамках исследуемой задачи.

Моделирование проведено для интервала в 2000 итераций, шаг модельного времени выбран равным 1 минуте (для того, чтобы в дальнейшем исключить переходных процессов из-за влияния ACS).

Для второго исследовательского вопроса – решения задачи управления процессом сушки при поиске оптимального соотношения «газ/воздух» – за основу разрабатываемой системы нейросетевого управления (ACS) предложено взять адаптивную систему [20]. В выбранной за основу ACS произведена модификация структуры для возможности решения поставленной задачи. Структурная схема модернизированной системы на основе нейрорегулятора с самонастройкой по параметру на оптимальное соотношение «газ/воздух» представлена на рисунке 5.

Модель ACS построена как набор пользовательских Matlab-функций. Блок хранения оптимальных значений при проведении исследований построен на нейросети радиально-базисной функции RBE NN (в дальнейшем для поиска оптимального решения авторами предполагается расширение исследований с изучением возможности применения других архитектур нейронных сетей).

Понятно, что представленная в цифровой модели схема нейросетевого регулятора ACS будет работоспособна в реальной системе только в случаях, когда время переходных процессов в ГВК-10 и ACS будет много меньше времени значимого изменения входных параметров. Но так как соотношения газов является достаточно стабильной величиной и меняется не чаще нескольких раз в день (а зачастую и реже), а время переходного процесса в газовоздушном калорифере составляет порядка 30–40 секунд (согласно разгонной характеристике), то можно утверждать о работоспособности и применимости для техпроцесса разработанного нейрорегулятора.



где $X_{вх}$ задание соотношения «газ/воздух»;
 T – температура получаемого сушильного агента;
 X – оптимизированное соотношение «газ/воздух»).

Рисунок 5 – Структура нейрорегулятора для техпроцесса сушки концентрата

Для сохранения идентичности в дальнейшем при сравнении моделей процесса сушки с ручным управлением и с ACS все блоки за исключением самой подсистемы ASC идентичны предыдущей полученной модели (модели с ручным управлением).

В будущем для повышения эффективности и быстродействия ASC блок определения направления поиска также желательно реализовать на алгоритмах с изменяемой величиной DX – использовать более быстрые методы поиска экстремумов в пространстве больших данных [22].

Доказательство выставленной гипотезы об эффективности применения для техпроцесса сушки нейросетевого регулятора осуществлено на основе анализа результатов сравнения данных машинного эксперимента для моделей техпроцесса сушки с ручным и нейросетевым управлением.

Для возможности корректного сравнения результатов модельного эксперимента обе модели помещены в идентичные условия – на один модельный лист Simulink (рисунок 6). Модели систем в эксперименте функционируют в пространстве как одинаковых исходных данных, так и продвижения модельного времени.

