

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ФЛОТАЦИИ НА ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКЕ

¹К. Акишев[✉], ²А. Подвалов[✉], ¹А. Зейнуллин[✉], ¹Е. Айбульдинов[✉], ¹М. Оспанова[✉],
²А. Нурмаганбетов[✉], ²М. Чагай[✉], ²М. Айтиева[✉], ²С. Хусаинова[✉], ³Н. Токтар[✉]

¹Казахский университет технологии и бизнеса им.К.Кулажсанова, Астана, Казахстан,

²ОО AG Tech, Астана, Казахстан,

³Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан

✉ Корреспондент-автор: akmail04cx@mail.ru, ospanova_madi_59@mail.ru

В статье представлена разработка программно-аппаратного комплекса (ПАК) для интеллектуального управления процессом флотации на обогатительной фабрике для условий изменчивости свойств рудного сырья и нестандартности технологических режимов. Актуальность исследования обусловлена прежде всего, что используемые в настоящее время традиционные системы регулирования на обогатительных предприятиях, не обеспечивают эффективное поддержание оптимальных параметров флотации при изменениях гранулометрического и химического состава пульпы, включая энергоэффективность и экологическую безопасность производства.

Целью исследования, является разработка архитектуры ПАК, сочетающей машинное зрение, мультисенсорный мониторинг, гибридные модели искусственного интеллекта, обеспечивающие поддержку и автоматизацию принятия управляющих решений. Объектом исследования является технологический контур флотации Нурказганской обогатительной фабрики. В работе применены методы компьютерного зрения, глубокого машинного обучения (CNN, LSTM, Temporal Transformer), нейросети (PINNs) и методы многокритериальной оптимизации режимов.

Качественные результаты заключаются в переходе от ограниченного мониторинга к интегрированному цифровому контуру управления, с возможностями учёта временной динамики процесса, применимости к изменению свойств руды, интеграции с действующими системами АСУ-ТП и SCADA. Количественные оценки по данным предпроектного обследования и моделирования испытаний, создают предпосылки по снижению аварийных остановок оборудования до 10-15 %, сокращение простоев до 15%, уменьшение расхода реагентов на 5–10 %, повышение извлечения полезных компонентов от 1–3 %.

Практическая значимость исследования заключается в возможности внедрения и масштабирования разработанной ПАК на других предприятиях горнометаллургического комплекса Республики Казахстан.

Ключевые слова: флотация, программно-аппаратный комплекс, интеллектуальное управление, машинное зрение, мультисенсорный мониторинг, гибридные модели ИИ, предиктивная аналитика

**БАЙЫТУ ФАБРИКАСЫНДА ФЛОТАЦИЯ ПРОЦЕСІН БАСҚАРУДЫҢ
БАҒДАРЛАМАЛЫҚ-АППАРАТТЫҚ КЕШЕНІН ӨЗІРЛЕУ**

¹К. Акишев[✉], ²А. Подвалов, ²А. Зейнуллин, ¹Е. Айбульдинов, ¹М. Оспанова[✉], ²А. Нұрмағанбетов,
²М. Чагай, ²М. Айтиева, ²С. Хусаинова, ³Н. Токтар

¹Қ.Құлажсанова ат. Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,

²AG Tech ЖШС, Астана, Қазақстан,

³Торайгыров университеті, Павлодар, Қазақстан,

e-mail: akmail04cx@mail.ru, ospanova_madi_59@mail.ru

Мақалада кен шикізаты қасиеттерінің өзгергіштігі және технологиялық режимдердің стандарттылығы жағдайлары үшін байыту фабрикасында флотация процесін интеллектуалды басқаруға

арналған бағдарламалық-аппараттық кешенді (ПАК) әзірлеу ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі, ең алдымен, байыту кәсіпорындарында қолданылатын дәстүрлі реттеу жүйелері целлюлозаның гранулометриялық және химиялық құрамындағы өзгерістер, соның ішінде энергия тиімділігі мен өндірістің экологиялық қауіпсіздігі кезінде флотацияның оңтайлы параметрлерін тиімді сақтауды қамтамасыз етпейтіндігіне байланысты.

Зерттеудің мақсаты-басқару шешімдерін қабылдауды қолдау мен автоматтандыруды қамтамасыз ететін машиналық көруді, мультисенсорлық бақылауды, жасанды интеллекттің гибриді модельдерін біріктіретін ПАК архитектурасын әзірлеу. Зерттеу нысаны Нұрқазған байыту фабрикасының флотациясының технологиялық контуры болып табылады. Жұмыста компьютерлік көру әдістері, терең Машиналық оқыту (CNN, LSTM, Temporal Transformer), нейрондық желі (pinns) және режимдерді көп критериялы оңтайландыру әдістері қолданылады.

Сапалық нәтижелер шектеулі мониторингтен процестің уақытша динамикасын есепке алу мүмкіндіктерімен, кендердің қасиеттерін өзгертуге, қолданыстағы АБЖ-ТП және SCADA жүйелерімен интеграциялауға мүмкіндік беретін интеграцияланған цифрлық басқару тізбегіне көшуден тұрады. Жобалау алдындағы тексеру және сынақтарды модельдеу деректері бойынша сандық бағалау жабдықтың авариялық тоқтауын 10-15% - ға дейін төмендету, тоқтап қалуды 15% - ға дейін қысқарту, реагенттер шығынын 5-10% - ға азайту, пайдалы компоненттерді алуды 1-3% - дан артыру жөнінде алғышарттар жасайды.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы Қазақстан Республикасының тау-кен-металлургия кешенінің басқа кәсіпорындарында әзірленген ПАК енгізу және масштабтау мүмкіндігінде жатыр.

