

Программа численного расчета энергообеспечения агломерационных печей для обработки рудного фосфорного сырья*

М.С. ВОРОБЬЕВ^а, В.А. ОРЕХОВ^б, В.И. БОБКОВ^с

214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1, филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске

^а vorobeow.mischa@yandex.ru ^б fundukoff@mail.ru ^с vovabobkoff@mail.ru

Целью исследования является оптимизация энергообеспечения агломерационных печей, используемых для переработки фосфорного сырья при сохранении высокого качества конечного продукта. Фосфорные руды характеризуются низкой температурой плавления и высоким содержанием летучих примесей, что требует непрерывного контроля процесса спекания. В статье рассматривается возможность численного расчета энергообеспечения процессов переработки рудного фосфатного сырья. Известно, что агломерационные печи являются ответственными потребителями и перерыв их питания может привести к массовому недоотпуску продукции и долгосрочному простоем технологической линии. Представленный алгоритм учитывает основные технологические аспекты и позволяет корректировать режим работы печи в зависимости от химического и гранулометрического состава шихты. Программа численного расчета интегрирует данные о режиме работы печи и внешних факторах, позволяя прогнозировать пиковые нагрузки, моменты переходного режима работы электроприемников и минимизировать потери топливных ресурсов. Практически рассчитаны параметры энергопотребления и технологической линии на примере агломерационной печи ОКМ-350. Результаты численного расчета показали снижение энергозатрат на 15...18% за счет адаптивного регулирования работы дутьевых вентиляторов и вспомогательного оборудования. Выявлена закономерность зависимости объемов прокачиваемого воздуха от гранулометрического состава руды. Установлено, что увеличение доли мелкой шихты повышает сопротивление воздушному потоку, увеличивает время агломерации и повышает нагрузку на валу двигателя. Доказано, что использование конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности может привести к «зависанию ротора» по сравнению с частотным регулированием, когда есть возможность поддержания критического момента. Предложенные результаты расчета могут быть использованы на практике при управлении технологическими процессами металлургических предприятий.

* Статья получена 27 мая 2025 г.

Ключевые слова: агломерация, асинхронный двигатель, зависание ротора, численный расчет, численные методы, математическое моделирование, имитационная модель, фосфор, шихта, комплексы программ, аналитические методы, алгоритм

ВВЕДЕНИЕ

На основе открытых источников металлургия остается одной из самых энергоемких отраслей. От 15 до 20 % мирового энергопотребления приходится именно на эту сферу [1]. Повышение энергетических показателей до сих пор остается одной из актуальных проблем энергетики и металлургии. Таким образом, рациональное использование электроэнергии в металлургии – не просто экономическая необходимость, но и ключевой элемент устойчивого развития. Это позволяет снизить затраты, минимизировать экономические риски, соответствовать глобальным стандартам и укрепить позиции на рынке в условиях перевооружения и модернизации технологических линий [2].

Потребность в фосфоре для военных и аграрных предприятий остается критически важной для национальной безопасности и продовольственной стабильности. Военный сектор использует фосфор в производстве ракетного топлива, осветительных снарядов, где чистота и стабильность сырья напрямую влияют на эффективность изделий [3]. В свою очередь, аграрная отрасль зависит от фосфорных удобрений, обеспечивающих рост урожайности сельскохозяйственных культур и уменьшающих деградацию почв. Однако растущий спрос обоих секторов требует увеличения объемов добычи и переработки фосфоросодержащего сырья [4]. Для решения этих задач необходимо внедрение ресурсосберегающих технологий и точных методов расчета теплотехнических режимов. Это не только снизит себестоимость продукции, но и минимизирует экологический ущерб, обеспечив долгосрочную устойчивость поставок фосфора для стратегических отраслей экономики.

Электроприемники производственных и вспомогательных объектов участка агломерации классифицируются как потребители первой и второй категории надежности электроснабжения. Электропечные установки относятся к потребителям второй категории, и для них допускается перерыв электроснабжения, необходимый для работы устройств релейной защиты и автоматики [5, 6]. Потребители первой категории (электроснабжение вентиляции, подача системы инертного газа и охлаждение элементов печи) являются наиболее ответственными, и для них предусматривается отдельный источник питания – дизельный генератор. Такое разделение соответствует требованиям Правил устройства электроустановок и обеспечивает минимизацию рисков останова технологических циклов производства.

Современные цифровые программы расчета и подбора электрооборудования для агломерационных печей стали ключевым инструментом оптимизации металлургических процессов. Их применение позволит не только сократить временные и финансовые затраты, но и повысить точность проектирования систем, что особенно критично при работе с шихтой переменного химического состава [7].

1. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА И ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОГО УЧАСТКА

Для выбора агломерационной печи необходимо осуществить выбор соответствующей технологической линии в зависимости от применяемого рудного сырья и планируемого запроса в потребности желтого фосфора. Сравнение выхода желтого фосфора при использовании окатышей, агломерата из концентрата и агломерата из сырой руды зависит от физико-химических свойств материалов, их подготовки и условий восстановления в обжиговых печах. В таблице приведены основные параметры при использовании наиболее распространенных видов рудного сырья.

