

На правах рукописи



Козлов Павел Станиславович

**МЕТОД, АЛГОРИТМЫ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ
ФЛОТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ РЕАГЕНТОВ**

Специальность: 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2013

Работа выполнена в Юго-Западном государственном университете на кафедре «Вычислительная техника» в совместной научно-исследовательской лаборатории Центра информационных технологий в проектировании РАН и Юго-Западного государственного университета «Информационные распознающие телекоммуникационные интеллектуальные системы».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
заслуженный деятель науки РФ
Титов Виталий Семёнович

Официальные оппоненты: Дегтярёв Сергей Викторович
доктор технических наук, профессор
Юго-Западный государственный университет,
декан факультета информатики и вычислительной
техники

Прилуцкий Сергей Викторович
кандидат технических наук,
Научно-исследовательский центр (г.Курск)
ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ, начальник отдела

Ведущая организация: Волгоградский государственный технический
университет

Защита состоится 24 июня 2013 г. в 13-00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.105.02 при Юго-Западном государственном
университете по адресу: 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Юго-
Западного государственного университета.

Автореферат разослан «23» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.105.02

Титенко Евгений Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Высокотехнологичные инновационно ориентированные производства, обеспечивающие создание продукции на современном научно-техническом уровне, невозможны без применения устройств вычислительной техники и управляющих различными процессами систем. Несмотря на весьма бурное развитие подобных устройств и систем и, казалось бы, их повсеместное внедрение, остались области, где их использование по ряду причин до сих пор реализуется в недостаточной степени.

Одними из таких областей являются области промышленности и хозяйственной сферы, связанные с вычислением флотационной активности реагентов и вычислением величины поверхностного натяжения жидкости. Для точной дозировки флотореагентов требуется обеспечить вычисление флотационной активности и динамически меняющегося поверхностного натяжения жидкости в реальном времени с точностью не ниже точности лабораторных методов. Существующие средства вычисления флотационной активности реагентов характеризуются низким быстродействием, обусловленным как несовершенством применяемых методов, так и отсутствием специализированных вычислительных устройств.

Известен подход, позволяющий по изображению микропузырька газа в исследуемой жидкости вычислить флотационную активность реагентов и поверхностное натяжение жидкости. Однако на настоящий момент времени не устранены следующие ограничения, затрудняющие создание специализированного устройства на базе данного подхода: необходимость обработки изображений пузырька микроскопического размера, обуславливающая применение специализированных цифровых оптико-электронных средств получения изображений, позволяющих вычислять форму контура пузырька (при этом, чем меньше пузырек, тем с большей точностью должна быть вычислена его форма), а также необходимость обработки данных в реальном времени.

Существующие методы обработки изображений (В.А. Сойфер, Я.А. Фурман, Н. Wang, Р. Дуда, П.Харт, М. Fischler, S. Tsuji, J. Zheng M. Penna и др.) и построения оптико-электронных устройств (В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков, В.И. Сырякин, Z. Wei, С.В. Дегтярев) требуют доработки для применения при решении указанной задачи в части обеспечения компенсации искажений пузырька в жидкости, вычисления формы пузырька с требуемой точностью, снижения вычислительной сложности процедур анализа изображений. При этом, в целях повышения быстродействия устройства целесообразно его реализовать на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), позволяющих создать специализированные вычислительные модули по обработке изображений для вычисления поверхностного натяжения и флотационной активности.

Таким образом, объективно сложилось **противоречие** между необходимостью решения задачи оценки флотационной активности веществ в реальном времени с достаточной точностью и отсутствием методов и аппаратных средств, которые могли бы одновременно обеспечить и реальное время вычислений и требуемую (не ниже лабораторной) точность.

В связи с этим, **актуальной научно-технической задачей** является повышение быстродействия устройств вычисления флотационной активности реагентов и поверхностного натяжения жидкости при требуемой точности вычислений.

Диссертационная работа выполнена в рамках Федеральной Целевой Программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по проекту НК-631 «Разработка оптико-телевизионного устройства оценки флотационной активности веществ» Госконтракт П1006 от 27.05.2010, выполненной в период с 2010 по 2012гг. в Юго-Западном государственном университете.

Целью работы является разработка метода, алгоритмов обработки цифровых изображений пузырька газа в жидкости и специализированного оптико-электронного устройства для вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов в реальном времени.

В соответствии с поставленной целью научно-техническая задача декомпозирована на следующие **частные задачи**.

1. Анализ известных методов и средств вычисления параметров объектов с криволинейными контурами, подверженными искажениями различной природы и оценка путей их применимости для решения задачи вычисления параметров пузырька в жидкости. Обоснование направления исследований

2. Разработка математической модели обработки изображений в специализированном оптико-электронном устройстве, обеспечивающего вычисление поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов.

3. Разработка метода и алгоритмов вычисления поверхностного натяжения жидкости по изображению пузырька газа.

4. Разработка структурно-функциональной организации специализированного оптико-электронного устройства для вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов, проведение экспериментальных исследований.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использованы методы распознавания образов, обработки и анализа цифровых изображений, статистической обработки результатов измерений.

Новыми научными результатами и положениями, выносимыми на защиту, являются:

1) математическая модель обработки изображений в специализированном оптико-электронном устройстве для вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов, учитывающая особенности получения изображений микропузырьков в жидкости, динамическое изменение

их контуров, позволяющая компенсировать искажения, обусловленные неоднородностью жидкости и погрешностями оптико-электронного датчика;

2) метод вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов по цифровому изображению расположенного в ней динамически меняющегося пузырька газа, отличительной особенностью которого является введение операций снижения систематических и случайных погрешностей изображения, уточнения вычисленных координат контура пузырька и распознавания посторонних частиц в жидкости;

3) алгоритм вычисления поверхностного натяжения жидкости, отличающийся использованием вычислительно простых операций, и алгоритм оценки флотационной активности реагентов, позволяющие их реализацию в специализированном вычислительном устройстве на базе программируемых логических интегральных схем;

4) структурно-функциональная схема специализированного оптико-электронного устройства для вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов, отличающегося введением модулей коррекции искажений изображений, выделения и уточнения контура пузырька, распознавания пузырька, вычисления поверхностного натяжения жидкости и вычисления параметров флотационной активности и связей между ними, обеспечивающая вычисление поверхностного натяжения жидкости в реальном времени и флотационной активности веществ.