Түйін сөздер: флотация, бағдарламалық-аппараттық кешен, интеллектуалды басқару, машиналық көру, мультисенсорлық мониторинг, гибриді ai модельдері, болжамды аналитика.

DEVELOPMENT OF A HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR CONTROLLING THE FLOTATION PROCESS AT A PROCESSING PLANT

¹K. Akishev[✉], ²A. Podvalov, ¹A. Zeynullin, ¹Y. Aibuldinov, ¹M. Ospanova[✉], ²A. Nurmaganbetov, ²M. Chagay, ²M. Aitiyeva, ²S. Khussainova ³N. Toktar

¹K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,

²AG Tech LLP, Astana, Kazakhstan,

³Toraigrov University, Pavlodar, Kazakhstan,

e-mail: akmail04cx@mail.ru, ospanova_madi_59@mail.ru

The article presents the development of a software and hardware complex (PAK) for intelligent control of the flotation process at a processing plant for conditions of variability in the properties of ore raw materials and non-standard technological modes. The relevance of the study is primarily due to the fact that the currently used traditional control systems at processing plants do not effectively maintain optimal flotation parameters with changes in the granulometric and chemical composition of the pulp, including energy efficiency and environmental safety of production.

The purpose of the research is to develop a management system architecture that combines machine vision, multisensory monitoring, and hybrid artificial intelligence models that support and automate management decision-making. The object of the study is the technological contour of the flotation of the Nurkazgan processing plant. The work uses methods of computer vision, deep machine learning (CNN, LSTM, Temporal Transformer), neural networks (PINNs) and methods of multi-criteria mode optimization.

The qualitative results consist in the transition from limited monitoring to an integrated digital control loop, with the ability to take into account the temporal dynamics of the process, applicability to changes in ore properties, integration with existing automated process control systems and SCADA. Quantitative estimates based on data from the pre-design survey and test modeling create prerequisites for reducing

equipment failures by up to 10-15%, reducing downtime by up to 15%, reducing reagent consumption by 5-10%, and increasing the extraction of useful components from 1-3%.

The practical significance of the research lies in the possibility of implementing and scaling the developed PAK at other enterprises of the mining and metallurgical complex of the Republic of Kazakhstan.

Keywords: flotation, hardware and software complex, intelligent control, machine vision, multisensory monitoring, hybrid AI models, predictive analytics.

Введение. Горно-обогатительная промышленность является одной из ключевых отраслей экономики Республики Казахстан с наиболее ресурсоёмких и технологически сложных сфер. Процесс флотации в процессе переработки руды, относится к наиболее энергоёмким и чувствительным к изменениям, к которым относятся: эффективность разделения определяется множеством взаимосвязанных факторов — минералогическим составом, гранулометрией, химическим составом пульпы, режимом аэрации, гидродинамикой, дозированием реагентов и характеристиками пены.

В связи изменчивостью свойств сырья и износа технологического оборудования, используемые контуры регулирования (ПИД и каскадные регуляторы) не учитывают в полном объеме нелинейность и нестандартность процесса, а это прежде всего приводит к изменениям объема извлечения и перерасходу реагентов. Современные требования предъявляемые к устойчивости производства, энергоэффективности, экологическим показателям, устанавливают возможность перехода к интеллектуальным системам управления, опирающихся на данные и гибридные модели [1–3].

Предпроектное обследование на Нурказганской обогатительной фабрике показало, что аварийные остановки и потери, связанные с временем простоя, формирует прямую экономическую мотивацию к внедрению предиктивной диагностики и интеллектуального управления на всех этапах технологического процесса обогащения руды (рис.1).

В этой связи разработка программно-аппаратного комплекса (ПАК), сочетающего машинное зрение, сенсорные системы, ИИ алгоритмы, является практико-ориентированным путём повышения, как технологической устой-

чивости, так и эффективности флотации.

Целью настоящего исследования подготовка архитектуры ПАК, сочетающей машинное зрение, мультисенсорный мониторинг, гибридные модели искусственного интеллекта, обеспечивающие поддержку, автоматизацию принятия управляющих решений процессом флотации с возможностью промышленного внедрения на других предприятиях горнометаллургического комплекса Республики Казахстан.

На горнообогатительных предприятиях процесс флотации является одним из важных этапов обогащения руды, который определяет качество конечного концентрата, а также эффективность технологической схемы переработки руды. Процесс флотации процесса обусловлен множеством взаимосвязанных физико-химических и гидродинамических факторов-это минералогический состав, гранулометрия руды, свойства пульпы, режим аэрации, характеристики пузырьков и пенного слоя, особенности реагентных взаимодействий. Нелинейность и нестандартность приведенных факторов, затрудняют использование традиционных методов регулирования и требуют гибких и адаптивных подходов к управлению технологическим процессом флотации.