Сравнительная таблица видов рудного сырья

Comparative table of ore raw materials types

Параметр	Окатыши	Агломерат из концентрата	Агломерат из сырой руды
Содержание P_2O_5 , %	28...30	24...26	18...22
Выход P_4 , %	92...95	85...90	75...80
Доля примесей (Al_2O_3)	1,1...1,3	1,3...1,5	1,6...1,8
Расход кокса P_4 , %	3	5...7	10...15
Энергозатраты, кВт·ч/т P_4	12 000...13 000	13 500...14 500	15 000...16 500

Для восстановления фосфора расход электроэнергии составляет 12...15 МВт·ч на тонну руды. Например, для получения одной тонны элементарного фосфора требуется переработать руду, содержащую 2/3 оксида фосфора.

Удельный расход электроэнергии с учетом КПД

$$b = \sum(P_i t_i) / Q\eta,$$

где P_i – мощность электрооборудования участка, кВт; t_i – время работы оборудования; Q – масса произведенного агломерата, т; η – коэффициент полезного действия.

При выборе и расчете электрооборудования необходимо учитывать частоту циклов пуска-останова электродвигателей, перегрузочную способность, особенности регулирования технологического процесса агломерационной печи.

Для расчета количества электроэнергии, затрачиваемой на возгонку фосфора из сырой руды, необходимо учитывать технологические особенности процесса состав сырья и КПД оборудования. Обычно процесс возгонки происходит в печах при температуре 1200...1600 °С [8]. На энергопотребление существенное влияние будет оказывать химический состав руды [9]. Содержание карбонатов, окислов железа потребуют дополнительной энергии на удаление. На основе данных действующих металлургических предприятий для термической обработки одной тонны P_2O_2 затрачивается 12...15 МВт·ч для современных агломерационных установок и 25...30 МВт·ч для устаревших установок.

Схема электроснабжения должна обеспечивать надежность электроснабжения и перегрузочную работу в пиковых режимах нагрузки.

С точки зрения требований надежности электроснабжения агломерационные линии относятся к первой категории электроприемников, и перерыв в их электроснабжении не должен превышать времени работы устройств релейной защиты и автоматики. Остановка агломерационной машины приводит к заливанию шихты в спекательной тележке в процессе ее остывания. Последующий пуск линии возможен только после выполнения длительных и ресурсоемких операций по ручной чистке затвердевшей шихты и осуществления повторного розжига. Выполнение этих операций влечет за собой значительные потери, простой оборудования, недоотпуск продукции, что также сказывается на всем остальном технологическом процессе производства.

Для обеспечения бесперебойного питания ответственных потребителей требуется два независимых источника питания и для осуществления аварийной выгрузки тележек, обеспечения аварийной вентиляции, освещения и пожарных насосов – дизель-генератор, работающий на выделенную нагрузку при потере обоих независимых источников (рис. 1).

Двигатели агломерационной линии характеризуются высокими пусковыми моментами. При расчете и управлении технологическим процессом, например, частотное регулирование скорости движения спекательных тележек или лент транспортеров необходимо учитывать способность питающей сети и перегрузочную работу оборудования в случаях затянувшегося пуска.

