

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ БЛИКОВ БИНАРИЗОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕНЫ

MODIFIED ALGORITHM FOR DETERMINATION OF GLARES ON FOAM BINARIZED IMAGES

A. Malysheva

Summary. A problem of automation of foam layer parameters in enterprise flotation machine is given. Existing methods of solving are observed. Additional requirements for determination algorithms are formulated on the assumption of foam drive motion and numerical performance. Algorithm is probed in the application to video captured from enterprise flotation machine. As a result performance of the algorithm is raised, determination of foam driver position is provided.

Keywords: potassium ore, flotation, determination, foam, control, binarization, algorithm.

Малышева Анна Владимировна

Аспирант, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
akchim@mail.ru

Аннотация. Определена проблема автоматического распознавания параметров пенного слоя в промышленной флотационной машине, рассмотрены существующие технические средства решения поставленной задачи. Выявлены дополнительные требования к алгоритмам распознавания, связанные с перемещением пеногона и скоростью обработки информации. Описана апробация алгоритма на видеопотоке с промышленной флотомашины. В результате скорость работы алгоритма увеличена, обеспечено надежное распознавание положения пеногона.

Ключевые слова: калийная руда, флотация, распознавание, пена, управление, бинаризация, алгоритм.

Производство калийных удобрений имеет большое значение для экономики. Во-первых, существенная часть произведенных в России на ПАО «Уралкалий» удобрений поставляется на экспорт [1], что обеспечивает приток валюты в страну. Во-вторых, внутренними потребителями удобрений являются сельскохозяйственные предприятия, обеспечивающие население продовольствием и также формирующие экспорт. Так в 2017 году в РФ собран рекордный урожай зерновых культур (134.1 млн. тонн), примерно треть которого из-за отсутствия необходимых элеваторных мощностей направлена на экспорт [2]. Достижение высокой урожайности без использования калийных удобрений невозможно. При этом сырьевые ресурсы калийных руд, естественно, ограничены. Следовательно, повышение степени извлечения хлорида калия из руды является актуальной и практически важной задачей.

Одним из ключевых технологических процессов при переработке калийной руды является флотация [3]. При шламовой флотации из пульпы калийной руды извлекается нерастворимый остаток, при сильвиновой флотации производится разделение хлорида калия и хлорида натрия. Оба процесса протекают в промышленных флотомашинах (ФМ) с образованием пенного слоя. Упрощенно говоря, при шламовой флотации в пену собирается нерастворимый остаток (и пена удаляется в отходы), при сильвиновой — в пене накапливается хлорид калия, а в отходы удаляется камерный продукт ФМ.

Доказано, что параметры пенного слоя (плотность, ровность, цвет и т.д.) непосредственно связаны с параметрами процессов флотации, хоть шламовой, хоть сильвиновой [4]. На предприятии пенный слой непрерывно наблюдает технолог-флотатор, принимая по виду пены решения по изменению подачи в ФМ реагентов [5]. Однако при этом возникает ряд проблем, связанных с «человеческим фактором», начиная с того, что наблюдение человеком не может быть непрерывным и заканчивая возможными ошибками флотатора [6]. Поэтому практически важной является задача автоматизации распознавания параметров пенного слоя, что позволит перейти от «ручного» управления к построению автоматической или автоматизированной системы (системы поддержки принятия решений флотатора).

Алгоритмы распознавания пузырьков в пенном слое применяются при флотации полиметаллических руд [7]. Однако «полное» распознавание пузырька является вычислительно сложной задачей и требует организации особых условий съемки, поэтому непосредственно для калийной ФМ применение разработанных средств и алгоритмов затруднительно [8, 9]. В Березниковском филиале ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (БФ ПНИПУ) [10] предложен метод статистической оценки параметров пенного слоя, основанный на распознавании бликов пузырей. Произведены эксперименты, показывающие принципиальную возможность детектировать изменение пенного слоя по изменению статистики бликов. Достоверность метода проверена ручным подсчетом