Объект исследований – вычислительные средства автоматизации управления процессом обогащения полезных ископаемых на основе флотационного процесса.

Предмет исследований – методы обработки изображений в вычислительном устройстве измерения параметров микрообъектов, расположенных в жидкости.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- предложен и экспериментально проверен новый метод вычисления поверхностного натяжения жидкости, который применим как в лабораторных, так и в промышленных условиях для управления технологическими процессами, связанными с вычислением параметров флотационной активности реагентов, разработано специализированное устройство для реализации созданного метода;

- предложены и экспериментально проверены созданные алгоритмы обработки изображений объектов в жидкостях, ориентированные на реализацию в однокристалльных средствах обработки цифровых данных, которые могут быть использованы при повышении качества и распознавания изображения пузырька газа в жидкости при решении задач обогащения полезных ископаемых посредством применения флотационного процесса, а также других задач обработки изображений для вычислительных систем, в частности, на базе разработанных аппаратных модулей возможно решение задачи повышения четкости контуров сложных многоконтурных объектов, снижения помех при анализе изображений объектов в жидкости;

– разработанное устройство может применяться в горнообогатительной промышленности, в пищевой отрасли, в области домашней химии и ряде других отраслей, связанных с вычислением поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности, как определяющих технологический процесс или качество продукции параметров.

Результаты работы внедрены в ООО Курская Бумажная Компания «Бутек», ООО «Сырная Долина», ООО Совместное Предприятие «Бел-Поль» и используются в учебном процессе Юго-западного государственного университета при проведении занятий по дисциплинам «Архитектура систем обработки, анализа и интерпретации данных», «Основы теории распознавания образов», что подтверждено соответствующими актами.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует п.1 «Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления» и п.2 «Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик» паспорта специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на международных и российских конференциях, семинарах, симпозиумах: на 5-й Международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений» (г. Санкт-Петербург, 2007г.), на Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные и информационные системы» (г. Тула, 2007г.), на Международных научно-технических конференциях «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» «Распознавание» (г. Курск, 2005, 2008, 2010, 2012), на научно-технических конференциях 2008-2010гг «Неделя горняка» (г. Москва), на научно-технических семинарах кафедры «Вычислительная техника» Юго-западного государственного университета с 2004 по 2013 гг.

Публикации. Результаты проведенных исследований и разработок опубликованы в 14 научных работах, в том числе 5 статьях в рецензируемых научных журналах и двух зарубежных статьях. Оригинальность технических решений защищена 1 патентом на изобретение РФ.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателем разработаны: в [1,7] – структурно-функциональная организация и принципы функционирования оптико-электронного устройства для вычисления поверхностного натяжения жидкости, в [2] – алгоритм вычисления поверхностного натяжения жидкости по изображению пузырька, полученного с оптико-электронного датчика относительно низкой разрешающей способности,

в [3,9,11] – оптико-электронное устройство вычисления поверхностного натяжения жидкости и оценки флотационной активности веществ: принцип функционирования, макет, экспериментальные результаты, в [4,6,12] – метод и алгоритм оценки флотационной активности реагентов и особенности обработки изображений при решении данных задач, в [5,8] – описание метода вычисления флотационной активности реагентов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 132 наименования, изложена на 117 страницах машинописного текста и поясняется 26 рисунками и 5 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и положения, выносимые на защиту, практическая ценность, результаты работы.

В первой главе проведен анализ известных методов и устройств обработки изображений микроскопических размеров в жидкости, оценена возможность их применения для решения задачи оценки флотационной активности по изображению пузырька газа в жидкости.

Показано, что к настоящему времени не разработано метода обработки изображений мелкоразмерных и микроскопических объектов в жидкости, который учитывал бы быстроменяющиеся динамические процессы, приводящие к изменению формы наблюдаемого объекта, и позволял бы с требуемой точностью, определяемой погрешностями разрешающей способности оптико-электронного датчика, вычислять параметры контуров указанных объектов.

В результате анализа научно-технической литературы не выявлено применяемых на практике устройств, обеспечивающих вычисление флотационной активности в реальном времени с целью управления флотационным процессом. Известны лишь лабораторные приборы для вычисления поверхностного натяжения, основными недостатками которых являются наличие большого объема исследуемой жидкости при анализе, относительно высокая стоимость и сложность.

Обоснована целесообразность применения в разрабатываемом устройстве специализированных элементов обработки цифровых данных, таких как сигнальный процессор специализированные устройства на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), определены требуемые параметры, определяющие постановку задачи применительно к флотационному процессу и пути их достижения, которые являются входными параметрами для разрабатываемого вычислительного устройства.

Во второй главе разработаны математические модели обработки изображений в специализированном оптико-электронном устройстве для вычисления поверхностного натяжения жидкости $\sigma = M_{\text{пн}}(I_{\text{вх}}(E, u, v))$ и флотационной активности реагентов $\langle \text{act}_{\text{гi}} \rangle = M_{\text{фа}}(\sigma(t))$, позволяющие получить

значение поверхностного натяжения σ посредством обработки входного изображения $I_{\text{вх}}$, формируемого в результате преобразования непрерывного излучения интенсивности E , распределенного по пространственным направлениям u, v , а также активность реагента, определяемую входящими в реагент активностями $\text{act}_{\text{гi}}$ подреагентов гi и вычисляемую посредством анализа зависимости изменения поверхностного натяжения σ от времени t .