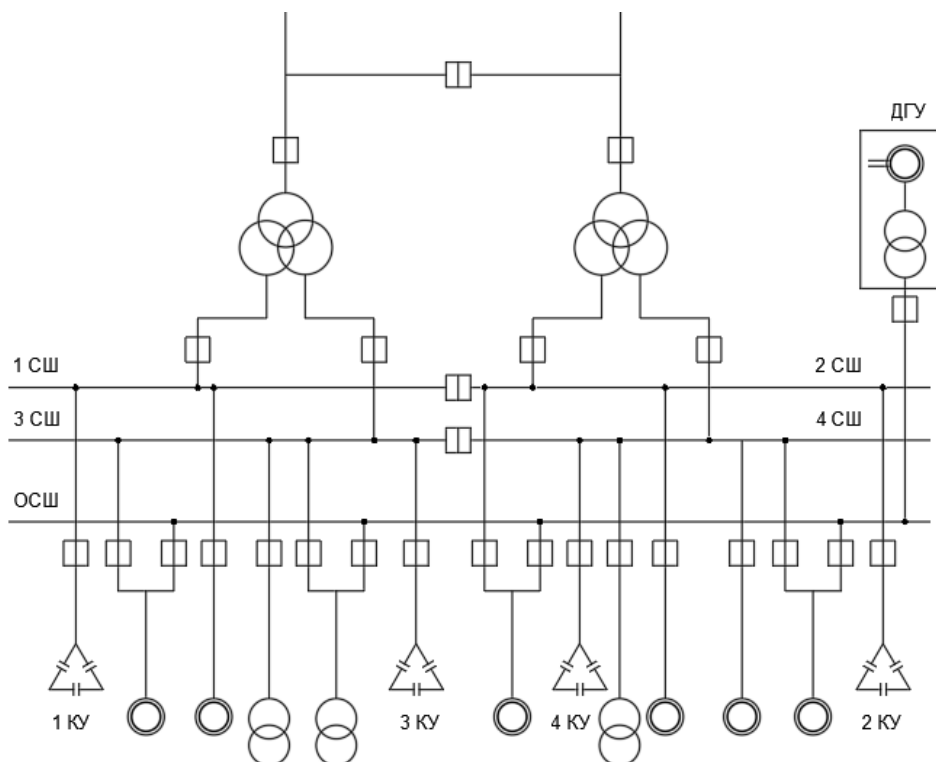


Рис. 1. Принципиальная схема участка агломерации фосфоросодержащих руд

Fig. 1. Schematic diagram of the phosphorous-bearing ore agglomeration area

Для проверки правильности выбора двигателей в программной расчете применяется проверка на «зависание ротора». Зависание ротора – это аварийный режим работы электродвигателя, при котором ротор перестает разгоняться и вращается с постоянной, но недостаточной скоростью или же происходит процесс остановки. Работа в таком режиме недопустима, так как даже если ротор продолжает вращение, то длительная вибрация и перегрев снижают электрическую прочность изоляции обмоток и разрушение подшипников. Формула Клосса (*) позволяет аппроксимировать моментную характеристику двигателя в установившемся режиме работы [10]:

$$M = 2M_{\max} / (s / s_{\max} + s_{\max} / s), \quad (*)$$

где s_{\max} – это максимальный момент двигателя, т. е. наибольший крутящий момент, который двигатель может развить. Скольжение s может изменяться в диапазоне от нуля до единицы, где нулевое значение будет соответствовать идеальному холостому ходу, а 1 – моменту полной остановки ротора. На практике при работе двигателей стараются выдерживать устойчивую рабочую зону, которая находится в диапазоне $0,01 \dots 0,1$. Для двигателя это нормальный режим работы с нагрузкой на валу, при значительном изменении момента скорость меняется незначительно. Пример результата расчетов для характеристики развиваемого момента двигателя (M) и его момента нагрузки (M_c) на примере синхронного двигателя СДМЗ 20-39-12 УХЛ4 по формуле Клосса представлен на рис. 2. Момент нагрузки принимаем постоянным, неизменяющимся значением.

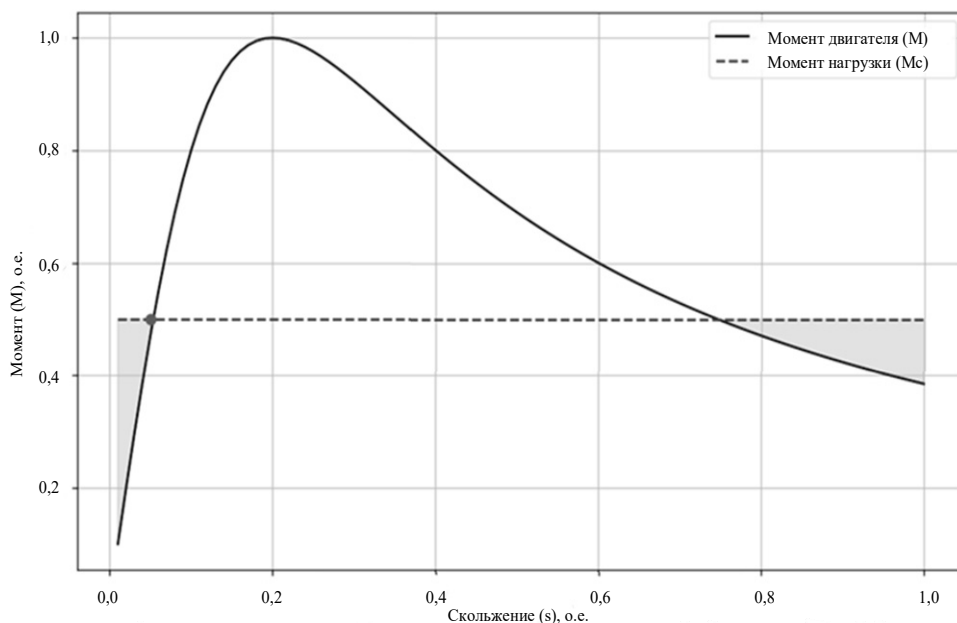


Рис. 2. Моментные характеристики двигателя и нагрузки

Fig. 2. Torque characteristics of the motor and load

Важно отметить, что формула Клосса (*) не учитывает изменения параметров при нагреве обмотки статора, стержней и короткозамкнутых колец электродвигателя. Точность расчета зависит от величины скольжения и будет снижаться при $s > s_{\max}$.

Для обеспечения экономически эффективной работы агломерационного производства и выпуска продукции надлежащего качества процесс автоматического регулирования должен обеспечивать стабилизацию всех основных параметров, которые оказывают влияние на изменение скорости спекания шихты: скорость прокачиваемого воздуха, высота спека, скорость движения колосников и т. п. [11, 12].

Для расчета рассматриваемого участка агломерации применялась среда программирования C++. Визуализация результатов расчета осуществлялась на примере программы Visual Code, которая широко используется специалистами при разработке промышленных систем управления. Для визуализации расчета составлен алгоритм, представленная на рис. 3. Алгоритм отражает последовательность этапов задания параметров, проектирования и подбора оборудования для агломерационной печи, начиная от задания требуемых объемов готовой продукции и заканчивая проверкой методов оптимизации для проверки надежности работы электродвигателей в переходных режимах работы сети. В алгоритм включена база данных, содержащая технические данные агломерационных печей.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

На основе заданной потребности в фосфоре для получения агломерата из сырой руды или концентрата рекомендована машина АКМ-312, а для работы с окатышами – ОКМ-108. Дальнейший численный расчет энергопотребления и уточнение целесообразности объемов компенсации реактивной мощности в сети 6 кВ будет производиться на примере агломерационной машины АКМ [13, 14].