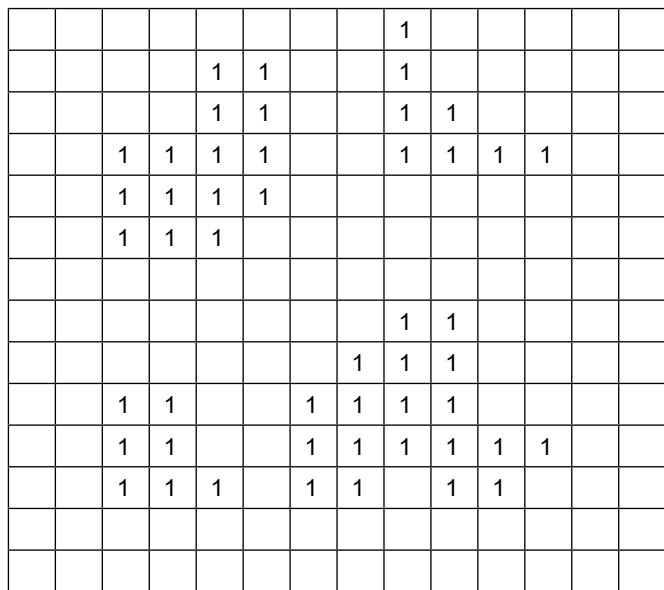


Рис. 1а. Бинаризованное изображение

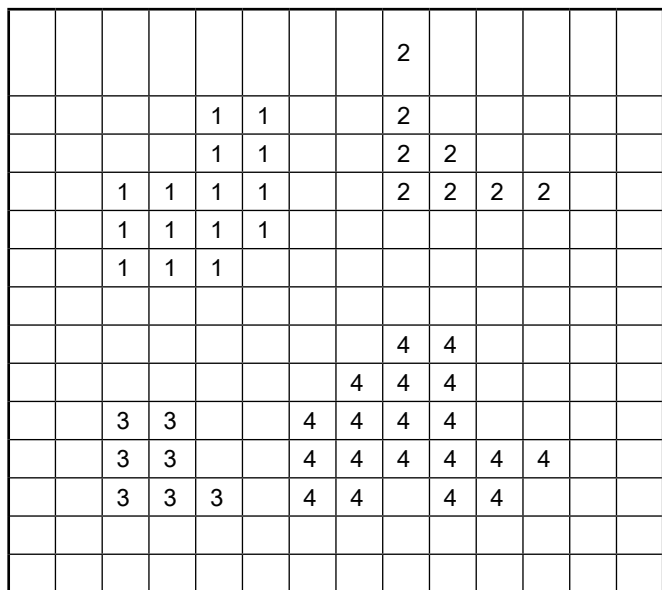


Рис. 1б. Бинаризованные изображения с выделенными областями

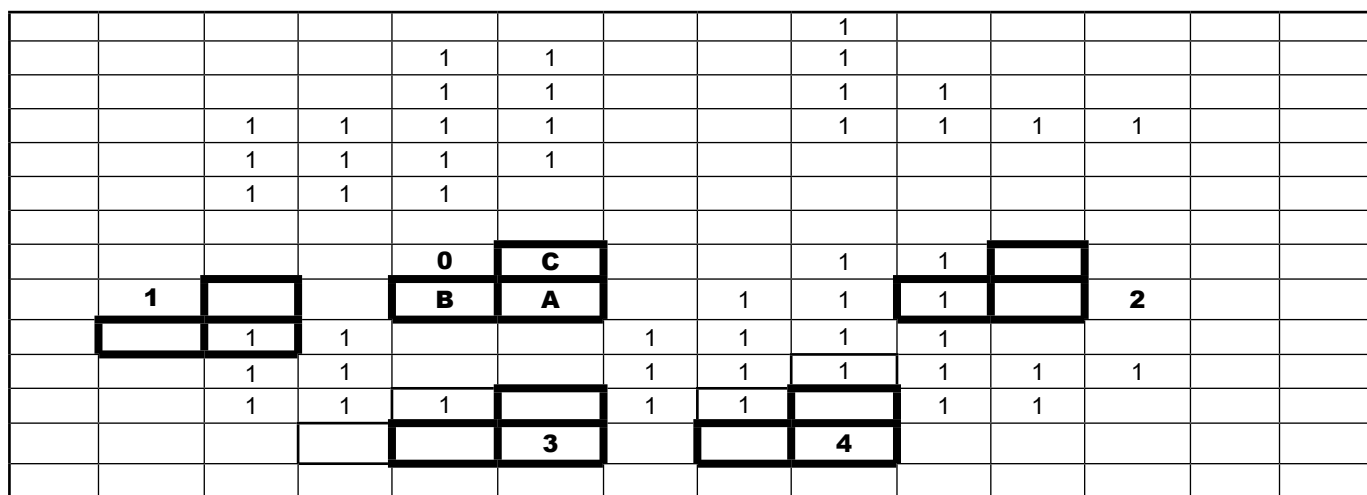


Рис. 1в. Бинаризованное изображение с ABC-масками

пузырей на фотографиях камеры ФМ и сравнением с результатами обработки программой, реализующей блочный метод распознавания. Кроме того, идея блочного распознавания оценена и «подхвачена» за рубежом, где после публикации в 2015 году [11] стали появляться статьи с аналогичными алгоритмами [12,13 и др.].

Однако на практике съемка будет производиться на флотомашине непрерывного действия, в которой пена в приемный лоток смахивается пеногоном. Следовательно, распознавание пены необходимо производить в те моменты времени, когда пеногон не попадает в кадр видеокamеры. Кроме того, разработанные ранее алгоритмы [14] все же достаточно медленные для того,

чтобы за один оборот пеногона не успевать подготовить результаты расчета. Это мешает решению поставленной выше задачи **непрерывного** распознавания параметров пенного слоя.

Решению двух указанных проблем (эффективное исключение пеногона из кадра) и увеличению скорости распознавания и посвящена данная статья. Вторая из задач решена достаточно просто. В [16] найден простой однопроходный алгоритм выделения связных областей, работающий на матрице бинаризованного изображения, где белые пиксели имеют значение 1, а черные 0. Автор назвал его «Алгоритм ABC-маски». Первоисточник алгоритма установить не удалось, так как в ходе перепи-

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0