Составляющими математических моделей являются частные модели: ввода изображения $I_{\text{вх}} = I_{\text{вх}}(E, \alpha, u, v)$, фильтрации искажений изображения $I_{\text{ф}} = I_{\text{ф}}(I_{\text{вх}}, k_i)$, обеспечивающие уменьшение влияния шумов и уменьшение систематических искажений, вычисляемых в результате предварительной калибровки параметров k_i , определяющих систематические искажения; выделения контуров объектов $I_{\text{diff}} = I_{\text{diff}}(I_{\text{ф}})$ и обнаружения множества объектов $\langle \text{obj}_i \rangle = F_{\text{Obj}}(I_{\text{diff}})$, удовлетворяющих классу «пузырек», реализующие выбор выбора наибольшего пузырька и окончательную проверку принадлежности найденного объекта искомому пузырьку; вычисления уточненного контура $\text{cnt}_{x,y} = \text{Cntp}(I_{\text{diff}})$ пузырька путем построения непрерывной аппроксимирующей кривой в плоскости изображения, где $\text{cnt}_{x,y}$ – совокупность точек контура пузырька; вычисления поверхностного натяжения жидкости $\sigma = M_{\sigma}(\text{cnt}_{x,y})$ и вычисления флотационной активности реагента $\langle \text{act}_{\text{гi}} \rangle = M_{\text{фа}}(\sigma(t))$ по серии измеренных в заданные моменты времени поверхностных натяжений, изменяющихся под действием реагента.

Математическая модель ввода изображения описывает прохождение излучения видимого диапазона через оптические среды кюветы с жидкостью с размещенным в ней пузырьком при фронтальном освещении кюветы некогерентным направленным излучением и преобразование распределения потока излучения на входе приемника изображения в цифровое изображение $I(x, y)$, где x, y – координаты пиксела на получаемом изображении.

Согласно модели фильтрации производится устранение систематических искажений и шума. Для устранения систематических искажений вычисляются параметры k_i , характеризующие вносимые оптической системой искажения. Параметры k_i вычисляются однократно при калибровке оптической системы и размещении на рабочей сцене эталонного объекта obj_{Cal}

$$\langle k_i \rangle = \text{Cd}(I(x, y), \text{obj}_{\text{Cal}}), \quad (1)$$

где Cd – функция, позволяющая рассчитать калибровочные параметры.

Для фильтрации шума изображение I подвергается свертке:

$$I_{\text{ф}}(x, y) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 H_f(m, n) I_{\text{вх}}(x + m, y + n),$$

где $H_f(m, n)$ – матрица размерностью 3×3 , задающая коэффициенты фильтра.

С учетом корректирующих поправок $\Delta x, \Delta y$, вычисляемых на основе полученных в результате калибровки параметров k_i , запишем

$$I_{\text{ф}}(x, y) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 H_f(m, n) I_{\text{вх}}(x + m, y + n) + I_{\text{вх}}(\Delta x(k_i), \Delta y(k_i)). \quad (2)$$

Выделение контуров объектов изображения производится на основе дифференциальных методов и оператора Собела размерности 3×3

$$I_{\text{diff}} = I_{\text{diff}}(I_{\Phi}) = \sum_{m,n=1}^3 H_{\text{diff}}(m,n) \cdot f(x+m-2, y+n-2), \quad (3)$$

где H_{diff} – матрица, определяющая параметры оператора Собела.

Обнаружение множества объектов $\langle \text{obj}_i \rangle = F_{\text{Obj}}(I_{\text{diff}})$, удовлетворяющих классу «пузырек» производится следующим образом. Вычисляется значение критерия $d_{\text{окр}}$, характеризующего степень схожести верхней части объекта с полукругом с центром $O(o_x, o_y)$ радиуса R

$$d_{\text{окр}} = \left(\frac{S(w)}{\sum_{(n_1, n_2) \in G} f_{\text{окр}}(n_1, n_2)} - 1 \right)^{-1}, \quad f_{\text{окр}}(n_1, n_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } (n_1, n_2) \in G_{\text{кр}} \\ 0, & \text{если } (n_1, n_2) \notin G_{\text{кр}} \end{cases}$$

$$\forall (x, y) \in I_{\Phi} : (x, y) \in G_{\text{кр}} \Leftrightarrow (x - o_x)^2 + (y - o_y)^2 \leq R^2, \quad y \leq o_y,$$

где $S(w)$ – площадь очередного анализируемого объекта, описываемого набором параметров w ; $G_{\text{кр}}$ – область полукруга.

Рассчитывается показатель d_c , характеризующий близость пространственного положения пузырька к центру кадра

$$d_c = \left(\sqrt{(c_1 - m_1)^2 + (c_2 - m_2)^2} \right)^{-1},$$

где c_1, c_2 – центральный отсчет изображения; m_1, m_2 – центр тяжести объекта. Вычисляется разделяющая функция d

$$d(w) = S(w) \cdot d_{\text{окр}}(w) \cdot d_c(w), \quad (4)$$

где w – набор соответствующих параметров очередного объекта.

Искомым пузырьком является объект, для которого значение $d(w)$ максимально.

Согласно модели вычисления уточненного контура каждая пара координат точек контура (x_i, y_i) заменяется на соответствующую пару (x_i^*, y_i^*)

$$x_i^* = x_i^{\text{int}} \pm \varepsilon_x, \quad y_i^* = y_i^{\text{int}} \pm \varepsilon_y, \quad (5)$$

$$x_i^{\text{int}} = \sqrt{\frac{1}{2n+1} \cdot \sum_{j=0}^{2n+1} x_{i+j-n}^2}, \quad y_i^{\text{int}} = \sqrt{\frac{1}{2n+1} \cdot \sum_{j=0}^{2n+1} y_{i+j-n}^2},$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sum_D (x_i - x_i^{\text{int}})^2}{2n+1}, \quad \varepsilon_y = \frac{\sum_D (y_i - y_i^{\text{int}})^2}{2n+1},$$

где D – область интерполяции.

Вычисление поверхностного натяжения жидкости $\sigma = M_{\sigma}(c_{\text{pres}_{x,y}})$ производится путем вычисления на различной высоте диаметров пузырька и извлечения соответствующих данных из предварительно рассчитанной на основе решения уравнения Лапласа таблицы. Вычисление флотационной

активности реагента осуществляется согласно математической модели $\langle \text{act}_{\text{ri}} \rangle = M_{\text{фа}}(\sigma(t))$ и заключается в декомпозиции так называемой релаксационной кривой $\sigma(t)$ на отдельные составляющие ее экспоненты и сводится к вычислению пар $\langle B_i, D_i \rangle$ параметров, определяющих каждую экспоненту при общем количестве экспонент n .

