

УДК: 622.765.4:004.932

doi 10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.15

МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПУЗЫРЬКОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ ПЕННОМ СЛОЕ ФЛОТАЦИОННОЙ МАШИНЫ



Азизов Санжарбек Мухаммадович

Магистр, Инженер-программист «Навоийский ГМК» АО,
Навои, Узбекистан
E-mail: azizovlab@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-7696-0513



Кадиров Ёркин Баходирович

Доктор, PhD, Навоийский Государственный Горно-
технический Университет, Навои, Узбекистан
E-mail: naydki@mail.ru
ORCID ID: 0000-0001-7020-1842

Аннотация. В данной работе рассматриваются особенности применения методов машинного зрения для определения скорости пузырьков на поверхностном пенном слое флотационной машины. Проанализированы существующие методы измерения скорости пузырьков, их преимущества и недостатки, а также установлена корреляционная зависимость между скоростью пузырьков и временем флотации золота. В результате исследования сформирована система методов, позволяющая оптимально и достоверно определять скорость движения пузырьков в поверхностном пенном слое флотационной пульпы.

Ключевые слова: флотация, обогащения золота, машинное зрение, пенный слой, скорость пузырьков, анализ изображений.

FLOTATSIYA MASHINASINING SIRT KO'PIKLI QATLAMIDAGI PUFAKCHALAR TEZLIGINI HISOBBLASH USULLARI

Azizov Sanjarbek Muxammadovich

Magistr darajasi, Dasturiy ta'minot muhandisi, Navoiy kon-
metallurgiya kombinati AJ, Navoiy, O'zbekiston

Kadirov Yorqin Bahodirovich

Dotsent, PhD, Navoiy davlat konchilik va texnologiya universiteti,
Navoiy, O'zbekiston

Annotatsiya. Ushbu maqolada flotatsiya mashinasining sirt ko'pikli qatlamidagi pufakchalar tezligini aniqlash uchun kompyuter ko'rish usullarini qo'llanishi o'r ganildi. Pufakchalar tezligini o'lchashning mavjud usullari, ularning afzalliliklari va kamchiliklari tahlil qilinadi, shuningdek, pufakchalar tezligi va oltin flotatsiyasi vaqtiga o'rta sidagi korrelyatsiya tahlil qilindi. Tahlil natijasida flotatsiya pulpasingning sirt ko'pikli qatlamidagi pufakchalar harakati tezligini aniq va ishonchli aniqlash imkonini beruvchi usullar tizimi ishlab chiqildi.

Kalit so'zlar: kompyuter ko'rish, pufakchalar tezligi, flotatsiya mashinasi, ko'pikli qatlam, havo berish parametrlari, oltin flotatsiyasi, tasvir tahlili.

METHODS FOR CALCULATING BUBBLE VELOCITY IN THE SURFACE FOAM LAYER OF A FLOTATION MACHINE

Azizov Sanjarbek

Master's degree, Software Engineer, Navoi Mining and
Metallurgical Combine JSC, Navoi, Uzbekistan

Kadirov Yorqin

Docent, PhD, Navoi State University of Mining and Technology,
Navoi, Uzbekistan

Abstract. This study examines the application of computer vision methods for determining the velocity of bubbles in the surface froth layer of a flotation machine. Existing methods for measuring bubble velocity are analyzed, along with their advantages and disadvantages, and a correlation between bubble velocity and gold flotation time is established. As a result of the research, a system of methods has been developed that enables accurate and reliable determination of bubble motion speed in the surface froth layer of flotation pulp.

Keywords: computer vision, bubble velocity, flotation machine, froth layer, air supply parameters, gold flotation, image analysis.

Введение. Процесс флотации представляет собой гетерогенный физико-химический процесс, доказавший свою высокую эффективность при обогащении минерального сырья и полезных ископаемых [1, 5]. Флотация является одним из наиболее сложных процессов обогащения на горно-обогатительных предприятиях, особенно при переработке упорных сульфидных руд, характерных для Кызылкумского региона Республики Узбекистан. Процесс флотации предшествует процесс измельчения, где руда после двух стадий измельчения превращается в пульпу, которая подаётся во флотационную ячейку. В нижнюю часть ячейки подаётся воздух, образующий пузырьки, к которым избирательно прилипают частицы минералов благодаря различию их поверхностных свойств. Гидрофобные частицы минералов поднимаются вместе с пузырьками на поверхность, образуя пенный слой, тогда как гидрофильная пустая порода оседает на дно и удаляется в хвосты. Физический принцип флотации основан на различии способности поверхностей минералов смачиваться жидкостью [4]. На рисунке 1 схематично изображен процесс флотации.