Рис. 2а. бинаризованные изображения бликов пузырей

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	146	0	0	0	0	0	0	146	146	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	0	0	0	0	0	0	0
146	146	0	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	0	0	0	0	0	0
146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	0	0	0	0	0
146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	0	0	0	0	0	0
146	146	146	146	146	0	0	146	146	146	0	146	0	0	135	135	0	0	0	0
0	146	146	146	0	0	146	146	146	146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	146	146	146	146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	146	146	146	146	0	0	0	0	153	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	153	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	166	166	0	0	159
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	163	0	0	0	166	166	0	0	0	159
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	163	163	0	166	166	166	0	0	0	159
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	166	166	166	0	0	0	0

Рис. 2б. Бинаризованные изображения с пронумерованными бликами

ски с автором выяснилось, что он уже не может указать, откуда его заимствовал. Алгоритм заключается он в следующем. Пусть имеется бинаризованное изображение, подобное рис. 1а.

Требуется выделить на нем все связные области, чтобы в каждой из них были уникальные значения (а не 1 во всех), пример показан на 1б. Будем считать «соседями», то есть, возможно, принадлежащими к одной

и той же связной области, пиксели сверху, снизу, слева и справа от текущего пикселя (без учета пикселей по диагонали), то есть строить четырехсвязную область.