Для экономии электроэнергии возможна замена недогруженных электродвигателей на более маломощные, использование частотных регуляторов или компенсация реактивной мощности в сети 6 кВ, рост потерь активной энергии при замене двигателей, работающих в повторно-кратковременных режимах, имеющих большое количество пусков и остановок в течение технологического процесса производства [15]. Имеющиеся методики определения окончания процесса спекания имеют недостатки, заключающиеся в сложности прогнозирования скорости спекания из-за того, что отбор проб газа и шихты из зоны спекания затруднителен.

Эффективное автоматическое регулирование процесса агломерации обеспечивается стабилизацией всех основных параметров, которые вызывают изменение скорости спекания шихты, скорости движения колосников, температуры, объемов прокачиваемого воздуха.

Представленный алгоритм учитывает основные технологические аспекты, оказывающие влияние на процесс горения шихты. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3. Для более эффективного и экономичного процесса производства агломерата предполагается оптимизировать грануломет-

рический состав шихты и учитывать параметры и тип дутьевого вентилятора. В зависимости от состава слоя алгоритм рассчитывает и выбирает необходимые способы и параметры регулирования [16].

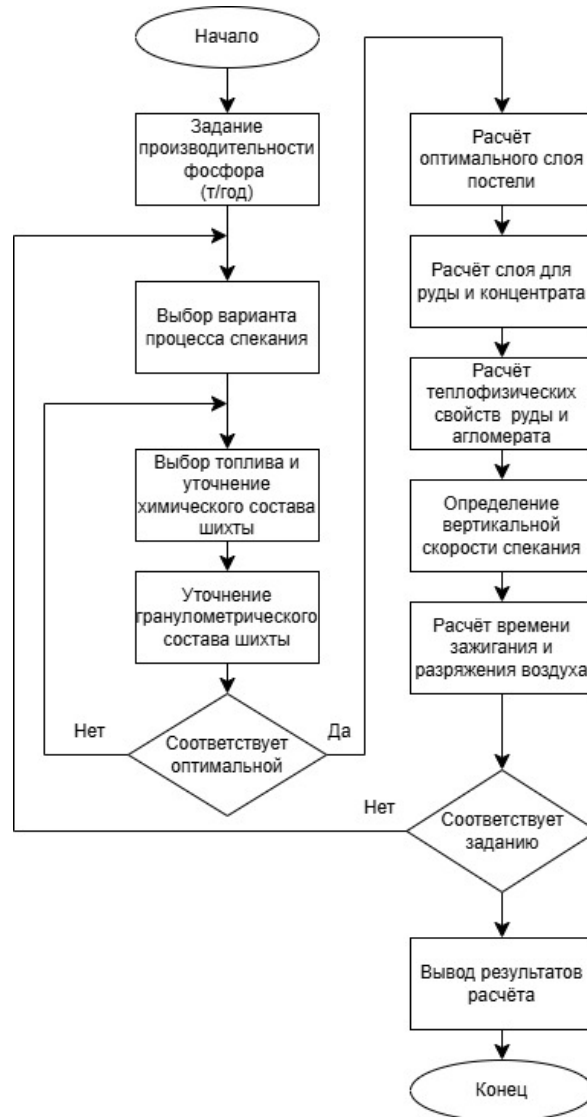


Рис. 3. Алгоритм расчета параметров работы агломерационной машины

Fig. 3. Calculation algorithm for sintering machine parameters

В учете нагревов при самозапуске возникает сложность в определении значений нагревов обмотки статора, стержней и короткозамыкающих колец ротора в моменты «зависания ротора» асинхронного двигателя. На риск зависания также влияет характер нагрузки. Для приведения в движение колосниковых решеток требуется большой избыточный момент по сравнению со статическими нагрузками на валу двигателя.

Минимальное значение избыточного момента – это минимальная разница между значениями вращающего момента электродвигателя и момента сопротивления нагрузки, при которой произойдет его гарантированный пуск. В математическом моделировании принимается допущение, что при меньшем положительном значении избыточного момента произойдет «зависание ротора», т. е. вращение с постоянной угловой скоростью происходит до тех пор, пока напряжение на обмотке статора не повысится до значения, обеспечивающего необходимый избыточный момент, и, как следствие, продолжение разгона ротора. Реальная картина физического разгона ротора продолжится и при снижении углового ускорения.

Программа расчета обладает возможностью наглядного графического представления зависимостей и численного вывода исследуемых расчетов, что позволяет сделать процесс расчета максимально удобным и информативным. Встроенная база данных, содержащая информацию по химическому составу шихты, удельному расходу электроэнергии электроприемников и по электродвигателям, ускоряет и упрощает ввод данных в программу, окно вывода результатов которой представлено на рис. 4.