Обобщенные математические модели представлены в следующем виде:

$\sigma = M_{\sigma}(\text{Cntp}(F_{\text{Obj}}(I_{\text{diff}}(I_{\text{ф}}(I_{\text{вх}}(E, u, v), k_i))))$ - вычисления поверхностного натяжения жидкости,

$\langle B_i, D_i, n |_{i=1..n} \rangle = M_{\text{фа}}(\sigma(t), t=t_0..t_m)$ - численной оценки активности реагента.

Отличительной новизной рассмотренной математической модели являются: введение дополнительных процедур формирования непрерывного сглаженного контура и процедур уточнения контура пузырька, позволяющих с требуемой точностью измерить геометрические характеристики контура, что позволяет в условиях низкого разрешения исходного изображения обеспечить требуемую точность определения поверхностного натяжения жидкости; введение процедур обнаружения и распознавания искомого пузырька; уменьшенная вычислительная сложность используемых в математической модели процедур, позволяющая реализовать их на ПЛИС. Указанные отличительные особенности в конечном итоге обеспечивают обработку данных в реальном времени с достаточной точностью измерения поверхностного натяжения (не ниже лабораторных методов) при использовании серийно выпускаемых средств получения изображений.

В третьей главе представлены; метод вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов по цифровому изображению расположенного в ней пузырька газа; алгоритм вычисления поверхностного натяжения жидкости; алгоритм численной оценки флотационной активности реагентов; структурно-функциональная схема специализированного оптико-электронного устройства для вычисления флотационной активности реагентов.

Сущность метода вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов заключается в выполнении следующих этапов: предварительной калибровке оптико-электронной системы посредством размещения сферы известного размера вблизи края рабочей сцены, формировании в исследуемой жидкости пузырька газа, получении изображения пузырька газа, вычислении геометрических характеристик контура пузырька газа, вычислении поверхностного натяжения жидкости посредством анализа вычисленных геометрических характеристик контура пузырька в заданные моменты времени. Новизна метода заключается во введении операций получения цифрового изображения, анализа цифрового дискретного контура пузырька и преобразования его в непрерывный контур, уточнения координат контура в заданных точках и расчете поверхностного натяжения в заданные моменты времени, что позволило в результате получить численную оценку флотационной активности.

На базе предложенного метода разработаны алгоритм вычисления поверхностного натяжения жидкости и алгоритм численной оценки флотационной активности реагентов.

Алгоритм вычисления поверхностного натяжения жидкости приведен на рисунке 1.

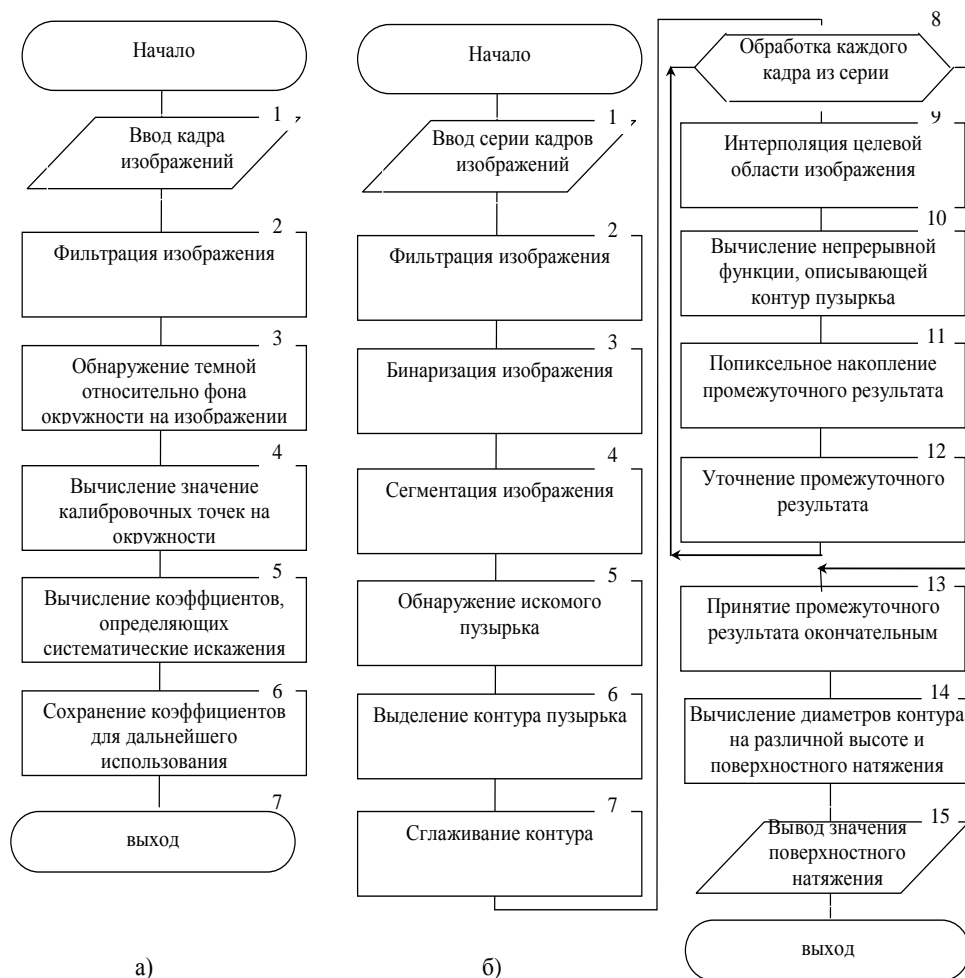


Рис. 1. Алгоритм вычисления поверхностного натяжения жидкости

а) – алгоритм предварительной калибровки и определения параметров оптико-электронной системы, б) - алгоритм вычисления поверхностного натяжения по серии кадров относительно низкой разрешающей способности

Первоначально до выполнения основных операций по вычислению поверхностного натяжения жидкости производится предварительная калибровка оптико-электронной системы, используемой для получения изображений с целью повышения точности последующих измерений (рисунок 1, а). Согласно алгоритму (рисунок 1, а), на рабочей сцене размещается тестовый объект, представляющий собой металлический шарик известного размера, на основе анализа изображения которого (патент №2349899) вычисляются коэффициенты, определяющие влияние систематических изображений, которые являются постоянными для

используемой оптической системы. Новизна предложенного решения калибровки оптико-электронной системы заключается в вычислении калибровочных параметров по изображению простого геометрического объекта – сферы при ее произвольном размещении на рабочей сцене, что позволило отказаться от сложной процедуры размещения в жидкости традиционного калибровочного объекта в виде шахматной плоскости и повысить точность получаемых изображений.