В настоящее время на большинстве горнометаллургических предприятий, управление процессом флотации основывалось на локальных ПИД-регуляторах и правилах, опирающихся только на профессиональный и практический опыт технического персонала. формируемых на основе опыта технологического персонала. Рост производственных мощностей, высокие стандарты связанные с повышением качества управления, изменения характеристик перерабатываемого сырья, требуют перехода к системам, обеспечивающим оптимального управления. В на-

стоящее время, достаточно широко внедряются методы расширенного управления процессами (APC), экономически ориентированного управ-

ления (Economic MPC), а также цифровых двойников промышленных объектов.



Рис.1 - Нурказганская обогатительная фабрика

Развитие автоматики, промышленной электроники, приборов контроля и измерения, стимулирует активное внедрение систем машинного зрения, онлайн-анализаторов состава, интеллектуальных датчиков на основе (IoT-технологий), позволяет расширить количество и объём данных по текущему состоянию процесса флотации, построения софт-сенсоров качества, предиктивных моделей, адаптивных алгоритмов оптимизации реагентных режимов.

В последние годы, как в Республике Казахстан, так и за рубежом, наблюдается рост научных исследований, связанных с применением методов машинного обучения, глубоких нейронных сетей, обучения с подкреплением, гибридных физически информированных моделей для анализа и управления процессом флотации. В проводимых исследованиях акцент смещается

от изолированных алгоритмов обработки изображений, регрессионных моделей к комплексным программно-аппаратным системам, с возможностью внедрения в контуры АСУ ТП предприятия.

В этой связи систематизация подходов по разработке модулей программно-аппаратных комплексов, функциям (измерения, анализа данных, оптимальное управление, валидация) - позволяет определить тенденции, перспективные направления развития интеллектуальных систем управления флотационными процессами, логику современных исследований.

В научных исследованиях управлением процессом флотации, доминируют направления: анализа изображений пены, soft-сенсоры качества, предиктивное управление (MPC/EMPC), обучение с подкреплением (RL), цифровые

двойники.

Для казахстанских предприятий на сегодняшний день остается проблемой, недостаточная интеграция ИИ-моделей в реальные контуры АСУ-ТП, ограниченность данных промышленного уровня. В этой связи актуальна разработка ПАК, ориентированного на внедрение и масштабирование.

Современные исследования зарубежных и казахстанских ученых, показывают, что надежное управление флотацией требует интеграции источников данных получаемых от: технологических датчиков, систем машинного зрения, лабораторных анализов.

Публикации [1,2], доказали, что видеопотоки являются наиболее информативным онлайн-индикатором состояния пенного слоя, тогда как химические анализы используются для калибровки и валидации моделей. При этом подчеркивается необходимость синхронизации данных во времени, компенсации задержек измерений, в это критично для построения корректных софтверных сенсоров качества [3].

Работы [4,5] основывались на ручных признаках (размер пузырьков, цвет, текстура), но современные исследования переходят к глубоким сверточным сетям для сегментации и извлечения признаков из изображений пены. Достоверно, что архитектуры U-Net++ и подобные обеспечивают устойчивое выделение границ пузырьков и оценку скорости движения пены [5].

Исследование [6] демонстрируют эффективность Vision Transformer, attention-механизмов для повышения обобщающей способности моделей и интерпретируемости результатов.

Построение софтверных сенсоров для прогнозирования извлечения и качества концентрата на основе операционных и визуальных параметров, включение физико-химических характеристик пульпы, свойств пены повышает точность прогнозирования по сравнению с моделями, использующими только технологические переменные отмечено в [5], а преимущество временных моделей (LSTM, Temporal CNN) для учета динамики процесса исследовано в работе [6].

Традиционные регрессионные модели дозирования реагентов, описанные в работе [7] заменяются методами, учитывающими структурные связи между элементами флотационного контура, в частности графовыми нейронными сетями, позволяющими оптимизировать дозирование реагентов в многокамерных каскадах флотации. Эти модели позволяют учитывать пространственные и временные зависимости между камерами, что важно при изменении свойств и характеристик руды.

В исследованиях [8,9] для замыкания контура управления применялись методы reinforcement learning и model predictive control, что позволяет автоматизировать настройки управляющих воздействий с учетом прогноза состояния процесса.

Гибридные подходы, сочетающие физические модели, обучение с подкреплением, повышают устойчивость управления при смене режимов и типов руды, показаны в работе [10].

Общие тенденции и направления дальнейших исследований.

Анализ литературы позволяет выделить следующие устойчивые тенденции характерные для управления процессом флотации:

- мультисенсорное слияние данных (видео + датчики + лаборатория) [1,2,3];
- развитие глубоких attention-моделей для повышения точности и интерпретируемости [6,2];
- применение графовых, временных моделей для оптимизации реагентных режимов [7];
- интеграция ИИ в контуры Economic MPC, гибридного управления [4, 5];
- изменение фокуса исследований от лабораторных экспериментов к промышленной валидации и устойчивости моделей к изменению условий [9, 11].

Современные научные исследования управления процессом флотации показывает переход от локальных методов мониторинга к комплексным интеллектуальным системам, с возможностью внедрения в контуры АСУ-ТП предприятия.