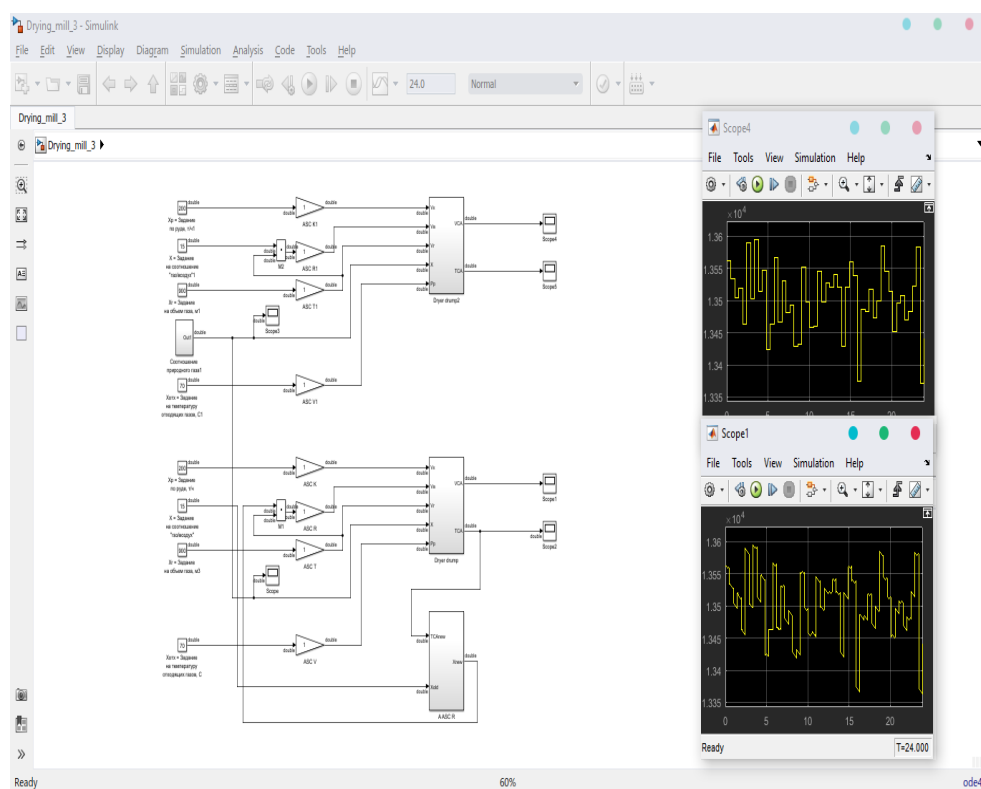


Рисунок 6 – Модельный лист для сравнительного анализа систем

ASC в 50% случаев «угадывает» правильное направление уточнения X. Однако при «промахе» поиск на следующем шаге все равно разворачивается в нужную сторону. А так как время реакции ASC намного меньше времени изменения возмущающих параметров, то нейрорегулятор успевает приблизить соотношение «газ/воздух» к оптимальному.

Укрупненный вариант диаграмм расхода газа при применении ручного и нейросетевого управления техпроцессом приведен на рисунке 8.

При достижении оптимума ASC продолжает сохранять направление поиска. Как следствие, на следующем шаге система «проскакивает» оптимум и, согласно используемому алгоритму, меняет знак (направление) поиска. При повторном «проскоке» действие повторяется. Это и объясняет «пилу» на диаграммах рисунка 7.