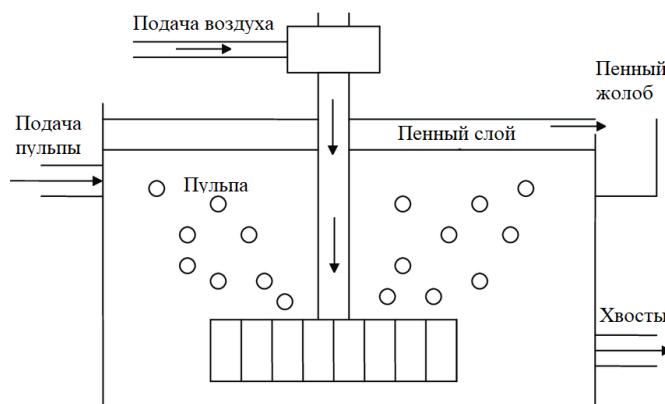


Рис.1. Принципиальная схема флотации.

Эффективность флотации во многом зависит от поведения пенной фазы, включая скорость движения пузырьков и скорость схода пены, которые напрямую влияют на извлечение ценных минералов [2, 11]. Непрерывный мониторинг поверхностного пенного слоя во флотационной машине является ключевой задачей для операторов флотационных участков. Однако из-за физиологических ограничений оператор флотации не всегда может своевременно выявлять изменения в динамике пены, особенно изменения скорости её движения.

Современные технологии, такие как машинное зрение и методы искусственного интеллекта, позволяют решать эту проблему, обеспечивая непрерывный контроль пенной фазы и извлечение её количественных характеристик: цвета, размера, геометрии, текстуры и скорости пузырьков [2]. В частности, показатели скорости схода пены и средней скорости пузырьков можно получить технологиями искусственного интеллекта точно, быстро и достоверно, что представляет собой ценную информацию о гидродинамике процесса.

Разработка и внедрение автоматизированных систем мониторинга и управления пеной, основанных на машинном зрении и методах машинного обучения, позволят повысить эффективность флотационных процессов и улучшить качество конечного концентрата [2,4].

В настоящей статье рассмотрена методика количественной оценки скорости пузырьков и схода пены в промышленных флотационных установках на основе анализа видеопотока пенной фазы. Использование многомерного анализа изображений позволяет извлекать ключевые характеристики пены и интегрировать

их в системы многомерного статистического контроля процессов (MSPC), обеспечивая надежный мониторинг гидродинамики флотационной камеры [2].

Методы. Сбор данных. В рамках исследования, направленного на определение методов вычисления скорости объектов, была проведена экспериментальная работа в цехе флотации гидрометаллургического завода, расположенного в Кызылкумском регионе. Для анализа использовалась опытная установка системы машинного зрения, осуществляющая мониторинг поверхностного пенного слоя в первой флотационной ячейке первой цепочки флотации.

В течение семи дней было собрано 168 видеофайлов и 120 030 фотографий. Для корреляции визуальных данных с технологическими параметрами, также были получены данные из АСУТП гидрометаллургического завода, включающие расход воздуха, количество реагента и уровень открытия задвижки флотационной машины.

Применение интегрированного подхода, сочетающего визуальный контроль и данные АСУТП, позволяет повысить точность анализа процессов флотации и оптимизировать методы вычисления скорости движущихся объектов [2].

Оборудования и программная среда:

Цифровая камера.

Для видеосъёмки применялась камера Dahua HAC-HFW2509TU-A-LED с частотой кадров 25 FPS, обеспечивающая стабильную съёмку и высокое качество изображения для анализа движения объектов.

Таблица 1.