Большое внимание уделяется машинному зре-

нию для анализа пенного слоя, построению софт-сенсоров качества, применению временных моделей для прогнозирования технологических показателей. В то же время одним из перспективных направлений управления процессом флотации, является мультисенсорное слияние данных, которое объединяет видеопотоки и технологические параметры, повышающее устойчивость моделей к изменению свойств и характеристик руды, развитие методов оптимизации реагентных режимов, экономически ориентированного управления с использованием гибридных физико-информированных моделей. Существуют ограничения, которые связаны с промышленными датасетами, изменениями условий переработки, интерпретируемостью сложных моделей, ограниченностью промышленной валидации в контуре управления.

Все указанные выше факторы, формируют научную и практическую среду для разработки программно-аппаратных комплексов интеллектуального управления флотацией, ориентированных на промышленное внедрение и масштабирование.

Материалы и методы. Объектом исследования является технологический контур флотации Нурказганской обогатительной фабрики, включающий флотационные машины, реагентное хозяйство, систему аэрации и контуры регулирования уровня пульпы. Процесс характеризуется высокой динамичностью и нелинейными зависимостями между входными параметрами и показателями качества концентрата.

Программно-аппаратный комплекс (ПАК) реализован как многоуровневая распределённая система:

- (1) уровень технологического объекта;
- (2) уровень датчиков и исполнительных механизмов;
- (3) уровень локального управления (PLC);
- (4) серверный уровень агрегации и аналитики;
- (5) уровень оператора (АРМ).

Связь между уровнями осуществляется по

промышленным протоколам OPC UA и TCP/IP.

Система компьютерного зрения реализована на базе IP-камер промышленного исполнения, установленных над флотационными камерами для наблюдения за поверхностью пены. Сервер выполняет сбор потоковых данных, хранение и инференс нейросетевых моделей. Предусмотрено резервирование питания и сетевых каналов.

Программное обеспечение (ПО) ПАК включает модули:

- модуль первичного сбора данных;
- модуль синхронизации и фильтрации сигналов;
- модуль компьютерного зрения;
- модуль предиктивной аналитики;
- модуль оптимизации режимов;
- интерфейс оператора.

Для анализа изображений пены использованы сверточные нейронные сети (CNN) (сегментации, извлечение визуальных признаков).

Для прогнозирования временной динамики параметров применяются LSTM и Temporal Transformer модели, для повышения устойчивости прогнозов к изменениям условий используется концепция физически информированных нейросетей (PINNs), которые учитывают законы сохранения массы и кинетику флотации.

Результаты предиктивных моделей применяются:

- для формирования рекомендаций;
- установки регуляторов по расходу воздуха;
- дозам реагентов;
- уровню пульпы.

Возможны два режима: рекомендательный (оператор подтверждает решения) и автоматический (на основе промышленного контроллера).

Интеграция ПАК в существующие АСУ ТП может реализоваться через сервер верхнего уровня и OPC-интерфейсы, обеспечивающие двусторонний обмен данными между PLC, SCADA и аналитическими модулями ПАК, архитектура позволяет внедрять интеллектуаль-

ные алгоритмы без изменения базовых контуров регулирования и соответствует требованиям промышленной безопасности.

Обсуждение и результаты. Модульная структура ПАК позволяет связать визуальные и технологические данные, что принципиально отличает систему от изолированных решений машинного зрения. Интеграция временных моделей обеспечивает учёт динамики процесса, что важно при колебаниях состава и характеристик руды.

С точки зрения промышленной значимости разработка ориентирована на снижение аварийных остановок, стабилизацию технологических режимов и сокращение расхода реагентов. Экономический эффект ожидается за счёт повышения извлечения и уменьшения потерь металла в хвостах.

На представленном рис.2 показана архитектура сбора, передачи и обработки данных в составе программно-аппаратного комплекса мониторинга и аналитики технологического процесса, интегрированного в систему автоматизированного управления предприятием. В качестве первичного источника информации используется уровнемер УЛИМ-3D-64, предназначенный для непрерывного измерения уровня и распределения рудного материала в технологических емкостях и бункерах. Датчик формирует цифровые сигналы измерений и передает их по промышленному протоколу Modbus RTU через интерфейс RS-485, что обеспечивает устойчивую связь в условиях промышленной среды и электромагнитных помех.

Данные от уровнемера поступают на промышленную вычислительную платформу (ПЭВМ), выполняющую функции сервера сбора и предварительной обработки информации. На этом уровне функционирует OPC-сервер Limaco OPC Server, обеспечивающая преобразование протоколов и унифицированный доступ прикладных программ к данным измерений.

Использование OPC-интерфейса позволяет стандартизировать обмен данными и обеспечить совместимость ПАК с существующими си-

стемами SCADA и другими компонентами АСУ ТП предприятия.

Прикладное программное обеспечение аналитики рудного материала, реализует алгоритмы обработки временных рядов, фильтрации сигналов, анализа распределения материала и выявления отклонений технологических режимов. В рамках этого модуля могут применяться методы статистического анализа, машинного обучения и предиктивной диагностики, направленные на раннее выявление опасных состояний, таких как неравномерная загрузка, зависание материала или приближение к аварийным режимам.