По изображению будем перемещать слева направо и, затем, сверху вниз воображаемую АВС-маску, покрывающую три пикселя так, как показано на рис. 1в. Там же изображены 5 возможных принципиально разных положений АВС-маски:

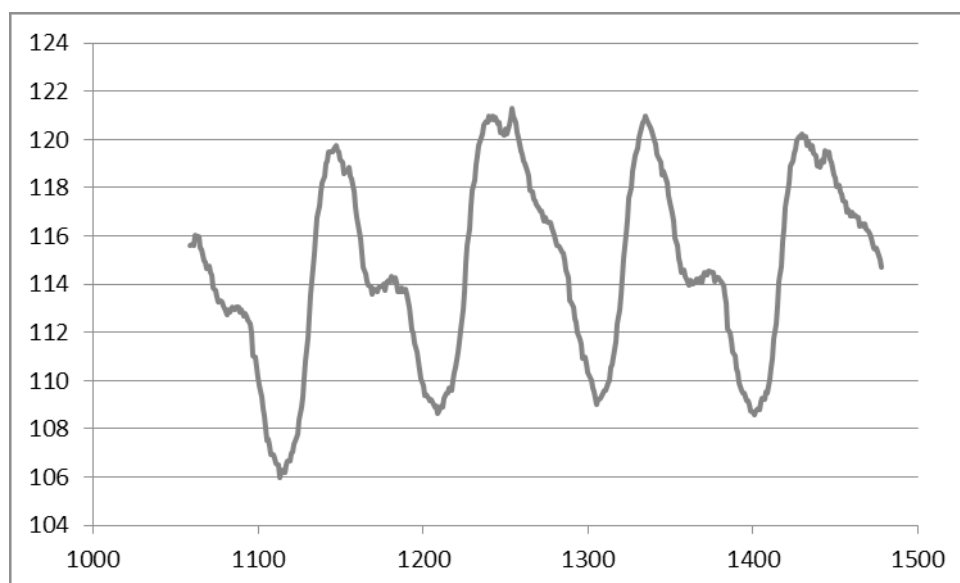


Рис. 3. Зависимость освещенности «окна» (ось ординат) от номера кадра (ось абсцисс)

- ◆ положение 0: маска не покрывает ни одного белого пикселя. В этом случае маска просто продвигается дальше.
- ◆ положение 1: маска ячейкой A попала на пиксель нового, еще не обработанного связного объекта. Этот объект должен получить следующий номер, превышающий номера, присвоенные пикселям всех ранее выделенных связных объектов.
- ◆ положение 2: маска вышла ячейкой A вправо за пределы размечаемого объекта. Пиксель в ячейке A помечается меткой, расположенной в ячейке B.
- ◆ положение 3: маска вышла вниз за пределы размечаемого объекта. Пиксель в ячейке A помечается меткой, расположенной в ячейке C.
- ◆ положение 4: маска захватывает размеченные пиксели в B и C, но пиксель в A черный. Он может быть помечен как значением в B, так и значением в C. В случае, если значение в B не равно значению в C, то перенумеруем в пределах всей матрицы все уже обработанные пиксели со значением в C в значение в B.

Недостатком рассмотренного алгоритма является то, что из-за перенумерации в положении 4 номера внутри связных объектов получаются не последовательными, но это несущественно. Возрастание номера объекта при этом сохраняется.

Алгоритм работает чрезвычайно быстро и безошибочно, при его тестировании не удалось обнаружить сбоев ни при разметке объектов, содержащих внутренние черные области, ни при разметке невыпуклых объектов.

По окончании работы алгоритма остается:

- ◆ удалить объекты слишком малой (шум) и слишком большой (засветка) площади, то есть присвоить всем их пикселям значение 0;
- ◆ подсчитать количество оставшихся объектов (есть ли в матрице ячейки со значениями от 1 до максимального, и сколько их?);
- ◆ произвести все остальные необходимые статистические вычисления.