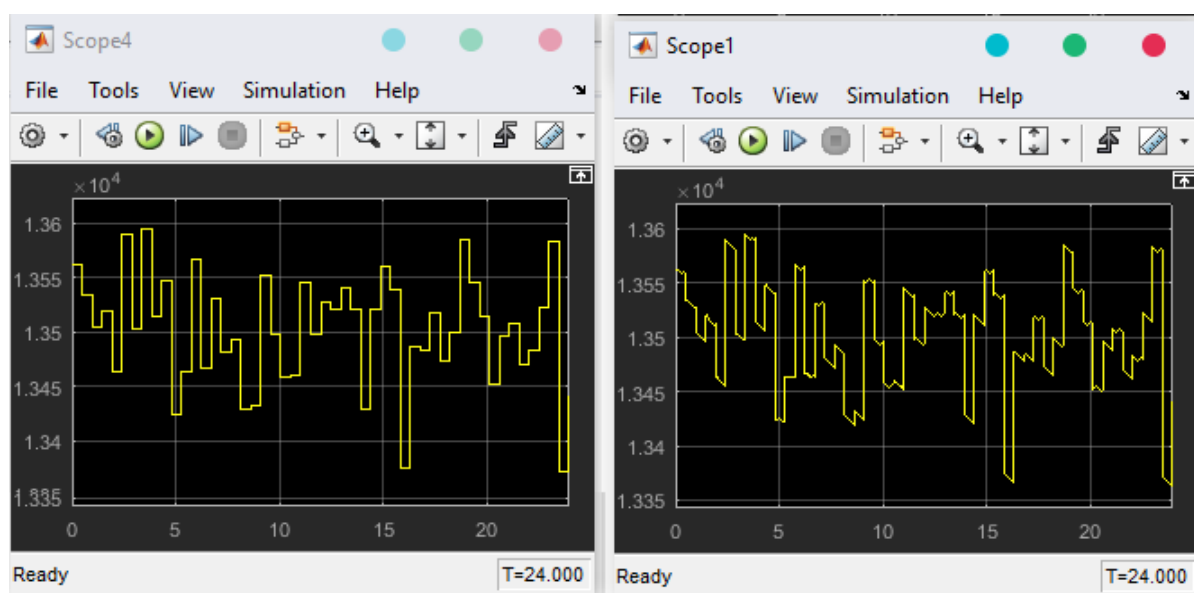
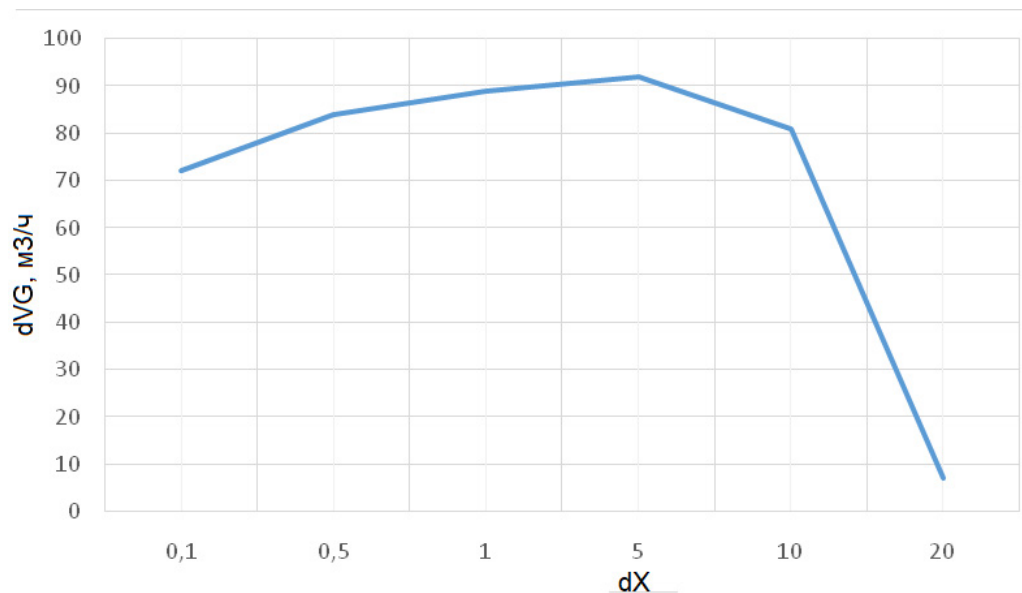


Рисунок 7 – Фрагменты диаграмм расхода газа без и с оптимизацией

Увеличение же DX (рисунок 8) до значений, сопоставимых с временем изменения возмущающих параметров системы, приводит к падению эффективности оптимизации техпро-



цесса.

Рисунок 8 – График экономии природного газа в зависимости от шага приращения блока определения направления поиска

При исследуемых характеристиках техпроцесса (точнее, модели, т.к. упрощения модели могут достаточно сильно влиять на скорость сходимости системы) оптимальным является приращение dVG в интервале [0.5; 5].

Заключение

Построенная в среде Matlab Simulink компьютерная цифровая модель техпроцесса сушки железорудного концентрата адекватна реальному техпроцессу в рамках поставленной задачи, результаты моделирования совпадают с необходимой точностью с данными протоколов работы реального оборудования фабрики сушки.