Результаты обработки данных сохраняются в базе данных, предназначенной для долговременного хранения исторических параметров, формирования отчетности и последующего обучения интеллектуальных моделей. Наличие централизованного хранилища обеспечивает возможность ретроспективного анализа, построения трендов и интеграции данных с другими производственными подсистемами, включая LIMS и MES.

Параллельно реализован пользовательский интерфейс (UI), обеспечивающий визуализацию текущего состояния технологического объекта, отображение карт распределения материала, тревожных сигналов и рекомендаций оператору. Интерфейс ориентирован на использование технологическим персоналом и может быть интегрирован в существующую SCADA-систему или функционировать как отдельное рабочее место оператора ПАК. Дополнительно предусмотрен модуль удаленного доступа, обеспечивающий возможность дистанционного мониторинга состояния системы, диагностики оборудования и обновления программных компонентов. Это особенно важно для сопровождения промышленной эксплуатации, оперативного реагирования на неисправности и централизованного управления несколькими объектами.

Представленная архитектура демонстрирует принцип надстройки интеллектуального уровня над существующей АСУ-ТП, обеспечивая внедрение аналитических и предиктивных функций без необходимости изменения базовых контуров

управления, что существенно снижает риски и затраты при промышленном внедрении.

На рис.3 представлена архитектура программно-аппаратного комплекса мониторинга и аналитики технологического процесса, по-

строенная по принципу многоуровневого разделения функций между измерительным, системным и прикладным уровнями. Архитектура ориентирована на интеграцию интеллектуальных модулей в существующую АСУ ТП без изменения базовых контуров управления.

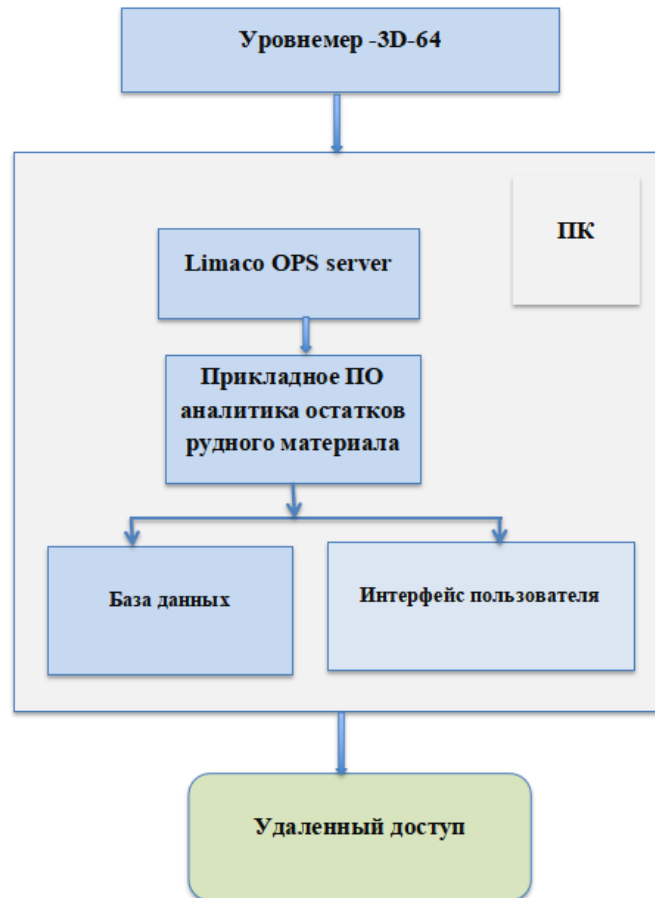


Рис.2 - Структурная схема ПАК управления процессом флотации

На нижнем уровне располагаются измерительные устройства, в частности уровнемер, выполняющий непрерывный контроль распределения и уровня рудного материала. Измерения передаются в системное программное обеспечение Limaco OPC Server по промышленным протоколам, что обеспечивает надежный сбор данных в условиях промышленной эксплуатации и унифицированный доступ к параметрам для вышестоящих уровней системы.

Системный уровень реализует функции агрегации и маршрутизации данных, выполняя роль промежуточного слоя между оборудованием и

прикладными сервисами. Использование OPC-сервера позволяет абстрагироваться от конкретных типов датчиков и протоколов, обеспечивая масштабируемость архитектуры и возможность подключения дополнительных источников данных без модификации прикладных алгоритмов.

На прикладном уровне размещён модуль детекции остатков рудного материала, реализующий алгоритмы обработки измерений, формирования карт распределения материала и выявления отклонений технологических режимов. Этот модуль выполняет основную аналитическую функцию ПАК и может включать как де-

терминированные методы обработки сигналов, так и элементы машинного обучения и предиктивной аналитики.

Результаты обработки данных сохраняются в централизованном хранилище, обеспечивающем накопление исторической информации, поддержку аналитических отчётов и возможность последующего обучения интеллектуальных моделей. Параллельно данные передаются в пользовательский интерфейс, предназначенный для визуализации состояния технологического объекта, отображения тревожных сигналов и поддержки принятия решений оператором.

Архитектура предусматривает логическое разделение каналов сбора данных, аналитики и визуализации, что повышает устойчивость системы и упрощает сопровождение. В случае отказа прикладных модулей базовый уровень измерений и системного ПО, продолжает функциони-

ровать, что соответствует требованиям промышленной надежности.