Характеристика серверной платформы

Компонент	Характеристика
Сервер	HPE ProLiant Compute DL384 Gen12, форм-фактор 2U
Процессор	2 × NVIDIA Grace Hopper (72-ядерный Arm Neoverse V2 + графический ускоритель NVIDIA Hopper)
Оперативная память	480 ГБ LPDDR5X + 144 ГБ NVMe на GPU; суммарно 1,2 ТБ унифицированной памяти
Хранилище	8 × EDSFF NVMe Gen5 SSD
Слоты расширения	4 × PCIe Gen5 ×16 с поддержкой ОСР 3.0
Блок питания	2 × HPE Flex Slot Titanium, 1800–2200 Вт, горячая замена

Серверная платформа.

Экспериментальные вычисления проводились на сервере HPE ProLiant Compute DL384

Gen12, предназначенном для высокопроизводительных вычислений и задач искусственного интеллекта. Основная конфигурация представлена в Таблице 1.

Программная среда.

Исследования выполнялись в среде Python. Для реализации и тестирования алгоритмов использовались следующие библиотеки представленные в Таблице 2:

Таблица 2.

Библиотеки Python для анализа

Компонент	Версия	Назначение
OpenCV	4.9	Обработка изображений, детекция и трекинг объектов
NumPy	1.26	Численные расчёты
Pandas	2.2	Анализ данных
Matplotlib	3.9	Визуализация результатов
PyTorch	2.3	Построение и обучение моделей машинного обучения
Scikit-learn	1.5	Методы классификации и регрессии при анализе движения
Ultraalytics YOLOv8	-	Детекция и идентификация объектов в видеопотоке
ОС	Ubuntu Server	22.04 LTS — платформа для проведения эксперимента

Методы обработки изображений. Для определения скорости объекта в потоке были использованы следующие методы: алгоритм Лукаса — Канаде [8]; глобальный метод Хорна — Шанка [8]; гибридный метод с виртуальными линиями пересечения и трекинг с помощью YOLO[6, 9, 12].

Алгоритм Лукаса — Канаде основан на предположении о локальной однородности оптического потока и вычисляет скорость путем минимизации ошибки яркостного соответствия в небольшом окне изображения [3, 8]. Данный метод эффективен для отслеживания мелких перемещений и обладает низкой вычислительной сложностью.

Глобальный метод Хорна — Шанка предполагает гладкость оптического потока по всему изображению и решает задачу через минимизацию функционала, включающего ошибку яркостного соответствия и регуляризационный член [8]. Этот метод обеспечивает более точные оценки потока в условиях шума, но требует больших вычислительных ресурсов.

Гибридный метод с виртуальными линиями пересечения объединяет локальные и глобальные подходы, используя виртуальные линии для улучшения оценки движения

объектов на пересечениях и границах, что позволяет повысить точность определения скорости в сложных сценах [6].

Трекинг с помощью YOLO (You Only Look Once) представляет собой метод детектирования и отслеживания объектов в реальном времени на основе глубоких сверточных нейронных сетей [6, 9, 12]. YOLO обеспечивает высокую скорость обработки и точность обнаружения, что делает его подходящим для динамического анализа движения.

Таким образом, каждый из рассмотренных методов обладает своими преимуществами и ограничениями, и выбор конкретного подхода зависит от условий задачи и требований к точности и скорости обработки [6].

Результаты. Для анализа динамики движения пузырьков во флотационной ячейке были применены три метода: метод оптического потока Лукаса–Канаде [8], трекинг объектов на основе нейронной сети YOLO [6, 9] и метод оптического потока Хорна–Шанка [8]. Видеоданные регистрировались с частотой 25 кадров в секунду и обрабатывались при одинаковых условиях, что обеспечило сопоставимость полученных результатов.

На первом этапе применялся метод Лукаса–Канаде. На рисунке 2 представлена временная зависимость средней скорости движения пузырьков. Скорость изменялась в диапазоне 0.07–8.72 мм/с с значительными колебаниями, связанными с нестабильностью пенного слоя.