Оптимизация техпроцесса сушки осуществлена с помощью авторской схемы адаптивного регулятора на нейросетевой архитектуре. На основе его цифровых моделей оценены параметры эффективности оптимизации управления по параметру энергоэффективности (точнее, снижения объемов потребления природного газа).

По результатам проведенного исследования можно утверждать, что гипотеза о возможности построения эффективной системы управления с оптимизацией техпроцесса сушки на основе нейрорегулятора без проведения формализации влияния вектора входных (управляющих и возмущающих) параметров на параметр энергопотребления (с сохранением критериев качества сушки) верна. В используемом техпроцессе возможно обеспечить снижение затрат природного газа не менее чем на 100 м³ в сутки только на одном сушильном агрегате.

Таким образом, полученные нами модели как техпроцесса, так и адаптивной системы управления могут служить адекватным инструментом для дальнейшего изучения и прогнозирования поведения техпроцесса в различных условиях. Результаты исследования могут быть полезны для оптимизации работы оборудования как с позиции снижения себестоимости техпроцесса, так и обеспечения шагов по достижению политики углеродной нейтральности.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Об утверждении Правил перевозок грузов железнодорожным транспортом. Приказ министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 2 августа 2019 года № 612. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 2 августа 2019 года № 19188. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900019188>.
- 2 Munro M. and Mohajerani A. – Marine Structures. – 2014. – V. 40. – PP. 193–224. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.11.004>.
- 3 International Maritime Organization (IMO). Amendments (05-19) to the International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC) Code (on 1 January 2021) (MSC101/24Add.3)/ – 2019. – London. <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/CargoesInBulk-default.aspx>.
- 4 Isaenko G.E., Mikhailov V.G., Meshcheryakov N.S., Goryachko O.V. and Makavetskas A.R. Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific // Technical and Economic Information. – 2023. – V. 79. – No. 3. – PP. 200–206. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2023-3-200-206>.
- 5 Ljung A.L., Lundström T., Marjavaara B. and Tano K. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. – V. 54. – No.17-18. – PP. 3882–3890. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.040>.
- 6 Sharma R. and Nimaje D. Drying Technology. – 2021. – V. 39. – PP. 1–10. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1863423>.
- 7 Технологическая инструкция АО «ССГПО». – ERG, 2020. – 56 с.
- 8 Khramov A.N. and Subbotin M.Y. Bulletin of ZabSU. – 2019. – V. 8. <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-svoystv-rudnyh-konsentratov-vliyayushchie-na-vybor-konstruktsii-barabannyh-sushilok>.
- 9 Patra A.S., Makhija D., Mukherjee A.K., Tiwari R., Sahoo C.R. and Mohanty B. Powder Technology. – 2016. – V. 287. – PP. 43–50. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.powtec.2015.09.030>.
- 10 Ogunniran O., Binner E., Sklavounos A. Robinson J.P. Enhancing evaporative mass transfer and steam stripping using microwave heating // Chemical Engineering Science. – 2017. – V. 165. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.03.003>.