Разработанная в рамках исследования архитектура реализует принцип надстройки интеллектуального уровня над действующей АСУ ТП, создавая основу для внедрения предиктивных функций и дальнейшего развития цифрового контура управления технологическим процессом.

На рис.4 представлена схема установки камер машинного зрения над флотационными машинами для мониторинга поверхности пены. Камеры закреплены на жёсткой металлической раме и ориентированы под оптимальным углом обзора, обеспечивающим захват зоны максимальной информативности пенного слоя. Передача видеопотоков осуществляется в промышленный ПЛК/сервер по проводным каналам связи для последующей обработки алгоритмами компьютерного зрения и предиктивной аналитики.

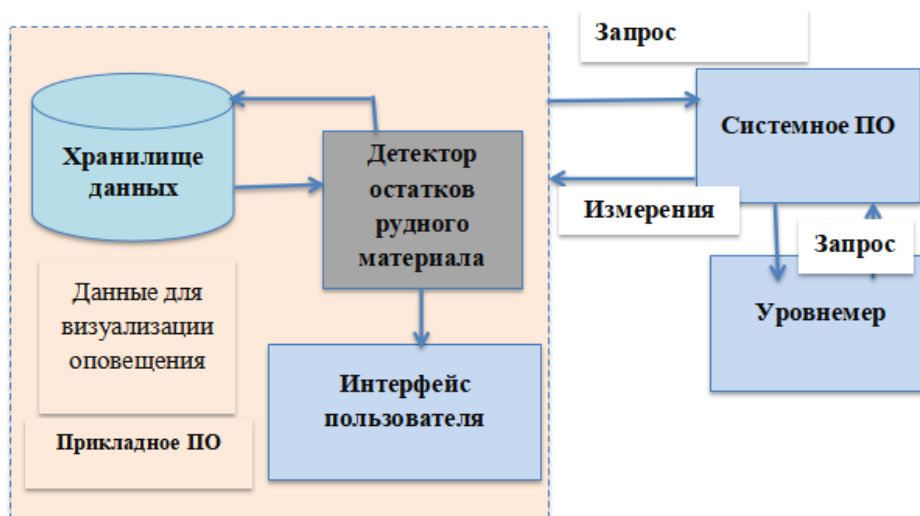


Рис.3 - Архитектура программных модулей ПАК «Флотация»

С учётом высокой запылённости и влажности производственной среды предусмотрено использование герметичных корпусов камер со степенью защиты не ниже IP66, а также защитных стекол с антиадгезионным покрытием. Для поддержания стабильного качества изображений может применяться система воздушной продувки (air-purge), предотвращающая оседа-

ние пыли и брызг пульпы на оптические поверхности.

Дополнительно возможна установка автоматических очистителей защитных экранов и организация регламентного обслуживания, включающего контроль загрязнения и калибровку камер, что обеспечивает устойчивую работу системы в длительном промышленном режиме.

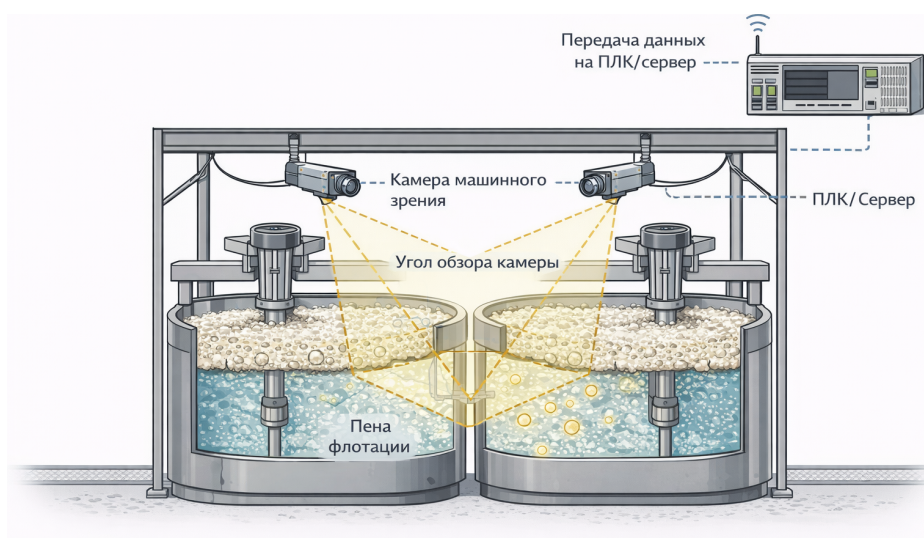


Рис.4 - Схема установки камер машинного зрения над флотационными машинами

На рис.5 представлен циклический алгоритм обновления карты состояний технологического процесса, используемый в программно-аппаратном комплексе управления флотацией. Работа алгоритма начинается с этапа ожидания заданного интервала времени N , который определяет период дискретизации и синхронизацию с частотой поступления данных от датчиков и систем машинного зрения. Такой подход обеспечивает стабильную работу системы и предотвращает перегрузку вычислительных модулей.