Работа алгоритма была проверена при обработке видеопотока, полученного в ходе эксперимента на первой камере промышленной флотомшины Третьего Соликамского калийного рудоуправления ПАО «Уралкалий». Видеосъемка производилась автомобильным видеорегастратором высокого разрешения (1280*720 пикселей в кадре). В ходе эксперимента расход реагентов в камеру был уменьшен на одну треть, затем, после окончания переходного процесса в камере, восстановлен. К сожалению, конкретные технологические параметры (расход воздуха, вид и концентрация реагентов, вид и количество загруженного продукта и отношение жидкой и твердой фазы, гранулометрический состав загружаемого продукта и т.п.) являются коммерческой тайной предприятия и не могут быть приведены в открытой печати. Важно, что зрительно в камере ФМ наблюдался очевидный переходный процесс, характеризующийся изменением размера пузырей в пене и цвета пены.

В результате бинаризованные изображения бликов пузырей (2а) успешно обработаны и получены перенумерованные блики (2б). На рисунках 2а и 2б приведен

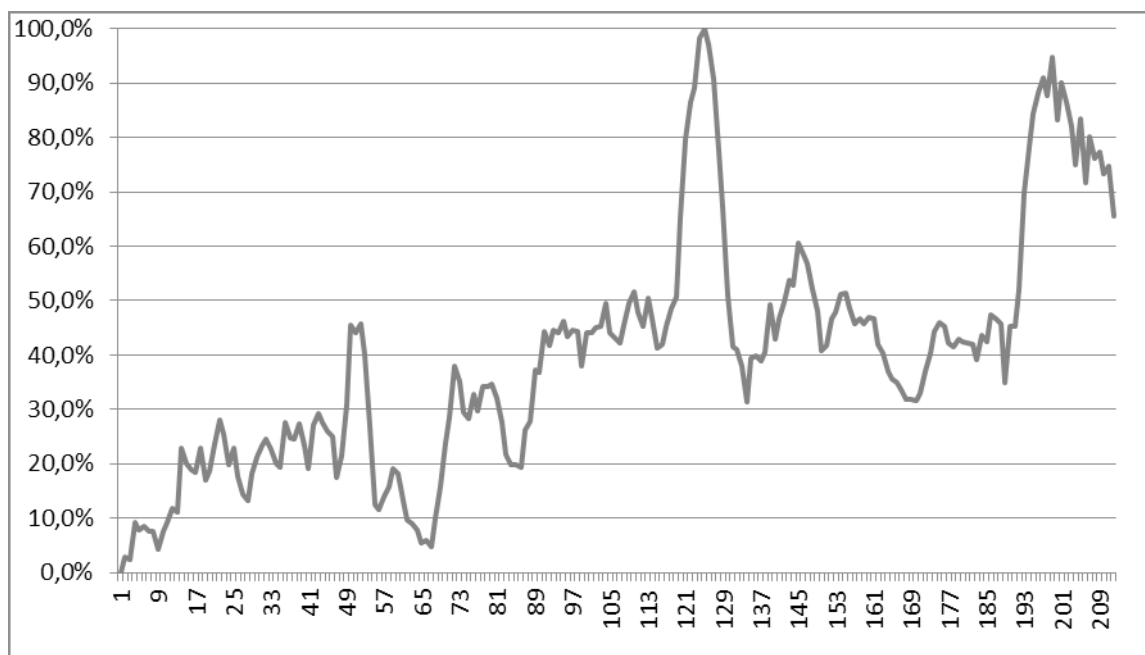


Рис. 4. Зависимость количества пузырей в кадре от номера кадра

только фрагмент исходного и обработанного изображения.

Время обработки одного кадра, точнее, «окна» наблюдения за пеной размером порядка 400*350 пикселей, замеренное в отладчике MS Visual Studio, составляет 15–30 мс. Это более чем достаточная скорость обработки, так как частота вращения пеногона промышленной ФМ порядка 0,315 Гц. Таким образом, задачу повышения скорости обработки можно считать решенной.

С величиной полупериода вращения связана вторая проблема из поставленных выше. Полупериод вращения не кратен **точно** частоте кадров видеокамеры. Следовательно, необходимо разработать какие-то алгоритмы, позволяющие выделять из видеопотока кадр именно в тот момент, когда пеногон не перекрывает «окно» наблюдения за пеной.