Вычисление поверхностного натяжения выполняется согласно алгоритму (рисунок 1, б). Сущность алгоритма сводится к получению изображения, минимизации влияния оптических и случайных погрешностей, обнаружению на отфильтрованном изображении анализируемого пузырька газа, вычислению и последующему уточнению параметров контура пузырька, вычислению поверхностного натяжения жидкости, согласно разработанным расчетным формулам.

Новизна алгоритма заключается по введению дополнительных операций уточнения контура пузырька, позволяющих снизить погрешность вычисления поверхностного натяжения и как следствие повысить точность вычисления флотационной активности. Полученное поверхностное натяжение используется далее и как самостоятельная величина, и как входной параметр для алгоритма численной оценки активности анализируемого реагента.

Сущность алгоритма численной оценки флотационной активности реагентов (рисунок 2) заключается в получении цифрового изображения пузырька газа в заданные моменты времени t_i , вычислении поверхностного натяжения в заданные моменты t_i , вычислении и уточнении дискретных параметров релаксационной кривой, вычислении количества пар D_i , B_i и их значений, определяющих активность реагента.

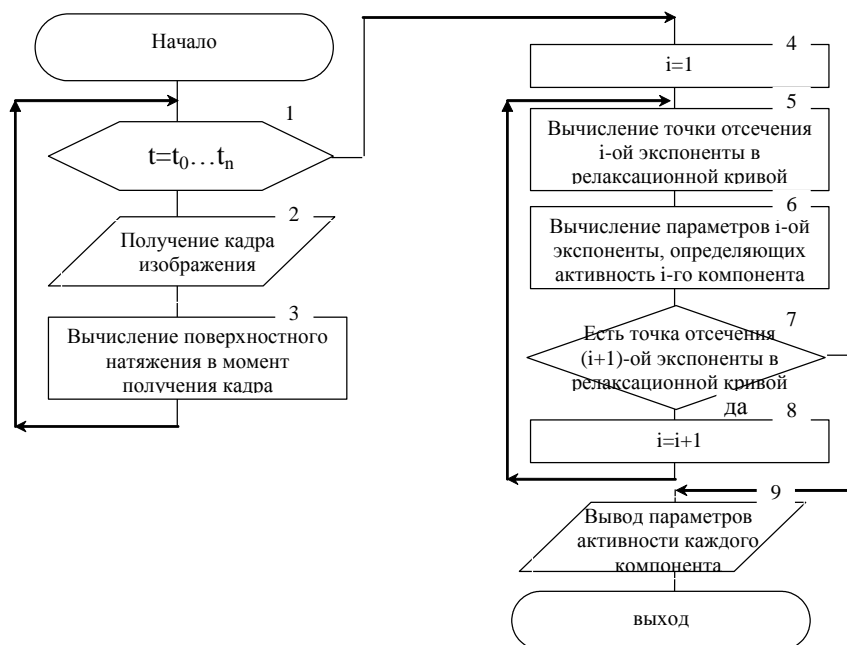


Рис. 2 – Алгоритм численной оценки флотационной активности реагентов

Структурно-функциональная организация специализированного оптоэлектронного устройства для вычисления флотационной активности реагентов представлена на рисунке 3.