На следующем этапе выполняется получение измерений за интервал M , включающих значения технологических параметров (уровень пульпы, расход воздуха, дозирование реагентов, плотность) и вычисленные визуальные признаки, полученные из видеопотоков. Затем осуществляется загрузка последней сохранённой карты состояний, содержащей агрегированную информацию о предыдущем состоянии процесса и служащей основой для отслеживания динамики изменений.

Этап обновления карты состояний заключается в интеграции новых измерений с историческими данными, применении фильтрации и расчёте производных показателей, характеризующих устойчивость и отклонения режима флотации. Обновлённая карта состояний сохраняется в базе данных или оперативной памяти и используется как вход для модулей предиктивной

аналитики и оптимизации управляющих воздействий.

Таким образом, схема реализует механизм непрерывного накопления и актуализации информации о процессе, что обеспечивает адаптивность интеллектуального управления и позволяет учитывать временную динамику технологических параметров при формировании управляющих решений.



Рис.5 - Поток данных: от сенсоров и видео к модулям предиктивной аналитики

Алгоритм автоматизированного управления процессом флотации рис.6 реализует замкнутый цикл интеллектуального регулирования на основе интеграции данных от технологических сенсоров, систем машинного зрения и анализаторов состава руды. На этапе сбора данных осуществляется непрерывный поток информации от датчиков pH, плотности, расхода потоков, а также видеопотоки с камер машинного зрения и данные онлайн-анализаторов химического состава. Все измерения синхронизируются по времени и проходят первичную фильтрацию для подавления шумов и исключения выбросов.

Далее данные поступают в модуль анализа и предсказания, где выполняется предобработка, нормализация и формирование объединённого вектора признаков. Для оценки состояния процесса и прогнозирования показателей качества используются модели искусственного интеллекта, включая искусственные нейронные сети (ANN), случайный лес (RF) и градиентный бустинг (GBM), а также временные модели для учета динамики технологических параметров. На этом этапе формируется прогноз извлечения металлов и содержания концентрата.



Рис.6 - Алгоритм автоматизированного управления процессом флотации

Результаты прогнозирования передаются в модуль оптимизации дозирования реагентов, в котором реализован алгоритм адаптивного управления с многокритериальной функцией цели. Оптимизация направлена на максимизацию извлечения полезных компонентов при одновременном снижении расхода реагентов и стабилизации уровня пульпы и аэрации. На основе текущих и прогнозных значений рассчитываются оптимальные установки для дозаторов реагентов и системы подачи воздуха.

Модуль управляющего воздействия передает сформированные установки в контуры АСУ ТП, обеспечивая регулирование подачи воздуха, распределения реагентов и корректировку уровня и состава пульпы во флотационных машинах.

Управляющие воздействия могут передаваться в рекомендательном или уавтоматическом режиме, что позволяет поэтапно внедрять интеллектуальное управление с сохранением контроля со стороны оператора.

На этапе мониторинга показателей флотации осуществляется оценка достигнутых результатов по ключевым показателям эффективности, включая извлечение металлов, содержание концентрата и общую эффективность процесса. Эти данные формируют канал обратной связи, который используется для коррекции моделей и адаптации параметров алгоритма, обеспечивая устойчивость управления при изменении свойств руды и внешних возмущениях. Таким образом, алгоритм реализует непрерывный

цикл адаптивного интеллектуального управления флотационным процессом.

Научная новизна настоящего исследования заключается в разработке и апробации программно-аппаратного комплекса управлением процессом флотации, основанного на интеграции машинного зрения, мультисенсорного мониторинга и гибридных интеллектуальных моделей в замкнутом контуре управления обогащательной фабрики.

В отличие от существующих решений, ориентированных преимущественно на анализ изображений флотационной пены или на отдельные soft-сенсоры технологических параметров, в данной работе предложена архитектура ПАК, обеспечивающая слияние разнородных потоков данных (видеопотоки, технологические датчики, параметры реагентного хозяйства) в едином пространстве признаков с учетом временной динамики процесса.

Выводы. Разработка программно-аппаратного комплекса управления процессом флотации подтверждает целесообразность перехода от существующих локальных контуров регулирования к интеллектуальным системам управления, объединяющим машинное зрение, мультисенсорный мониторинг и гибридные модели искусственного интеллекта.

В рамках выполненных исследований разработана многоуровневая архитектура ПАК, обеспечивающая интеграцию видеопотоков и технологических параметров в единый цифровой контур, реализованы модули предиктивной аналитики и оптимизации режимов, а также обеспечена совместимость с действующими системами АСУ- ТП и SCADA без необходимости их полной модернизации

Качественные результаты исследования выражаются в повышении информативности мониторинга, переходе к учету временной динамики

процесса и формировании основы для внедрения цифрового двойника флотационного контура. Количественные оценки, полученные на этапе предпроектного анализа и модельных испытаний, свидетельствуют о потенциальном снижении аварийных остановок оборудования на 10–15 %, уменьшении простоев, снижении удельного расхода реагентов на 5–10 % и росте извлечения полезных компонентов на 1–3 % за счет стабилизации технологических режимов.