- 11 Souza A.S., de Souza Pinto T.C., Sarkis A.M., de Pádua T.F. and Béttega R. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. – 2023. – V. 29. – No. 3. – PP. 189–200. <https://doi.org/10.2298/CICEQ220208026S>.
- 12 Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying. – CRC Press, 2014. <https://doi.org/10.1201/b17208>.
- 13 Benitta A.C., Jundika C.K., Agus P.S. and Arun S.M. Drying Technology. – 2021. – V. 39. – No. 11. – PP. 1667–1684. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1907754>.
- 14 Wu Z.H., Hu Y.J., Lee D.J., Mujumdar A.S. and Li Z.Y. Drying Technology. – 2010. – V. 28. – No. 7. – PP. 834–842. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.490485>.
- 15 Nedelin S.V. Ferrous Metallurgy // Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. – 2021. – V. 77. – No. 8. – PP. 936–942. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-936-942>.
- 16 Pikul Z. and Telichenko D. Information Science And Control Systems. – 2014. – V. 1. – No. 39. – PP. 160–169. <https://ics.pnu.edu.ru/journal/articles/963/en/>.
- 17 Прокументор И.В. Исследование процесса сушки угольных и апатитовых флотоконцентраторов в барабанных сушилках и разработка АСУ ТП сушки. – Л.: Южгипрошахт, 1983. – № 227. <https://www.disscat.com/content/issledovanie-protsessa-sushki-ugolnykh-i-apatitovykh-flotokonsentratov-v-barabannykh-sushki-0>.
- 18 Стальский В.В., Стороженко С.В. Записки Горного института. – 1972. – Т. 62. – № 31. <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/11755>.
- 19 Zarubin M. Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2016. – V. 51. – No. 4. – PP. 473–482. https://journal.uctm.edu/node/j2016-4/16-Zarubin_p%20473-482.pdf.
- 20 Zarubin M. and Zarubina V. Energy Procedia. – 2016. – V. 95. – PP. 512–516. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.077>.
- 21 Mhaskar H.N. and Michelli C.A. Advances in Applied Mathematics. – 2020. – V. 13. – No. 3. – PP. 350–373. [https://DOI:10.1016/0196-8858\(92\)90016-P](https://DOI:10.1016/0196-8858(92)90016-P).
- 22 Bai Z.Z. and Wu W.T. Numerical Linear Algebra with Applications. – 2019. – V. 26. – e2237. <https://doi.org/10.1002/nla.2237>.

REFERENCES

- 1 Ob utverzhdenii Pravil perevozok грузов zheleznodorozhnym transportom» Prikaz Ministra industrii i infrastruktornogo razvitiya Respubliki Kazahstan ot 2 avgusta 2019 goda № 612. Zaregistrirovano v Ministerstve yusticii Respubliki Kazahstan 2 avgusta 2019 goda № 19188. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900019188>. [in Russian].
- 2 Munro M. and Mohajerani A. (2014) Marine Structures, vol. 40, pp. 193–224. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.11.004>.
- 3 International Maritime Organization (IMO), Amendments (05-19) to the International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC) Code (on 1 January 2021) (MSC101/24Add.3), London, 2019. <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/CargoesInBulk-default.aspx>.
- 4 Isaenko G.E., Mikhailov V.G., Meshcheryakov N.S., Goryachko O.V. and Makavetskas A.R. (2023) Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information, vol. 79, no. 3, pp. 200–206. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2023-3-200-206>.
- 5 Ljung A.L., Lundström T., Marjavaara B. and Tano K. (2011) International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, no. 17–18, pp. 3882–3890. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.040>.
- 6 Sharma R. and Nimaje D. (2021) Drying Technology, vol. 39, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1863423>. (in English).
- 7 Tekhnologicheskaya instrukciya AO «SSGPO» (ERG, 2020), 56 s. [in Russian].
- 8 Khramov A.N. and Subbotin M.Y. (2019) Bulletin of ZabSU, vol. 8. <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-svoystv-rudnykh-konsentratov-vliyayushchie-na-vybor-konstruktsii-barabannykh-sushilok>.
- 9 Patra A.S., Makhija D., Mukherjee A.K., Tiwari R., Sahoo C.R. and Mohanty B. (2016) Powder Technology, vol. 287, pp. 43–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.030>.
- 10 Ogunniran O., Binner E., Sklavounos A., Robinson J.P. (2017) Chemical Engineering Science, vol. 165. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.03.003>.
- 11 Souza A.S., de Souza Pinto T.C., Sarkis A.M., de Pádua T.F. and Béttega R. (2023) Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, vol. 29, no. 3, pp. 189–200. <https://doi.org/10.2298/CICEQ220208026S>.