Рис. 4. Пример вывода зависимости расхода воздуха от доли мелкой фракции в шихте

Fig. 4. Example of deriving the relationship between air consumption and fine fraction content in the charge

В момент восстановления напряжения на зажимах электродвигателя при включенных батареях конденсаторов возможны значительные броски вращающего момента на валу двигателя, которые могут привести к деформации обмоток двигателя и зубьев редуктора. Частотное регулирование позволяет

критическому моменту оставаться постоянным, кроме области низких частот, где падение напряжения на сопротивление статора снижает критический момент [17]. Учитывая ситуации, в которых асинхронный двигатель может потерять устойчивость, возможен выбор способов оптимизации их работы и экономики на этапе проектирования.

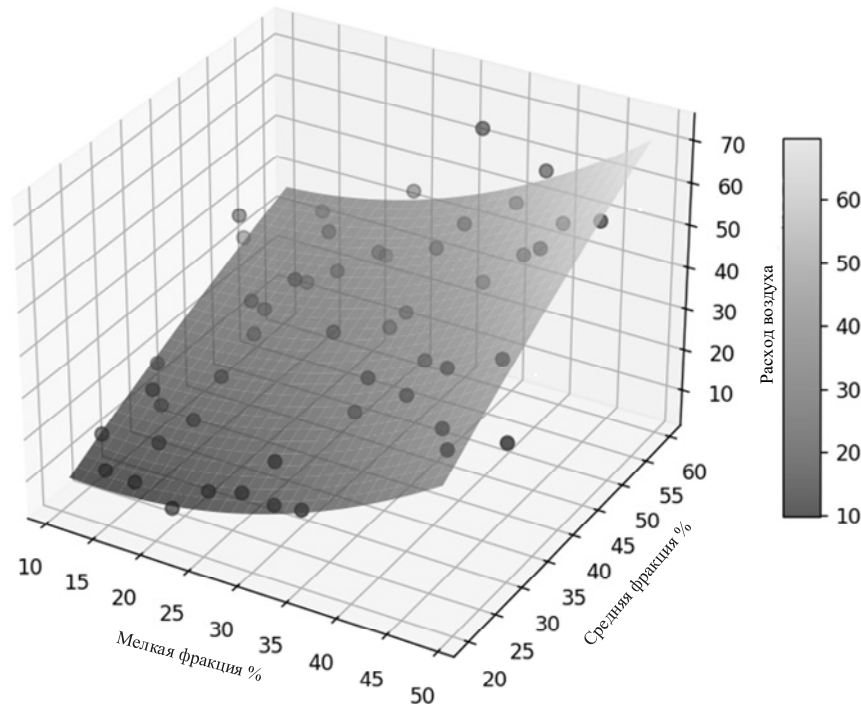


Рис. 5. Графическое соотношение объемов расхода воздуха от содержания мелких и средних фракций в шихте

Fig. 5. Graphical relationship of air consumption volumes to the content of fine and medium fractions in the charge

На рис. 5 отображена зависимость расхода воздуха от содержания мелкой и средней фракции в шихте. Поверхность регрессии имеет изогнутую, нелинейную форму – это отображает зависимости между фракциями сыпучего материала и расходом воздуха. Точки соответствуют экспериментальным данным. Видна заметная корреляция между долей мелкой фракции и расходом воздуха. Положительная корреляция между долей мелкой фракции и расходом воздуха указывает на ее ключевую роль в процессе спекания шихты. Мелкая фракция уплотняет шихту, увеличивая ее сопротивление воздушному потоку. Если коэффициент мелкой фракции равен 0,8, то увеличение ее доли на 1 % приводит к росту расхода воздуха на 0,8 м³/ч при фиксированной доле средней фракции. Влияние мелкой фракции оказывает на 1,6 % больше, чем среднее. Однако при оптимизации состава необходимо учитывать взаимосвязь всех фракций, находящихся в плотном слое засыпки: рост доли мелкой фракции снижает долю крупной, которая также влияет на воздухопроницаемость слоя.

Зоны с мелкими частицами горят быстрее, а крупные – медленнее. Как следствие, происходит неравномерный нагрев слоя и неравномерная скорость

протекания процесса декарбонизации. Для компенсации этого нежелательного явления требуется увеличение времени агломерации и повышение мощности дутьевых вентиляторов, что приведет к повышению энергопотребления [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные наглядно показывают качественное изменение технологии процесса и экономический эффект. Дальнейшая работа над алгоритмом позволит использовать математические модели для каждого энергоемкого процесса и использовать их в информационной системе принятия решений. Оператор-технолог в реальном времени будет видеть, как изменение состава шихты повлияет на работу электротехнологического оборудования и итоговое энергопотребление. Следующим шагом может стать использование информационной системы принятия решений в техническом перевооружении предприятия и замена наиболее перегружаемых элементов технологической цепи.

Совместное использование разработанной программы и систем автоматического управления агломерационной линии позволит не только оптимизировать энергопотребление, но и повысить качество исходного продукта и распределить эксплуатационную нагрузку на оборудование. По результатам расчета энергопотребления агломерационного участка спекания руды можно сделать следующие выводы.