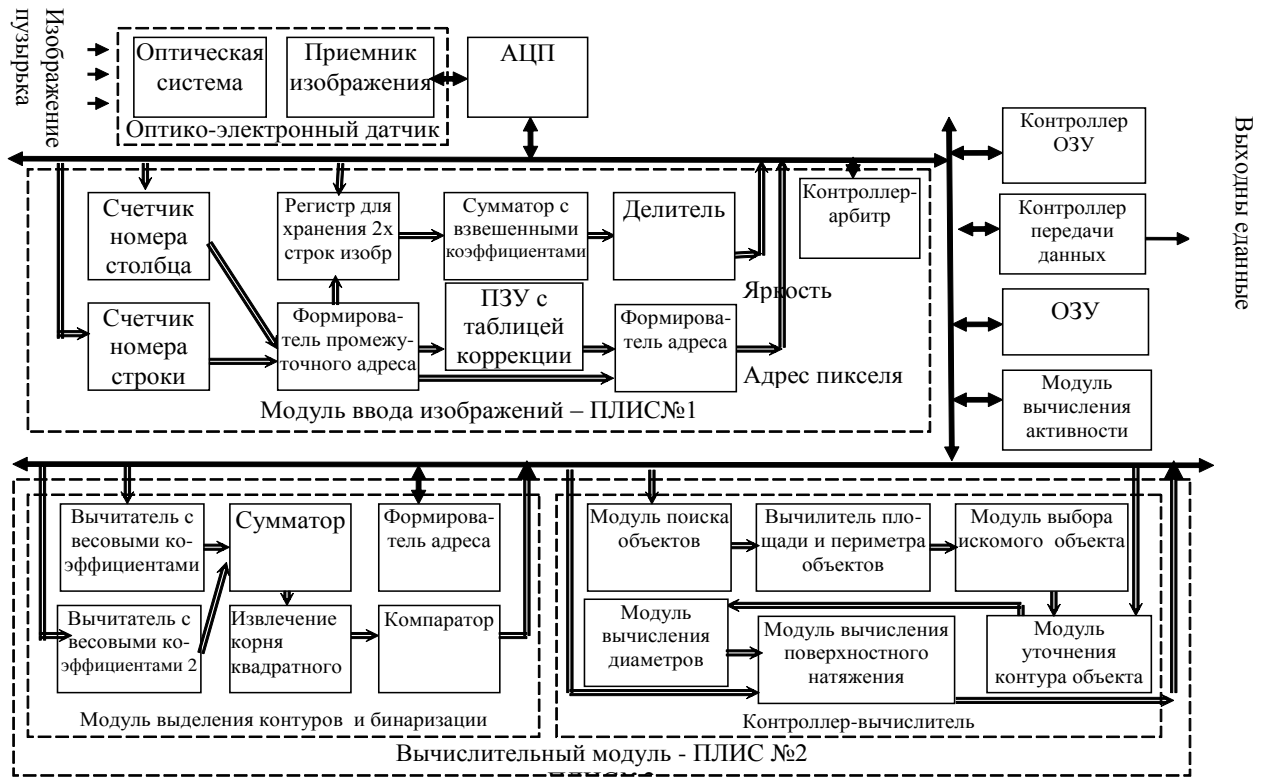


Рис. 3 – Структурно-функциональная организация специализированного устройства для вычисления поверхностного натяжения жидкости

Специализированное оптоэлектронное устройство для вычисления флотационной активности реагентов содержит оптоэлектронный датчик, АЦП, модуль ввода изображений на базе первой ПЛИС, вычислительный модуль на базе второй ПЛИС, модуль вычисления активности на базе цифрового сигнального процессора (ЦСП), ОЗУ, контроллер ОЗУ и контроллер передачи данных. Оптоэлектронный датчик состоит из оптической системы и приемника изображения. Модуль ввода изображения предназначен для ввода и предварительной обработки изображения и функционирует следующим образом. Поступающие последовательно пиксели кадров изображения с оптоэлектронного датчика подвергаются аналого-цифровому преобразованию в АЦП и вводятся в регистр модуля ввода изображений, предназначенный для хранения $(2x+1)$ пикселей (где x – ширина кадра изображения). Текущий пиксель и пиксели в восьмисвязной окрестности далее подвергаются фильтрации и поступают на сумматор с взвешенными коэффициентами и далее на делитель, в результате на выходе делителя выдается значение яркости очередного пикселя с минимизированными случайными шумами яркости. Счетчики номера столбца, строки и формирователь промежуточного адреса определяют на изображении координаты очередного корректируемого пикселя. Данные о координатах текущего пикселя используются для устранения

систематических искажений координат пикселя, обусловленных особенностями оптической системы. Исправленные координаты, на которые для коррекции систематических искажений оптической системы смещается пиксель, вычисляет формирователь адреса. ПЗУ с таблицей коррекции содержит предварительно рассчитанную в процессе калибровки информацию о смещении пикселей в зависимости от их текущих координат, поступающих с формирователя промежуточного адреса. Одновременно данные о координатах текущего пикселя служат для устранения систематических искажений координат пикселя, обусловленных особенностями оптической системы и приемника изображения. Скорректированные координаты пикселя вычисляет формирователь адреса.

Таким образом, на выходе модуля ввода изображений последовательно формируются адрес и значение пикселя, который через системную шину записывается в ОЗУ. В результате в ОЗУ находится очередной кадр изображения с устраненными систематическими искажениями и шумом. Далее обработка изображения производится в вычислительном модуле (ПЛИС №2). Модуль поиска объектов считывает яркости пикселей из ОЗУ и формирует множество обособленных объектов на изображении. Для каждого найденного объекта в вычислителе площади и периметра объектов вычисляется его площадь и периметр, которые подаются в модуль выбора искомого объекта. Модуль выбора объекта выполняет распознавание искомого пузырька. Для найденного пузырька в модуле выделения контуров и бинаризации производится выделение контура и приведение изображения пузырька к двухградационному виду. Для этого вычитатели с весовыми коэффициентами, сумматор и модуль извлечения квадратного корня формируют градиентное изображение области пузырька, которые далее подаются на компаратор. В результате на выходе модуля выделения контуров и бинаризации формируется контур обрабатываемого искомого пузырька и записывается в ОЗУ по координатам, заданным формирователем адреса. Из ОЗУ контур пузырька считывается модулем уточнения контура объекта, который производит вычисление уточненных координат контура пузырька для более точного определения поверхностного натяжения. Далее вычисляются диаметры пузырька на разных высотах и подаются в модуль вычисления поверхностного натяжения, который на выходе формирует значение поверхностного натяжения жидкости, вычисленное по текущему изображению. Полученные за заданный интервал времени поверхностные натяжения жидкости записываются в ОЗУ и подаются в модуль вычисления активности, который вычисляет значения величин, характеризующих активность каждого компонента в реагенте. Вычислительным элементом является цифровой сигнальный процессор, обеспечивающий расчет параметров составляющих релаксационную кривую экспонент. Вычисленные значения поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагента через контроллер передачи данных передаются для дальнейшей обработки.

Для проведения экспериментальных исследований разработанного оптико-электронного устройства и проверки адекватности математической модели его функционирования создан аппаратно-программный стенд.

В четвертой главе приводится описание аппаратно-программного стенда для проверки адекватности полученной в результате теоретических исследований математической модели функционирования специализированного устройства вычисления поверхностного натяжения жидкости, метода и алгоритмов оценки флотационной активности и поверхностного натяжения жидкости, результаты экспериментальных исследований.

В состав аппаратно-программного стенда (рисунки 3, 4а) входят оптическая система, фотокамера, ПЭВМ со специальным программным обеспечением (СПО), модуль управления фотокамерой, ПЛИС-модуль вычисления поверхностного натяжения (рисунок 4,б).