Путем измерения освещенности каждого кадра установлено, что она изменяется синхронно с углом поворота пеногона (рис 3), по оси X — номер кадра, по оси Y — средняя освещенность в «окне». Наблюдением установлено, что максимумы освещенности соответствуют вертикальному положению лопастей пеногона, то есть их отсутствию в окне наблюдения за пеной. Физически максимум освещенности можно объяснить наличием волны в камере ФМ, которую поднимает пеногон. При приложении усилия от лопасти пеногона пена «тянется» за ним, поверхность пены становится перпендикулярна

источнику освещения (не наклонно), что увеличивает освещенность.

На рисунке видно различие между четными и нечетными полупериодами вращения, связанные с разной отражающей способностью двух лопастей пеногона. На нечетных полупериодах видно временный рост освещенности в момент наибольшей экспозиции лопасти пеногона, на четных его нет. Следовательно, напрашивается достаточно простой алгоритм распознавания положения пеногона:

- ◆ дождаться, пока освещенность будет **долго и непрерывно** расти
- ◆ затем дождаться некоторого снижения освещенности (на протяжении **нескольких** кадров), в этот момент лопасти пеногона будут перпендикулярны поверхности камеры ФМ.

Разумеется, «долго и непрерывно» и «несколько» требуют конкретизации, что сделано ниже.

Такой алгоритм позволяет обнаружить точки, отмеченные «А» на рис. 3, и исключить точки, отмеченные «Б» — в них не выполняется условие долгого и непрерывного роста освещенности перед ее падением.

Технически распознавание «перевала» освещенности выполнено в MS Visual C++ классом

```
class pereval {
    static const int N = 8;
```

```

double x[N];
double y[N];
int cnt;
int tohigh;
int sortedup(int = N);
public:
    pereval() {tohigh = cnt = 0;}
    int friend operator<<(pereval&, double);
    void out(void);
    int ishigh(void) {return tohigh;}
};

```

В нем параметр N соответствует понятию «долго и непрерывно», так как передается в функцию sortedup определения непрерывного возрастания освещенности. Результатом выполнения дружественного (то есть имеющего доступ к приватным данным класса) оператора << является достижение точки «А». Экспериментальная настройка параметров производилась в специальном программном плеере, где визуально можно было наблюдать положение пеногона, бинаризованное изображение в окне наблюдения за пеной и другие параметры. Установлено, что достаточно констатировать падение освещенности в течение 3 или 4 кадров. А «долго и непрерывно», то есть параметр N, соответствует 10 кадрам. При N = 8 возникла ошибка распознавания положения пеногона в самой левой и самой правой точках «Б» на рис. 3 (и далее во множестве нечетных полупериодов), при N = 9 — только в левой точке «Б» при N = 10, 11 и т.д. ошибки не возникают.

На рис. 4 представлена обработка видеопотока, то есть кадров, полученных при нужном положении пеногона. По оси X — номер кадра с момента начала обработки, по оси Y — сглаженное по 5 точкам и нормированное количество пузырей.

Хорошо видны моменты уменьшения подачи реагентов («А»), восстановления подачи реагентов («Б»)

и отдельные выбросы («В»), которые в реальности будут удалены статистическими методами. Между точками «А» и «Б» наблюдается переходный процесс, похожий на характеристику звена идеального смешения (что и ожидается в данном случае на основании предшествующих работ [20] в этой области). Переходный процесс завершился примерно за 115 полукадров (каждый из которых снят через $1/0,315 \cdot 2 = 1,58$ с), то есть за $115 \cdot 1,58 \approx 182$ с ≈ 3 минуты. При подаче ступенчатого воздействия на звено 1-го порядка

$$W(s) = \frac{1}{Ts + 1}$$

продолжительность переходного процесса

$$y(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right),$$

где T — время пребывания (постоянная времени). Значение

$$y(3) = 1 - \exp\left(-\frac{3}{T}\right) \approx 0.95$$

(вхождение в 5%-ный «коридор» около установившегося значения) достигается при времени пребывания T = 2.2, что вполне соответствует характеристике камеры флотомшины T = 1.9 мин, полученной в [20].