1. Определено, что изменение типа вентилятора или применение частотного регулирования снижает расход электроэнергии с 12 до 8 кВт·ч/т и позволяет поддерживать требуемое разрежение воздуха в зоне горения.
2. Снижение доли частиц шихты размером менее 1 мм уменьшает энергопотребление дутьевого вентилятора до 20 %.
3. Информационная система может быть использована в качестве основы современных типовых систем расчета и управления технологическими процессами регулирования на производстве с использованием вычислительной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование метода итераций для расчета полного горения топлива в доменных печах предприятий черной металлургии / М.С. Воробьев, В.А. Орехов, В.И. Бобков, А.А. Быков // *Современные наукоемкие технологии*. – 2025. – № 5. – С. 41–47. – DOI: 10.17513/snt.40388.
2. Ходжамбердиев Д.Б., Реджепов К.С., Анначарыев К.С. Оценка энергетической ценности различных топливных ресурсов // *Наукосфера*. – 2024. – № 1-1. – С. 148–152. – EDN KAWQZN.
3. Стоянова М.В., Бром А.Е., Снугур А.Р. Тенденции и перспективы развития металлургической промышленности на основе регрессионного анализа // *Бизнес. Образование. Право*. – 2020. – № 4 (53). – С. 41–45. – DOI: 10.25683/VOLBI.2020.53.455.
4. Управление электропотреблением предприятия по производству меди / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, О.А. Гаврина, Ш.Э. Зауи // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2023. – № 3. – С. 202–214. – EDN BZUNYB.
5. Анализ и расчет энергетических характеристик предприятия цветной металлургии / М.В. Текиев, Л.Т. Цомаева, М.М. Хузмиев, Н.В. Ключева // *Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях: сборник докладов I Международной научно-практической конференции*. – Владикавказ, 2020. – С. 100–103. – EDN NKLDYT.

6. Кондрашова Ю.Н., Ефименко А.М., Снугур А. Оценка влияния баланса мощностей на результирующую устойчивость генераторов с учетом реконструкции в аварийных и послеваарийных режимах применительно к энергетическому узлу предприятия черной металлургии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 74–88. – DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-74-88.
7. Корнилов Г.П., Варганова А.В., Шеметов А.Н. Состояние и перспективы развития систем электроснабжения металлургических предприятий с собственными электростанциями // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 4–5. – С. 79–89. – DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-79-89.
8. Косаченко Ю.В., Табельская Д.Д. Влияние параметров аглопроцесса на качество агломерата // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2024. – № 23. – С. 4–10. – EDN FDRJJA.
9. 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.
10. Бобков В.И., Быков А.А., Незамаев С.В. Анализ технологических показателей переработки фосфоритовой руды для электровозгонки желтого фосфора // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 3. – С. 100–107. – DOI: 10.17513/use.38236.
11. Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Усунц-Кригер Т.Н. Построение механических характеристик асинхронных двигателей по паспортным данным // Интеллектуальная электротехника. – 2020. – № 3 (11). – С. 53–63. – DOI: 10.46960/2658-6754_2020_3_53.
12. Антаненкова И.С., Светогор С.И. Особенности применения ОЦР-технологии на компрессорных станциях металлургических предприятий // Промышленные процессы и технологии. – 2021. – Т. 1, № 1. – С. 61–76. – DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-61-76.
13. Дли М.И., Пучков А.Ю., Максимкин М.В. Программная модель интеллектуальной системы управления сложными процессами переработки мелкорудного сырья // Прикладная информатика. – 2024. – Т. 19, № 6 (114). – С. 96–112. – DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112.
14. Лазарев Г.Б. Электромашинные компенсаторы реактивной мощности в электрических сетях современных энергосистем // Энергия единой сети. – 2022. – № 3-4 (64–65). – С. 72–85. – EDN MISCKC.
15. Лащенко М.Б., Шевырёв Ю.В. Влияние систем управления возбуждением синхронного двигателя на самозапуск при кратковременной потере питания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 37. – С. 121–136. – DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.07.
16. Ворошилов Е.А. Интеллектуальные системы управления энергопотреблением в производстве // Вестник науки. – 2024. – № 11 (80), т. 1. – С. 1189–1194. – EDN GPQZRK.
17. Турдуев И.Э., Камчыбеков Ж. Автоматизированная система управления энергопотреблением // Бюллетень науки и практики. – 2024. – Т. 10, № 12. – С. 215–219. – DOI: 10.33619/2414-2948/109/31.
18. Stepanov M.E. Adaptive control systems for optimizing electric drive operation and reducing energy consumption in challenging conditions // Оригинальные исследования. – 2024. – Т. 14, № 9. – С. 86–92. – EDN RJONBU.
19. Ellis B.G., Loo C.E., Witchard D. Effect of ore properties on sinter bed permeability and strength // Ironmaking & Steelmaking. – 2007. – Vol. 34 (2). – P. 99–108. – DOI: 10.1179/174328107X165726.