Практическая значимость разработки заключается в возможности поэтапного внедрения ПАК в промышленную эксплуатацию, масштабируемости архитектуры и адаптации алгоритмов под различные типы руд и конфигурации флотационных машин, что делает предложенное решение применимым для широкого круга горно-обогатительных предприятий Республики Казахстан.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на формирование промышленного репрезентативного датасета, внедрение интерпретируемых моделей (SHAP, attention-механизмы) для повышения доверия технологического персонала к рекомендациям ИИ, а также на развитие мульти объективной оптимизации с учетом энергетических, экологических и экономических показателей. Перспективным направлением является расширение цифрового контура управления на смежные стадии переработки - измельчение, сгущение и обезвоживание, с формированием полноценного цифрового двойника обогатительной фабрики.

Финансирование. Исследования, представленные в настоящей статье выполнены в рамках ПЦФ BR28713037 «Разработка программно-аппаратного комплекса на базе технологий искусственного интеллекта для управления процессом флотации на горно-обогатительном предприятии».

Литература

1. Wen Z., Zhou Ch., Pan J., Nie T., Zhou Ch. Deep learning-based ash content prediction of coal flotation concentrate using convolutional neural network//Minerals Engineering. -2021. -Vol.174:107251. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107251.

2. Aldrich C., Liu X. Monitoring of Flotation Systems by Use of Multivariate Froth Image Analysis // Minerals. -2021. -Vol.11(7): 683. DOI 10.3390/min11070683.
3. Liu X., Aldrich C. Multivariate image processing in minerals engineering with vision transformers/Minerals Engineering. -2024.-Vol.208:108599.DOI 10.1016/j.mineng.2024.108599
4. Tian C., Tang Z., Zhang H., Xie Y., Dai Z. Reagent dosage inference based on graph convolutional memory perception network for zinc roughing flotation // Control Engineering Practice. -2024. -Vol.146: 105882. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.105882.
5. Hasidi O., Abdelwahed E.H., El Alaoui-Chrifi M.A. et al. Data-driven system for intelligent monitoring and optimization of froth flotation circuits using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms/Journal of Process Control. -2024 -Vol.137: 103198. DOI 10.1016/j.jprocont.2024.103198.
6. Quintanilla P., Neethling S., Brito-Parada P. Modelling for froth flotation control: A review // Minerals Engineering. -2021. -Vol.162: 106718. DOI 10.1016/j.mineng.2020.106718.
7. Quintanilla P., Navia D., Neethling S., Brito-Parada P. Experimental Implementation of an Economic Model Predictive Control for Froth Flotation // Computer Aided Chemical Engineering. -2024. -Vol.53. - P. 1759-1764. DOI 10.1016/B978-0-443-28824-1.50294-5.
8. Szmigiel A., Apel D.B., Skrzypkowski K. et al. Advancements in Machine Learning for Optimal Performance in Flotation Processes: A Review/Minerals. - 2024.-Vol.14(4):331. DOI 10.3390/min14040331.
9. Gomez-Flores A., Heyes G.W., Ilyas S., Kim H. Prediction of grade and recovery in flotation from physicochemical and operational aspects using machine learning models // Minerals Engineering. - 2022. - Vol.183: 107627. DOI 10.1016/j.mineng.2022.107627.
10. Qu J., Luukkanen S., Wan H. Machine vision-driven analysis of flotation froth properties: A comprehensive review of multidimensional feature extraction and intelligent optimization // Minerals Engineering. -2025. -Vol.233: 109591. DOI 10.1016/j.mineng.2025.109591.

Сведения об авторах

Акишев К. М. -к.т.н., ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: akmail04cx@mail.ru;

Подвалов А.Ю.- к.г.н, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: a.podvalov@ag-tech.kz;

Зейнуллин А.А.- д.т.н., профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: karim_57@mail.ru;

Айбульдинов Е.К.- PhD, профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: elaman_@mail.ru;

Оспанова М. К.- к.ф.м.н., Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru;

Нурмаганбетов А.С.- к.т.н., ассоциированный профессор, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, a.nurmaganbetov@ag-tech.kz;

Чугай М.А.- бакалавр, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: m.chagay@ag-tech.kz;

Айтиева М. И. -бакалавр, ТОО «AG Tech», Астана, Казахстан, m.aitiyeva@ag-tech.kz;

Хусаинова С. М.- магистр технических наук, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: s.khussainova@ag-tech.kz;

Токтар Н.А.- докторант, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан, e-mail: akanov44@yandex.ru.

Information about the authors

Akishev K. M. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (Associate Professor), K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: akmail04cx@mail.ru;

Podvalov A.- Candidate of Geographical Sciences, AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: a.podvalov@ag-tech.kz;

Zeynullin A.A.- Doctor of Technical Sciences, Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: karim_57@mail.ru;

Aibuldinov Y.- PhD, Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: elaman_@mail.ru;

Ospanova M.K.- Candidate of Physical and Mathematical Sciences, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru;

Nurmaganbetov A.- Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: a.nurmaganbetov@ag-tech.kz;

Chagay M.- Bachelor's degree, AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: m.chagay@ag-tech.kz;

Aitiyeva M.- Bachelor's degree, AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: m.aitiyeva@ag-tech.kz;

Khussainova S.- Master of Science in Engineering, Astana, Kazakhstan, e-mail: s.khussainova@ag-tech.kz

Toktar N.- doctoral student, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: akanov44@yandex.ru.