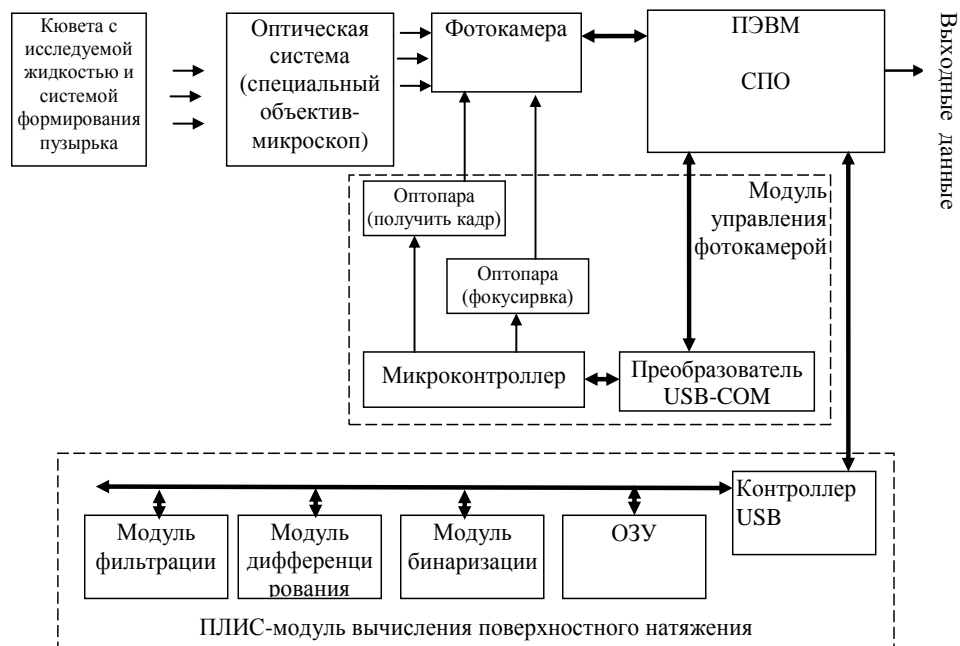


Рис. 3 – Структурно-функциональная схема аппаратно-программного стенда для проведения испытаний

Методика проведения экспериментальных исследований заключалась в следующем. В кювете с жидкостью формировался пузырек воздуха, после чего вычислялось поверхностное натяжение жидкости без реагента. Затем добавлялась капля реагента и одновременно с этим фотокамера Canon автоматически в заданные моменты времени посредством управления через модуль управления фотокамерой получала команды на получение кадра изображения пузырька. Получаемые снимки передавались в ПЭВМ и в ПЛИС-модуль вычисления поверхностного натяжения, который реализовывал блоки 1-7 алгоритма (рисунок 1,б) и полученные данные передавал обратно в ПЭВМ, реализующей блоки 8-15 алгоритма. В результате в ПЭВМ сохранялся набор вычисленных поверхностных натяжений за заданные интервалы времени. По полученному набору ПЭВМ реализовывала алгоритм численной оценки

активности поверхностно активного вещества. Результаты проведенных экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

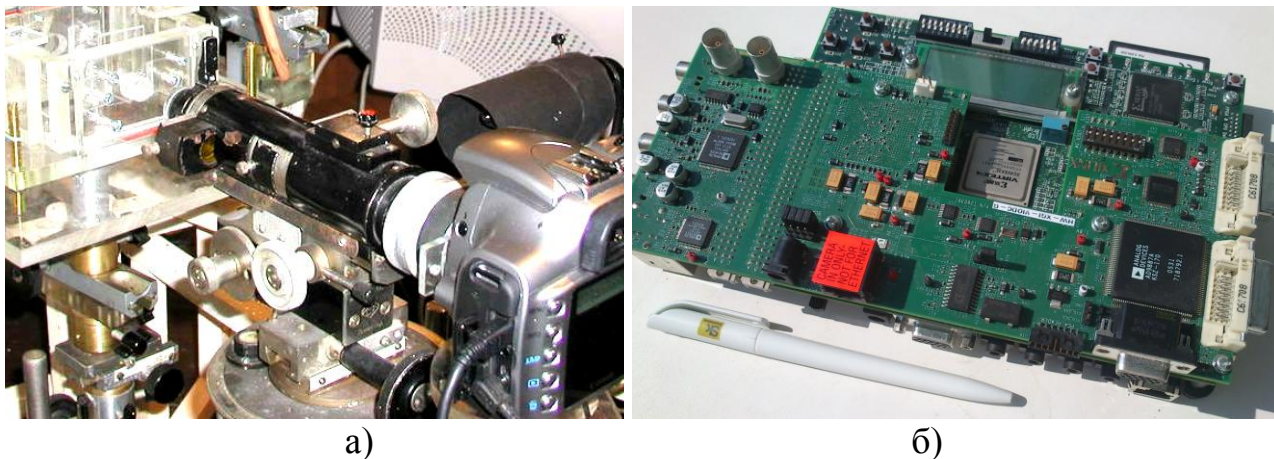


Рис. 4 – а) аппаратно-программный стенд для проведения испытаний, б) ПЛИС-модуль вычисления поверхностного натяжения

Таблица 1

Сравнительная характеристика параметров специализированного оптоэлектронного устройства для вычисления флотационной активности реагентов и аналогов

№	Выполняемая функция и значение характеристики	Специализированное ОЭУ для вычисления флотационной активности реагентов	Пузырьковый тензиометр BP2	Установка для измерения поверхностного натяжения	Тензиометр Нун МТ-9	Промышленная система оценки активности
1	Вычисление поверхностного натяжения	Да	Да	Да	Да	Не реализовано
2	Погрешность вычисления поверхностного натяжения	0,06мН/м	0.1 мН/м	0.1 мН/м	0.1 мН/м	Не реализовано
3	Время вычисления поверхностного натяжения	0,012с	Не реализовано	Не реализовано	0,1 с	Не реализовано
4	Время вычисления флотационной активности	от 15 до 30 мин	Не реализовано	Не реализовано	Не реализовано	От 60 до 120 мин
5	Минимально необходимый объем реагента	от 0,1 до 5 г	от 10 до 100г	от 1 до 10 г	от 10 до 100г	0,5 – 20 кг

Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил адекватность разработанных теоретических положений полученным экспериментальным данным. Разработанное устройство позволяет с большей точностью (в $1,7 \pm 0,35$ раза), большей скоростью (в $8,3 \pm 1,7$ раз) вычислить величину поверхностного натяжения жидкости, а также с многократно большей скоростью получить численную оценку флотационной активности реагента в промышленных условиях при объемах веществ, измеряемых единицами грамм.