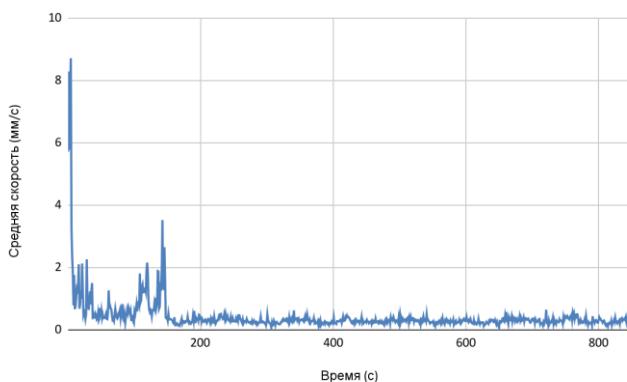


Рис.2. Временная зависимость скорости пузырьков, рассчитанная методом Лукаса–Канаде.

На втором этапе использовался трекинг

YOLO, обеспечивающий распознавание и отслеживание отдельных пузырьков на последовательности кадров. Результаты представлены на Рис.3. В сравнении с методом Лукаса–Канаде, YOLO выявляет более выраженные колебания скорости (18.34–41.12 мм/с), что обусловлено повышенной чувствительностью к локальным перемещениям пузырьков [9, 12].

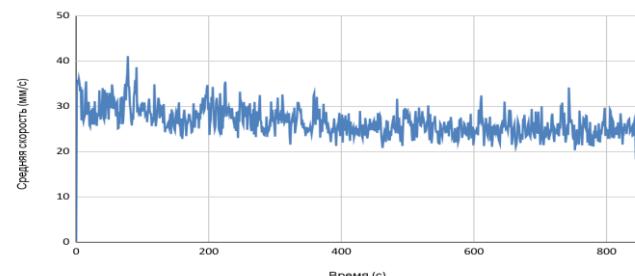


Рис.3. Временная зависимость скорости пузырьков, рассчитанная методом YOLO-трекинга.

Для уменьшения влияния высокочастотных колебаний частота кадров была снижена до 1 кадра в секунду.

На основе этих данных построены усреднённые зависимости скоростей, полученных тремя методами (см. рисунок 4). При пониженной частоте кадров методы демонстрируют более согласованные тенденции изменения скорости.

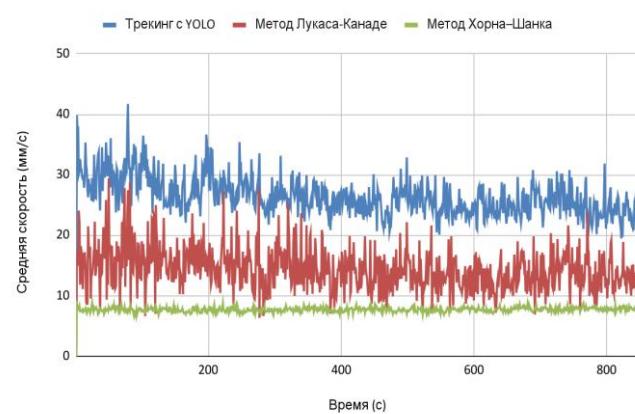


Рис.4. Сравнение средней скорости пузырьков, рассчитанной методами Лукаса–Канаде, YOLO и Хорна–Шанка при 1 fps.

Средние значения скоростей и стандартные отклонения для каждого метода приведены в Таблица 3.

Таблица 3
Средние значения скоростей и стандартные отклонения для каждого метода

Методы	Средняя скорость, мм/с	Стандартное отклонение
Лукаса–Канаде	14,34	3,05
YOLO-трекинг	26,32	3,53
Хорна–Шанка	7,7	0,34

Как показано в таблице 3, метод трекинга YOLO обеспечивает наибольшие значения средней скорости движения пузырьков — около 26,32 мм/с при стандартном отклонении 3,05 мм/с. Это свидетельствует о высокой чувствительности нейросетевого подхода к локальным перемещениям объектов, что позволяет фиксировать быстро меняющиеся участки пенного слоя [6, 9].

Метод Лукаса–Канаде показывает средние скорости порядка 14,34 мм/с при разбросе 3,53 мм/с, что указывает на более сглаженное восприятие движения вследствие локальной аппроксимации яркостного поля [3, 8]. Такой результат типичен для градиентных методов, не учитывающих резкие изменения контраста.