Таким образом, можно сделать вывод, что поставленные в данной статье задачи решены. Удалось добиться достаточного повышения скорости распознавания и обработки кадра, а также выделять только кадры, в которых нет лопасти пеногона. Достоверность полученного результата подтверждается сравнением полученного с помощью видеокамеры времени пребывания в камере с результатами других авторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калий хлористый — удобрения: Экспорт / ПАО Уралкалий. [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://www.uralkali.com/ru/buyers/sale/export/index.php?sphrase_id=656937
2. В этом году производство зерна в России достигло рекордного уровня. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://inosmi.ru/economic/20171228/241118553.html>
3. Тетерина Н. Н. Технология флотационного обогащения калийных руд / Н. Н. Тетерина, Р. Х. Сабилов, Л. Я. Сквирский, Л. Н. Кириченко. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 2002. 484 с.
4. Затонский А. В. Использование видеографической информации для уточнения динамической стохастической модели процесса флотации калийной руды / А. В. Затонский, С. А. Варламова, А. В. Малышева, др // Интернет-журнал «Науковедение», 2017., № 2.(39). С. 87.
5. Малышева А. В. Возможности компьютерного зрения при управлении флотацией калийных руд // Первый шаг в науку. 2015. № 3–4 (3–4). С. 16–19.
6. Затонский А. В. Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования. М.: ИНФРА-М, ИЦ РИОР, 2013. 136 с.

7. Романенко С. А., Оленников А. С. Опыт внедрения видеокамер *FROTHMASTER* на обогатительной фабрике «Зеленая гора-2» // Обогащение руд, 2014. № 2. С. 23–28.
8. Outotec FrothSense™ // http://outotec.com/ImageVaultFiles/id_735/d_1/cf_2/OTE_Outotec_FrothSense_eng_web.PDF
9. Minerals Processing Solutions Automation // [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/0AF54610F6C67DDBC2257B030037F030/\\$File/Automation%20ENGLISH%20Low%20Res.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/0AF54610F6C67DDBC2257B030037F030/$File/Automation%20ENGLISH%20Low%20Res.pdf)
10. Затонский А. В., Варламова С. А. Распознавание краев пузырьков при пенной флотации калийных руд / Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн Материалы международной научно-практической конференции. Под общей редакцией В. А. Немтинова. 2015. С. 222–225
11. Затонский А. В., Варламова С. А. Использование бликовых отражений для автоматического распознавания параметров пены при флотации калийных руд // Обогащение руд. 2016. № 2. С. 49–56
12. Jahedsaravani A., Massinaei M., Marhaban M. H. An image segmentation algorithm for measurement of flotation froth bubble size distributions // Measurement. Vol 111, 2017. pp. 29–37.
13. Tan J., Liang L., Peng Y., Xie G. The concentrate ash content analysis of coal flotation based on froth images // Minerals Engineering. Vol. 92, 2016. pp 9–20.
14. Fu Y., Aldrich C. Froth image analysis by use of transfer learning and convolutional neural networks // Minerals Engineering. Vol. 115, 2018. pp. 68–78.
15. Затонский А. В. Модернизация бликового распознавания параметров пенного слоя / А. В. Затонский, А. В. Малышева // Обогащение руд. 2018. № 3.
16. Подсчет объектов на бинарном изображении. Часть 1. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/119244/>
17. Беккер В. Ф. Решение технологических проблем действующего производства средствами автоматизации. Т. 1: Производство калийных удобрений. Пермь: БФ ПНИПУ, 2012. 312 с.

© Малышева Анна Владимировна (akchim@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Пермский национальный исследовательский политехнический университет»