Воробьев Михаил Сергеевич, аспирант кафедры высшей математики филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске. Основное направление научных исследований – математическое моделирование, термическая обработка рудного сырья, производство фосфора. E-mail: vorobeow.mischa@yandex.ru

Орехов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микропроцессорной техники филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске. Основное направление научных исследований – искусственный интеллект, программирование, математическое и компьютерное моделирование, энергоресурсосбережение, теплотехнологии, оптимизация и оптимальное управление, теплообмен. E-mail: fundukoff@mail.ru

Бобков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске. Основное направление научных исследований – интеллектуальный анализ данных, искусственный интеллект, программирование, математическое и компьютерное моделирование, энергоресурсосбережение, теплотехнологии, оптимизация и оптимальное управление, сушка, теплообмен. E-mail: vovabobkoff@mail.ru

Vorobyev Mikhail S., PhD student at the Department of Higher Mathematics, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MPEI" in Smolensk. His main research area is mathematical modeling, thermal processing of ore raw materials, and phosphorus production. E-mail: vorobeow.mischa@yandex.ru

Orekhov Vladimir A., PhD (Eng.), associate professor, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MPEI" in Smolensk. His main research area is artificial intelligence, programming, mathematical and computer modeling, energy resource conservation, heat technologies, optimization and optimal control, heat and mass transfer. E-mail: fundukoff@mail.ru

Bobkov Vladimir I., D.Sc. (Eng.) professor, Head of the Higher Mathematics Department, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MPEI" in Smolensk. His main research area is data mining, artificial intelligence, programming, mathematical and computer modeling, energy resource conservation, heat technologies, optimization and optimal control, drying, heat and mass transfer. E-mail: vovabobkoff@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-1-71-84

Numerical calculation software for energy management of sintering ovens used in phosphate ore processing^a

M.S. VOROBYEV^a, V.A. OREKHOV^b, V.I. BOBKOV^c

Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, 1 Energeticheskii Proezd, Smolensk, 214031, Russian Federation

^a vorobeow.mischa@yandex.ru ^b fundukoff@mail.ru ^c vovabobkoff@mail.ru

Abstract

The purpose of the study is to optimize the energy supply of sintering machines used for processing phosphate raw materials while maintaining high quality of the final product. Phosphate ores are characterized by a low melting point and high content of volatile impurities, which requires continuous monitoring of the sintering process. The article examines the possibility of numerical calculation of energy supply for the processes of processing ore phosphate raw materials. It is known that sintering machines are critical consumers, and an interruption in their power supply can lead to massive under-delivery of products and long-term downtime of the production line. The presented algorithm considers the main technological aspects and allows adjusting the furnace operation mode depending on the chemical and granulometric composition of the charge. The numerical calculation program integrates data on the furnace operating mode and external factors, allowing to predict peak loads, moments of transient operation of electrical receivers, and minimize fuel resource losses. The energy consumption parameters and technological line parameters were practically calculated using the OKM-350 sintering machine as an example. The results of numerical calculation showed a reduction in energy costs by 15-18% due to adaptive control of the blower fans and auxiliary equipment. A pattern of change in the volumes of pumped air from the granulometric composition of the ore has been identified. It has been established that an increase in the proportion of fine charge increases air flow resistance, increases agglomeration

^{*} Received 27 May 2025.

The work was performed under the State Assignment, project number № FSWF-2026-0010.

time, and increases the load on the motor shaft. It has been proven that the use of capacitor banks for reactive power compensation can lead to rotor “hanging”, compared to the example of frequency control, when it is possible to maintain the critical torque. The proposed calculation results can be used in practice for managing technological processes of metallurgical enterprises.

Keywords: agglomeration, asynchronous motor, rotor stall, numerical calculation, numerical methods, mathematical model, simulation model, combustion, batch, software suites, analytical methods, algorithms

REFERENCES

1. Vorobyov M.S., Orekhov V.A., Bobkov V.I., Bykov A.A. Ispol'zovanie metoda iteratsii dlya rascheta polnogo goreniya topliva v domennykh pechakh predpriyatii cherno metallurgii [The use of the iteration method for calculating complete fuel combustion in blast furnaces of iron and steel enterprises]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*, 2025, no. 5, pp. 41–47. DOI: 10.17513/snt.40388.
2. Khodzhamberdiev D.B., Rejepov K.S., Annacharyev J. Otsenka energeticheskoi tsennosti razlichnykh toplivnykh resursov [Assessment of the energy value of various fuel resources]. *Naukosfera*, 2024, no. 1-1, pp. 148–152. (In Russian).
3. Stoyanova M.V., Brom A.E., Snigur A.R. Tendentsii i perspektivy razvitiya metallurgicheskoi promyshlennosti na osnove regressionnogo analiza [Trends and prospects of development of the metallurgical industry based on regression analysis]. *Biznes. Obrazovanie. Pravo = Business. Education. Law*, 2020, no. 4 (53), pp. 41–45. DOI: 10.25683/VOLBI.2020.53.455.
4. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Zaoui Ch.E. Upravlenie elektropotrebleniem predpriyatiya po proizvodstvu medi [Power management for a copper production plant]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 2023, no. 3, pp. 202–214.
5. Tekiev M.V., Tsomaeva L.T., Khuzmiev M.M., Klyueva N.V. [Analysis and calculation of energy characteristics of the non-ferrous metallurgy enterprise]. *Sovremennye tendentsii razvitiya informatsionnykh tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh i prikladnykh oblastyakh* [Modern trends in the development of information technology in scientific research and applied areas]. Collection of reports of the I International scientific and practical conference, Vladikavkaz, 2020, pp. 100–103. (In Russian).
6. Kondrashova Yu.N., Efimenko A.M., Snigur A. Otsenka vliyaniya balansa moshchnosti na rezul'tiruyushchuyu ustoychivost' generatorov s uchetom rekonstruktsii v avariinykh i posleavariinykh rezhimakh primenitel'no k energeticheskomu uzlu predpriyatiya cherno metallurgii [Estimation of the influence of the capacity balance on the resulting stability of generators taking into account reconstruction in emergency and post-emergency modes as applied to the power unit of the ferrous metallurgy enterprise]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, vol. 19, no. 3, pp. 74–88. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-74-88.
7. Kornilov G.P., Varganova A.V., Shemetov A.N. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem elektrosnabzheniya metallurgicheskikh predpriyatii s sobstvennymi elektrostantsiyami [The state and prospects of development of power supply systems of metallurgical enterprises with on-site power plants]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2021, vol. 64, no. 4–5, pp. 79–89. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-79-89.
8. Kosachenko Yu.V., Tabel'skaya D.D. Vliyanie parametrov agloprotsessa na kachestvo aglomerata [The influence of sintering process parameters on the quality of the agglomerate]. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki*, 2024, no. 23, pp. 4–10. (In Russian).
9. Puchkov A.Yu., Sokolov A.M., Fedotov V.V. Neirosetevoi metod analiza protsessov termicheskoi obrabotki okomkovannogo fosfatnogo rudnogo syr'ya [Neural network analysis method of heat treatment processes of pelletized phosphate ore raw materials]. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*, 2022, vol. 17, no. 5, pp. 62–76. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-5-62-76.
10. Bobkov V.I., Bykov A.A., Nezamaev S.V. Analiz tekhnologicheskikh pokazatelei pererabotki fosforitovoi rudy dlya elektrovozgonki zheltogo fosfora [Analysis of technological indicators of phosphorite ore processing for yellow phosphorus electrowinning]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 2024, no. 3, pp. 100–107. DOI: 10.17513/use.38236.