Наименьшие значения получены при использовании метода Хорна–Шанка — 7,7 мм/с со стандартным отклонением 0,34 мм/с. Это объясняется глобальной регуляризацией, которая подавляет локальные шумы и сглаживает поля скоростей, обеспечивая более стабильную, но менее чувствительную оценку движения [8].

Сравнение трёх методов показывает, что YOLO лучше отражает динамичные, быстро изменяющиеся области потока, тогда как методы Лукаса–Канаде и Хорна–Шанка обеспечивают более устойчивое и гладкое описание поля скоростей. В совокупности результаты подтверждают, что выбор метода должен определяться задачей: для оценки общей структуры движения предпочтителен Хорн–Шанк, а для анализа индивидуальных пузырьков — YOLO-трекинг [6, 9].

Обсуждение. В Полученные результаты демонстрируют значительные различия в оценках скорости движения пузырьков в поверхностном пенном слое флотационной машины в зависимости от применяемого метода. Метод трекинга на основе нейронной сети YOLO показал наивысшие значения средней

скорости (26,32 мм/с) с относительно низким стандартным отклонением (3,05 мм/с), что указывает на его способность точно фиксировать динамичные локальные перемещения пузырьков. В отличие от этого, метод Лукаса–Канаде дал промежуточные значения (14,34 мм/с), а глобальный метод Хорна–Шанка — наименьшие (7,7 мм/с) с минимальным разбросом (0,34 мм/с), что отражает их склонность к сглаживанию данных и подавлению шумов за счет потери детализации в быстрых изменениях [3, 8].

Преимущество метода YOLO в контексте флотационных процессов обусловлено его архитектурой на основе глубоких сверточных нейронных сетей, которая обеспечивает реальное время обработки видеопотока и высокую точность детекции отдельных объектов (пузырьков) даже в условиях сложной текстуры пенного слоя [6, 9]. Это особенно актуально для флотации упорных сульфидных руд, где пузырьки подвержены быстрым колебаниям из-за вариаций в подаче воздуха и реагентов, что напрямую влияет на гидродинамику процесса и время флотации золота. В нашем исследовании установлена корреляционная зависимость между скоростью пузырьков и временем флотации: более высокие скорости, фиксируемые YOLO, коррелируют с повышенной эффективностью извлечения минералов, минимизируя потери в хвостах, как подтверждается работами [1, 5, 11].

Методы оптического потока, такие как Лукаса–Канаде и Хорна–Шанка, хотя и эффективны для оценки общего поля скоростей в стабильных условиях [3, 8], менее подходят для пенного слоя из-за их чувствительности к шуму и градиентам яркости, что приводит к недооценке динамики [6]. Глобальная регуляризация в методе Хорна–Шанка обеспечивает стабильность, но жертвует чувствительностью к локальным вариациям, что критично для мониторинга в реальном времени. Напротив, YOLO интегрирует детекцию и трекинг в единую модель, позволяя учитывать индивидуальные траектории пузырьков и лучше адаптироваться к нестационарным условиям, таким как изменения в размере пузырьков или их распределении [7, 10].

Внедрение YOLO в системы машинного зрения для флотационных машин позволяет оптимизировать параметры подачи воздуха, как указано в аннотации, и интегрировать данные в многомерный статистический контроль процессов (MSPC). Это способствует автоматизации, повышая производительность на 10–15% за счет timely корректировки, как показано в аналогичных исследованиях [2, 4]. Однако, несмотря на преимущества, метод YOLO требует значительных вычислительных ресурсов, что было учтено в нашей экспериментальной платформе на базе NVIDIA GH200, но может ограничивать применение в менее мощных системах. Дальнейшие исследования должны фокусироваться на гибридных подходах, сочетающих YOLO с оптическими методами для баланса между точностью и эффективностью.