- 12 Mujumdar A.S. (2014) Handbook of Industrial Drying. <https://doi.org/10.1201/b17208>.
- 13 Benitta A.C., Jundika C.K., Agus P.S. and Arun S.M. (2021) Drying Technology, vol. 39, no. 11, pp. 1667–1684. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1907754>.
- 14 Wu Z.H., Hu Y.J., Lee D.J., Mujumdar A.S. and Li Z.Y. (2010) Drying Technology, vol. 28, no. 7, pp. 834–842. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.490485>.
- 15 Nedelin S.V. (2021) Ferrous Metallurgy, Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information, vol. 77, no. 8, pp. 936–942. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-936-942>.
- 16 Pikul Z. and Telichenko D. (2014) Information Science And Control Systems, vol. 1, no. 39, pp. 160–169. <https://ics.pnu.edu.ru/journal/articles/963/en/>.
- 17 Prozumentor I.V. (1983) Issledovanie processa sushki ugol'nyh i apatitovykh flotokoncentratov v barabannykh sushil'nikakh i razrabotka ASU TP sushki. <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-protsessa-sushki-ugolnykh-i-apatitovykh-flotokonsentratov-v-barabannykh-sushi-0>. [in Russian].
- 18 Stal'skij V.V., Storozhenko S.V. (1972) Mnogosvyaznaya sistema avtomaticheskogo upravleniya processom sushki fosforitovogo koncentrata, Zapiski Gornogo instituta. – vol. 1, no. 62, p. 31. <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/11755>. [in Russian].
- 19 Zarubin M. (2016) Journal of Chemical Technology and Metallurgy, vol. 51, no. 4, pp. 473–482. https://journal.uctm.edu/node/j2016-4/16-Zarubin_p%20473-482.pdf.
- 20 Zarubin M. and Zarubina V. (2016) Energy procedia, vol. 95, pp. 512–516. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.077>.
- 21 Mhaskar H.N. and Michelli C.A. (2020) Advances in Applied Mathematics, vol. 13, no. 3, pp. 350–373. [https://doi.org/10.1016/0196-8858\(92\)90016-P](https://doi.org/10.1016/0196-8858(92)90016-P).
- 22 Bai Z.Z. and Wu W.T. (2019) Numerical Linear Algebra with Applications, vol. 26, e2237. <https://doi.org/10.1002/nla.2237>.

¹Зарубин М.Ю.,

т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-1415-5244,
e-mail: zarubin_mu@mail.ru

¹Исмаилов А.О.,

т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0009-0000-5432-3364,
e-mail: rector@kineu.kz

^{1*}Зарубина В.Р.,

э.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-1376-9172
*e-mail: zarubina_v@mail.ru

²Ыбытаева Г.С.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-4243-0928,
e-mail: ybytayeva.galiya@gmail.com

³Есенқұлова Ж.Ж.,

а.ш.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0003-2377-639X,
e-mail: zhauhar-kz@bk.ru

¹М. Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті,
Қостанай қ., Қазақстан

²Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қ., Қазақстан

³Нархоз университеті, Алматы қ., Қазақстан

КОНЦЕНТРАТТАРДЫ КЕПТІРУ ҮШІН НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІНІ ОҢТАЙЛАНДЫРУ ПРОЦЕСТЕРІН КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬДЕУ МӘСЕЛЕСІ БОЙЫНША

Аңдатпа

Ғаламшардың экологиялық мәселелерінің ушығуы және жаһандық энергетикалық дағдарыстың жалғасуы жағдайында жүйелерді оңтайландырудың рөлі артуда. Бұл, әсіресе, өндірістің энергия тұтынуын