11. Smirnov A.Yu., Aleksandrova E.N., Usnunts-Kruger T.N. Postroenie mekhanicheskikh kharakteristik asinkhronnykh dvigatelei po pasportnym dannym [Construction of mechanical characteristics of induction motors according to passport data]. *Intellektual'naya elektrotehnika = Smart Electrical Engineering*, 2020, no. 3 (11), pp. 53–63. DOI: 10.46960/2658-6754_2020_3_53.

12. Antanenkov I.S., Svetogor S.I. Osobennosti primeneniya OTsR-tehnologii na kompressornyykh stantsiyakh metallurgicheskikh predpriyatii [Features of application of ORC-technology at compressor stations of metallurgical enterprises]. *Promyshlennyye protsessy i tekhnologii = Industrial Processes and Technologies*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 61–76. DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-61-76.

13. Dli M.I., Puchkov A.Yu., Maksimkin M.V. Programmnaya model' intellektual'noi sistemy upravleniya slozhnymi protsessami pererabotki melkorudnogo syr'ya [Software model of an intelligent control system for complex processes of small-scale ore processing]. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*, 2024, vol. 19, no. 6 (114), pp. 96–112. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112.

14. Lazarev G.B. Elektromashinnye kompensatory reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setyakh sovremennykh energosistem [Synchronous condensers in the electrical networks of modern power systems]. *Energiya edinoi seti = Energy of unified grid*, 2022, no. 3–4 (64–65), pp. 72–85. (In Russian).

15. Lashchenov M.B., Shevyrev Yu.V. Vliyanie sistem upravleniya vzbuzhdeniem sinkhronnogo dvigatelya na samozapusk pri kratkovremennoi potere pitaniya [Influence of synchronous motor excitation control systems on self-starting in case of short-term power loss]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya = Perm National Research Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, 2021, no. 37, pp. 121–136. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.07.

16. Voroshilov E.A. Intellektual'nye sistemy upravleniya energopotrebleniem v proizvodstve [Intelligent energy management systems in production]. *Vestnik nauki*, 2024, no. 11 (80), vol. 1, pp. 1189–1194. (In Russian).

17. Turduev I.E., Kamchybekov Zh. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya energopotrebleniem [Automated energy management system]. *Byulleten' nauki i praktiki = Bulletin of Science and Practice*, 2024, vol. 10, no. 12, pp. 215–219. DOI: 10.33619/2414-2948/109/31.

18. Stepanov M.E. Adaptive control systems for optimizing electric drive operation and reducing energy consumption in challenging conditions. *Original'nye issledovaniya*, 2024, vol. 14, no. 9, pp. 86–92.

19. Ellis B.G., Loo C.E., Witchard D. Effect of ore properties on sinter bed permeability and strength. *Ironmaking & Steelmaking*, 2007, vol. 34 (2), pp. 99–108. DOI: 10.1179/174328107X165726.

Для цитирования:

Воробьев М.С., Орехов В.А., Бобков В.И. Программа численного расчета энергообеспечения агломерационных печей для обработки рудного фосфорного сырья // Системы анализа и обработки данных. – 2026. – № 1 (101). – С. 71–84. – DOI: 10.17212/2782-2001-2026-1-71-84.

For citation:

Vorobyev M.S., Orekhov V.A., Bobkov V.I. Programma chislennogo rascheta energoobespecheniya aglomeratsionnykh pechei dlya obrabotki rudnogo fosfornogo syr'ya [Numerical calculation software for energy management of sintering ovens used in phosphate ore processing]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2026, no. 1 (101), pp. 71–84. DOI: 10.17212/2782-2001-2026-1-71-84.