Таким образом, анализ таблицы подтверждает достижение цели работы – а именно разработанные метод, алгоритмы и оптико-электронное устройство обеспечивают вычисление поверхностного натяжения и численную оценку флотационной активности в реальном времени с точностью, не ниже известных лабораторных приборов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

При решении поставленной в диссертационной работе задачи получены следующие основные результаты.

1. Разработана математическая модель обработки изображений в специализированном оптико-электронном устройстве для вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов, отличительными особенностями которой являются введение операций повышения точности измерений контура пузырька и вычисления параметров его контура, позволяющей в динамике вычислять поверхностное натяжение жидкости и тем самым определять активность флотореагента.

2. Разработан метод вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов с точностью выше точности применяемых лабораторных методов на основе анализа цифрового изображения пузырька относительно низком разрешении (не менее 800x600 пикселей), который может быть реализован с использованием программируемых логических интегральных схем, и позволяет в реальном времени вычислять поверхностное натяжение и количественно оценивать флотационную активность реагентов.

3. Разработаны алгоритмы вычисления поверхностного натяжения жидкости по микро- и миллископическим изображениям пузырьков газа в исследуемой жидкости и флотационной активности реагентов при небольших (от 0,1г до 5г) объемах реагентов.

4. Разработана структурно-функциональная организация специализированного вычислительного устройства для вычисления поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности реагентов, отличающаяся введением новых блоков и связей между ними, построенное с использованием программируемых логических интегральных схем и сигнального процессора, позволяющее в реальном времени вычислять параметры, определяющие технологический процесс флотации.

5. Выполнены экспериментальные исследования с использованием химических реагентов и чистых жидкостей, подтверждающие адекватность созданной математической модели, большую по сравнению с лабораторными методами точность вычислений, а также на два порядка меньшее затрачиваемое время на численную оценку параметров реагента.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Козлов, П.С. Специализированное оптико-электронное устройство вычисления поверхностного натяжения жидкости [Текст] / П.С. Козлов, М.И. Труфанов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – №2. – Часть 1. – С. 53-59.

2. Козлов, П.С. Алгоритм уточнения вычисленных координат контура пузырька газа в жидкости при измерении поверхностного натяжения [Текст] / П.С. Козлов, Е.В. Лукьянчиков, М.И. Труфанов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 2. – Часть 2. – С. 90 - 95.

3. Козлов, П.С. Оптико-электронная система измерения поверхностного натяжения жидкости и оценки флотационной активности веществ [Текст] / П.С. Козлов, М.И. Труфанов, В.И. Мелик-Гайказян // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – №2. – С. 59-64.

4. Козлов, П.С. К использованию цифровой технологии для подбора аполярных флотореагентов, оценки их содержания в пульпе и управления процессом [Текст] / П.С. Козлов, В.И. Мелик-Гайказян, А.В. Драганов, Н.П. Емельянова, М.И. Труфанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С.349-356.

Иностранные статьи в рецензируемых журналах

5. Kozlov, P. Investigation of froth flotation and selection of reagents on the basis of the mechanism of their effect. Report 1. Substantiation of selected methods for investigation of the process [text]/ P.S. Kozlov, V.I. Melik-Gaykazyan and others// Russian Journal of non-ferrous metals. – 2009. – Vol. 50. – №2. –pp. 69-80.

Иностранные труды зарубежных конференций

6. Kozlov, P. Study of interaction of flotation reagents with fine particles of highly mineralized coal slimes [text]/ P.S.Kozlov, I.K.Deberdegeev, I.B.Linev, V.I.Melik-Gaykazyan, V.M.Avdohin// International coal preparation congress and exhibition. – China, 2006. – pp. 378-385.

Патент на изобретение РФ

7. Пат. №2349899РФ, МКИ G01N13/02. Устройство для измерения поверхностного натяжения жидкости и оценки флотационной активности флотореагента / П.С. Козлов, Н.В. Алябьев, М.И. Труфанов. – №2007133058 заявл. 3.09.2007; опубл. 20.03.09, Бюл. № 8. - 7 с.

Материалы конференций

8. Козлов, П.С. О капиллярном механизме действия реагентов при пенной флотации, развитии методов его исследования и подбора реагентов. Обоснование выбранных методов исследования процесса (часть 1) [Текст] / П.С. Козлов, В.И. Мелик-Гайказян, Н.П. Емельянова и др. // Неделя горняка – 2008: материалы научно- технической конференции. – Москва, 2008. – С. 272-281.

9. Козлов, П.С. О капиллярном механизме действия реагентов при пенной флотации, развитии методов его исследования и подбора реагентов [Текст] /

П.С. Козлов и др. // Неделя горняка – 2008: материалы научно- технической конференции. – Москва, 2008. – С. 228-236.

10. Kozlov, P. Machine vision system for measuring the surface tension of liquids and evaluating the flotation activity of substances [text] / P.S. Kozlov/ Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies PRIA-9-2008. – С. 346-349.

11. Козлов, П.С. Автоматизированный оптико-телевизионный комплекс измерения поверхностного натяжения жидкости и флотационной активности веществ [Текст] / П.С.Козлов, Е.В.Лукьянчиков, М.И.Труфанов / Телевидение: передача и обработка изображений: материалы 5-й Международной конференции. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 54-56.

12. Козлов, П.С. Оптико-электронная система измерения уровня пены [Текст] /П.С. Козлов, М.И. Труфанов / Интеллектуальные и информационные системы: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Тула: Тульский государственный университет, 2007. – С. 122 – 123.

13. Козлов, П.С. Метод оценки содержания апполярных флотореагентов в пульпе по цифровому изображению пузырька газа [Текст] / П.С. Козлов / Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: материалы 7-й Международной конференции «Распознавание-2005». – Курск: КурскГТУ, 2005. – С. 81-83.

Подписано к печати 21.05.2003г. Формат 60х84 1/16.

Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ ____.

Юго-западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

