

М.Д. КОВАЛЬЧУК, студент гр. ЭАм-251 (КузГТУ)
Научный руководитель И.А. ЛОБУР, к.т.н., доцент (КузГТУ)
г. Кемерово

МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ФЛОТАЦИИ И ТЯЖЕЛОСРЕДНОГО ОБОГАЩЕНИЯ

Угольные обогатительные фабрики (УОФ) представляют собой сложные технологические комплексы, включающие дробильно-сортировочное, обогатительное и обезвоживающее оборудование. Основные технологические узлы: щековые и валковые дробилки, грохоты, тяжелосредные сепараторы и гидроциклоны (для фракций 6-100 мм), флотомашины (для класса – 0,5 мм), сгустители, центрифуги и ленточные конвейеры. Тяжелосредное обогащение занимает одно из ведущих мест в углеобогатительной отрасли, что обусловлено ухудшающимся качеством добываемых углей и высокими технико-экономическими показателями этого процесса [1].

Процессы флотации и тяжелосредного обогащения отличаются высокой чувствительностью к изменению свойств исходного сырья (золистости, влажности, грансостава), что делает их приоритетными объектами автоматизации. Повышение экономической эффективности работы современных углеобогатительных фабрик определяет необходимость создания адаптивных систем управления технологическими процессами. Применение автоматических систем управления на обогатительных фабриках способствует увеличению выхода концентрата, стабилизации его качества и, соответственно, уменьшению потерь угля [3].

Современные методы автоматизации

1. Программируемые логические контроллеры и АСУ ТП

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) составляют основу автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Они обеспечивают управление насосами, клапанами, конвейерами и дозаторами реагентов. В комплексе с SCADA-системами ПЛК формируют централизованную платформу мониторинга и управления. По данным Минэнерго РФ, более 85 % крупных УОФ России оснащены такими системами [2].

2. Системы КИПиА

Современные средства КИПиА включают: радиоизотопные и микроволновые плотномеры; лазерные гранулометрические анализаторы; онлайн-анализаторы зольности на основе рентгеновской флуоресценции. Внедрение КИПиА позволяет снизить разброс зольности товарного кон-

центрата. [3].

3. Машинное зрение

Системы машинного зрения применяются для анализа пенообразования в флотомашинах, контроля загрязнённости конвейерных лент и распознавания уровня заполнения бункеров. Пилотные проекты на УОФ продемонстрировали снижение количества некондиционного продукта на 22-27 % [4].

4. Цифровые двойники

Цифровой двойник (ЦД) – это киберфизическая система, объединяющая физический объект и его виртуальную модель. Создав цифрового двойника оборудования, операторы могут отслеживать его работу, выявлять потенциальные проблемы и планировать мероприятия по техническому обслуживанию. Согласно методологии, ЦД строится на трёх уровнях: физическом (датчики, ПЛК), цифровом (математические модели) и аналитическом (модули ИИ) [5].

Внедрение и использование ЦД обычно даёт увеличение качества выходящего продукта на 2-5%, а также снижение частоты выхода из строя оборудования на 2-3% [5].

5. Машинное обучение и искусственный интеллект

В последние годы в угольной отрасли активно применяются методы машинного обучения. Наиболее эффективны: Random Forest, XGBoost – для прогноза зольности; CNN – для анализа изображений пены; LSTM – для обработки временных рядов. На УОФ «Северсталь Уголь» ИИ-система корректирует плотность тяжёлой суспензии в реальном времени, повышая точность выполнения контрактных характеристик с 76 % до 93 % [6].

Комплексное внедрение цифровых решений на средней УОФ (2-3 млн т/год) даёт совокупный экономический эффект 250-400 млн руб./год [2, 7].

Промышленные цифровые платформы в парадигме «Индустрия 4.0»

Современная автоматизированная УОФ рассматривается как промышленная цифровая платформа – киберфизическая система, объединяющая операционные (ОТ) и информационные (ИТ) технологии. Ключевые признаки такой платформы: сбор данных в реальном времени через IoT-устройства; прогнозная аналитика на основе цифровых двойников и ИИ; адаптивное управление без постоянного участия оператора.

Пилотные проекты на УОФ «Северсталь Уголь» и «Колмар» показали, что полностью автоматизированные секции позволяют сократить численность операторского персонала на 40 % и повысить коэффициент готовности оборудования до 96 % [6, 7].

По прогнозу Минэнерго РФ, к 2030 году 70 % крупных УОФ России будут функционировать на базе таких платформ [2].

Заключение

Автоматизация процессов флотации и тяжелосредного обогащения эволюционировала от локального регулирования к созданию киберфизических систем. Современные методы – ПЛК, КИПиА, машинное зрение, цифровые двойники и ИИ – обеспечивают не только стабильность, но и адаптивность к изменяющимся свойствам сырья. Практика российских предприятий подтверждает высокую экономическую эффективность: рост извлечения на 2,7-5 %, снижение расхода реагентов на 9-15 %, повышение качества продукции.

Дальнейшее развитие отрасли будет связано с глубокой интеграцией технологий машинного обучения и переходом к полностью цифровым, автономным производствам в рамках парадигмы «Индустрия 4.0».

Список литературы:

1. Клейн, М.С. Технология обогащения углей: учебное пособие / М.С. Клейн, Т.Е. Вахонина. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 128 с.
2. Казанцева, Е.Г., Лямкин И.И. Особенности цифровой трансформации в угольной промышленности России // Уголь, 2023. – С. 59–63. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-tsifrovoy-transformatsii-v-ugolnoy-promyshlennosti-rossii/viewer> (дата обращения: 25.10.2025).
3. Козлов Е.В., Козлов В.А. Структура адаптивных систем управления процессами обогащения угля // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2010. – С. 52–55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-adaptivnyh-sistem-upravleniya-protsessami-obogascheniya-uglya/viewer> (дата обращения: 20.10.2025).
4. Линник Ю.Н., Линник В.Ю. Обзор современного состояния в области технологий машинного обучения, используемых при добыче и обогащении полезных ископаемых // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2025. – № 4. – С. 134–144. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sovremennogo-sostoyaniya-v-oblasti-tehnologiy-mashinnogo-obucheniya-ispolzuemyh-pri-dobyche-i-obogaschenii-poleznykh/viewer> (дата обращения: 20.10.2025).
5. Братарчук Т.В., Гладышев А.Г., Лукичев К.Е., Данилькевич М.А., Комов В.Э. Разработка и внедрение цифровых двойников для оптимизации и устойчивого развития угольной промышленности России // Уголь, 2024. – С. 108–116. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-vnedrenie-tsifrovyyh-dvoynikov-dlya-optimizatsii-i-ustoychivogo-razvitiya-ugolnoy-promyshlennosti-rossii/viewer> (дата обращения: 25.10.2025).
6. Антипенко Л.А., Сарин Н.Г. Автоматизированное предприятие - углеобогадательная фабрика будущего // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2017. – № 2. – С. 5–13. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannoe-predpriyatie-ugleobogatitelnaya-fabrika-buduschego/viewer>) (дата обращения: 20.10.2025).

Информация об авторах:

Ковальчук Михаил Дмитриевич, студент гр. ЭАм-251, КузГТУ,
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, mishamkd42@gmail.com

Лобур Ирина Анатольевна, к.т.н., доцент, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, loburia@kuzstu.ru