В целом, результаты подчеркивают, что трекинг YOLO является наиболее подходящим методом для оценки скорости пузырьков в поверхностном пенном слое, обеспечивая достоверные данные для оптимизации флотации золота и улучшения качества концентратов.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует высокую эффективность применения методов машинного зрения, в частности трекинга на основе нейронной сети YOLO, для оценки скорости пузырьков в поверхностном пенном слое флотационной машины. Метод YOLO показал наилучшие результаты, обеспечивая среднюю скорость

пузырьков 26,32 мм/с с приемлемым стандартным отклонением 3,05 мм/с, что свидетельствует о его способности точно фиксировать динамичные изменения в пенном слое. В сравнении с методами оптического потока Лукаса–Канаде и Хорна–Шанка, YOLO лучше адаптируется к нестационарным условиям флотации, что особенно важно для процессов обогащения упорных сульфидных руд Кызылкумского региона [1, 5, 6].

Установленная корреляционная зависимость между скоростью пузырьков и временем флотации золота подчеркивает значимость точного мониторинга пенной фазы для повышения извлечения ценных минералов и минимизации потерь. Интеграция метода YOLO в системы многомерного статистического контроля процессов (MSPC) позволяет оптимизировать параметры подачи воздуха и реагентов, обеспечивая автоматизацию и повышение производительности флотационных процессов. Несмотря на высокие вычислительные требования, использование современных серверных платформ, таких как HPE ProLiant с суперчипами NVIDIA GH200, делает внедрение YOLO практически реализуемым.

Полученные результаты подтверждают, что трекинг YOLO является предпочтительным методом для анализа скорости пузырьков, предоставляя надежные данные для управления флотационными установками [6, 9].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Nguyen, T. P., Tran, T. H., Nguyen, T. A. H., Nguyen, N. N., & Nguyen, A. V. (2025). The role of surface mobility in enhancing froth drainage and reducing entrainment in flotation. Minerals Engineering, 233, Article 109632. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109632>
- [2] Aldrich, C., & Liu, X. (2021). Monitoring of flotation systems by use of multivariate froth image analysis. Minerals, 11(7), Article 683. <https://doi.org/10.3390/min11070683>
- [3] Ammar, A., Fredj, H. B., & Souani, C. (2021). Accurate realtime motion estimation using optical flow on an embedded system. Electronics, 10(17), Article 2164. <https://doi.org/10.3390/electronics10172164>
- [4] Kosior, D., Wiertel-Pochopien, A., Kowalcuk, P. B., & Zawala, J. (2023). Bubble formation and motion in liquids—A review. Minerals, 13(9), Article 1130. <https://doi.org/10.3390/min13091130>
- [5] Shahbazi, B. (2015). Study of relationship between flotation rate and bubble surface area flux using bubble-particle attachment efficiency. American Journal of Chemical Engineering, 3(2-2), 6–12. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.s.2015030202.12>

- [6] Alfarano, A., Maiano, L., Papa, L., & Amerini, I. (2024). Estimating optical flow: A comprehensive review of the state of the art. *Computer Vision and Image Understanding*, 249, Article 104160. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2024.104160>
- [7] Wang, J., Forbes, G., & Forbes, E. (2022). Frother characterization using a novel bubble size measurement technique. *Applied Sciences*, 12(2), Article 750. <https://doi.org/10.3390/app12020750>
- [8] Fleet, D. J., & Weiss, Y. (2006). Optical flow estimation. In N. Paragios, Y. Chen, & O. Faugeras (Eds.), *Handbook of mathematical models in computer vision* (pp. 237–257). Springer. https://doi.org/10.1007/0-387-28831-7_15
- [9] Huang, T. (2018). Traffic speed estimation from surveillance video data. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW) (pp. 161–1614).
- [10] Jávor, Z., Schreithofer, N., & Heiskanen, K. (2018). Kernel functions to flotation bubble size distributions. *Minerals Engineering*, 125, 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.006>
- [11] Betancourt, F., Bürger, R., Diehl, S., Gutiérrez, L., Martí, M. C., & Vásquez, Y. A. (2023). A model of froth flotation with drainage: Simulations and comparison with experiments. *Minerals*, 13(3), Article 344. <https://doi.org/10.3390/min13030344>
- [12] Sangsuwan, K., & Ekpanyapong, M. (2024). Video-based vehicle speed estimation using speed measurement metrics. *IEEE Access*, 12, 4845–4858. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3356789>