азайту және соның нәтижесінде көміртегі жүктемесін төмендету арқылы жүзеге асады. Бұл мәселе Қазақстан экономикасының негізгі салаларының бірі – тау-кен өндіру және өңдеу секторы үшін де өзекті. Зерттеудің мақсаты – қара металл кендерін байыту процесінің энергияны көп қажет ететін кезеңдерінің бірі саналатын концентратты кептіруді оңтайландыру мүмкіндігін зерттеу. Экономикалық аспектілерге байланысты зерттеу Matlab визуалды модельдеу ортасында авторлар әзірлеген BSA 3.5–27 кептіру барабандарында темір кені концентратын кептіру процесінің цифрлық модельдерін қолдану арқылы жүргізілді. Авторлар теориялық зерттеулер мен толық көлемді эксперименттердің нәтижелеріне сүйене отырып, бар автоматтандыру жүйелерімен зерттелетін нысанның моделін жасап, радиалды негізді функциялардың нейрондық желісі негізінде процестерді басқарудың бейімделген оңтайландыру жүйесін ұсынды. Технологиялық процесті бақылау өлшемі ретінде кептіру агентін өндіруге жұмсалатын газ шығыны таңдалды. Зерттелетін концентраттарды кептірудің бастапқы жүйесі мен бейімделген бақылауы бар жүйенің цифрлық үлгілерінің жұмысын салыстыру нәтижесінде бақылау сапасы бағаланды. Алынған нәтижелерді темір рудасын өндіру және байыту кәсіпорындарының, сондай-ақ ұқсас технологияларды пайдаланатын басқа да пайдалы қазбаларды өңдеу кешендерінің кептіру процестерін басқару жүйелерін жаңғырту үшін қолдануға болады.

Тірек сөздер: компьютерлік модельдеу, нейрондық желі, оңтайландыру, адаптивті басқару, кептіру, көміртегі жүктемесін азайту.

¹Zarubin M.Yu.,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
ORCID ID: 0000-0002-1415-5244,
e-mail: zarubin_mu@mail.ru

¹Ismailov A.O.,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
ORCID ID: 0009-0000-5432-3364,
e-mail: rector@kineu.kz

^{1*}Zarubina V.R.,

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
ORCID ID: 0000-0002-1376-9172,
*e-mail: zarubina_v@mail.ru

²Ybytayeva G.S.,

PhD, Associate Professor,
ORCID ID: 0000-0002-4243-0928,
e-mail: ybytayeva.galiya@gmail.com

³Yessenkulova Zh.Zh.,

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
ORCID ID: 0000-0003-2377-639X,
e-mail: zhauhar-kz@bk.ru

¹Kostanay University of Engineering and Economics named after M. Dulatov,
Kostanay, Kazakhstan

²International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan

³Narxoz University, Almaty, Kazakhstan

ON THE ISSUE OF COMPUTER MODELING OF NEURAL NETWORK OPTIMIZATION PROCESSES FOR DRYING CONCENTRATE

Abstract

In the context of the aggravating environmental problems of the planet and the continuing to worsen global energy crisis, the role of optimizing systems increases, including by reducing energy consumption of production and, as a result, reducing the carbon load. This problem is also relevant for one of the flagships of the economy of Kazakhstan – the mining and processing sector. The purpose of the stated study is to study the possibility of

optimizing one of the most energy-intensive stages of the beneficiation processing of ferrous ores – concentrate drying. In connection with economic aspects, the study was carried out on digital simulation models of the drying process of iron ore concentrate in BSA 3.5-27 drying drums developed by the authors in the Matlab visual modeling environment. The authors, based on the results of the conducted theoretical research and field experiments, constructed a model of the object under study with existing automation systems, proposed an adaptive optimizing process control system based on a neural network of radial basis functions. The value of gas consumption for obtaining a drying agent was chosen as a control criterion for the technological process. Based on the results of comparing the operation of digital models of the original concentrate drying system under study and the system with adaptive control, the quality of control was assessed. The obtained results can be applied to modernize the control systems for drying processes of beneficiation complexes of both iron ore mining and processing plants and other minerals using similar technologies.

Key words: computer modeling, neural network, adaptive control system, iron ore concentrate, reducing carbon load.

Дата поступления статьи в редакцию: 06.01.2025