

## СТАТЬИ

УДК 681.518.5

DOI 10.17513/snt.40238

**ОЦЕНКА КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ  
ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕЧИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ  
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ****Булатов В.В.***ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru*

Работа посвящена автоматизации процесса оценки крупности частиц в физической модели печи кипящего слоя. В статье проведен анализ работ, связанных с применением систем технического зрения в металлургии, и работ, посвященных применению печей кипящего слоя на производстве, который показал отсутствие исследований по рассматриваемой проблеме. Для экспериментального определения гранулометрического состава «частиц» в физической модели печи кипящего слоя было решено применить оптическую систему контроля на базе технологии технического зрения. Исследования проводились на лабораторной установке, включающей в себя: физическую модель печи кипящего слоя, которая имитирует окислительный обжиг цинковых концентратов; камеру технического зрения; объектив и ЭВМ для анализа и обработки получаемых изображений. Для имитации частиц цинкового концентрата в модель печи были загружены пенополистироловые шарики различных диаметров. Разработан алгоритм классификации частиц по получаемой выборке изображений. Алгоритм учитывает возможность наложения одной частицы на другую, определяет частицы округлой формы и распределяет частицы в одну из групп крупности (малые, средние или большие). Реализация разработанного алгоритма была осуществлена в программной среде LabVIEW с использованием пакета IMAQ Vision. Полученные результаты можно будет использовать в дальнейшем при создании модели баланса популяций для агломератов.

**Ключевые слова:** печь кипящего слоя, классификация частиц, модель баланса, оптический контроль, техническое зрение

**ASSESSMENT OF PARTICLE SIZE  
OF A PHYSICAL MODEL OF A FLUIDIZED BED  
FURNACE BASED ON MACHINE VISION TECHNOLOGY****Bulatov V.V.***Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg,  
e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru*

The work is devoted to the automation of the process of particle size assessment in a physical model of a fluidized bed furnace. The article analyzes works related to the use of machine vision systems in metallurgy and works devoted to the use of fluidized bed furnaces in production, which showed the lack of research on the problem under consideration. To experimentally determine the granulometric composition of “particles” in a physical model of a fluidized bed furnace, it was decided to use an optical control system based on machine vision technology. The studies were carried out on a laboratory setup that included: a physical model of a fluidized bed furnace that simulates oxidative roasting of zinc concentrates; a machine vision camera; a lens and a computer for analyzing and processing the resulting images. To simulate zinc concentrate particles, polystyrene foam balls of various diameters were loaded into the furnace model. An algorithm for classifying particles based on the resulting sample of images has been developed. The algorithm takes into account the possibility of superimposing one particle on another, identifies rounded particles and distributes the particles into one of the size groups (small, medium or large). To implement the developed algorithm, it was implemented in the LabVIEW software environment using the IMAQ Vision package. The results obtained can be used in the future when creating a population balance model for agglomerates.

**Keywords:** fluidized bed furnace, particle classification, balance model, optical inspection, machine vision

**Введение**

Значение цинка в современной промышленности очень велико. Примерно половину всего производимого в мире цинка используют для защиты различных изделий от коррозии. Помимо этого, цинк применяется при изготовлении различных сплавов, например бронзы, мельхиора. Основное сырье для производства цинка обычно находится в сульфидном состоянии – сфалерит (ZnS). Первым переделом в гидрометаллургическом способе получения цинка являет-

ся окислительный обжиг в печах кипящего слоя. Технология кипящего слоя находит широкое применение в промышленности.

В печи кипящего слоя (КС) сыпучий материал взаимодействует с проходящим через него нагретым газовым потоком, интенсивно перемещающим твердые частицы в так называемом кипящем слое. Нагрев печи кипящего слоя осуществляют путем сжигания топлива непосредственно в слое или в выносных топках под газораспределительным устройством [1, с. 63].

К преимуществам печей кипящего слоя в сравнении с печами других типов следует отнести высокую производительность (выше в 3–4 раза); улучшение качества огарка, что увеличивает прямое извлечение цинка из цинковых концентратов на 1–2%; агрегаты для обжига в кипящем слое легко поддаются механизации и автоматизации, что улучшает условия труда. Помимо этого, печи для обжига в кипящем слое имеют простую конструкцию, комплектуются из стандартного оборудования и могут быть в короткие сроки построены на любом металлургическом предприятии [2, с. 17].

Исследование процесса обжига цинковых концентратов рассмотрено в ряде работ. Например, в одной из работ авторами был предложен способ регулирования подачи кислорода в зависимости от количества загружаемой шихты, который способствует улучшению технико-экономических показателей процесса обжига цинковых сульфидных концентратов в печах кипящего слоя [3]. В другой работе был представлен новый немеханический метод селективной дезинтеграции сложных минеральных комплексов, основанный на обжиге сульфидных свинцово-цинковых руд в атмосфере водяного пара [4].

Применение систем технического зрения (СТЗ) при контроле технологических параметров в металлургии отражено в следующих работах. В исследовании 2017 г. была представлена СТЗ, которая позволяет обеспечить повышение эффективности управления процессом производства алюминия в электролизерах [5]. Предложена методика регистрации и анализа излучения криолитоглиноземного расплава, позволяющая определить точное количество корректируемых добавок фторида алюминия и фторированного глинозема в течение 30–45 с.

Ранее в работе авторов была предложена реализация СТЗ для контроля положения расплава в индукторе электромагнитной левитационной печи и представлены результаты экспериментальной апробации алгоритма слежения за траекторией движения расплава в индукторе на примере плавления образцов алюминия во взвешенном состоянии [6]. А также предложено использовать оптические методы контроля и технологии распознавания образов с использованием сверточных пирамидальных нейронных сетей для детектирования дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования [7].

В иной статье рассматривалась проблема оценки геометрических параметров брикета и его поверхностных свойств

по их цифровым изображениям при помощи камер технического зрения. Разработана методика оценки объема брикета с учетом смещения изображения в плоскости калибровки. Получены расчетные значения зависимости относительной погрешности измерения при ошибке позиционирования объекта с использованием методики компенсации и без нее [8].

Однако вопрос, отражающий методику классификации частиц руды в объеме рабочего псевдооживленного слоя, не нашел широкого рассмотрения.

**Цель исследования** – разработка алгоритма оценки крупности частиц, перемещающихся в модели печи кипящего слоя, на базе технологии технического зрения с целью подготовки входного гранулометрического состава частиц модели баланса популяций агломератов.

#### **Материалы и методы исследования**

В процессе окисления сульфидов цинка в печах псевдооживленного слоя гранулометрический состав получившегося огарка будет влиять на полноту и скорость последующего выщелачивания. Технология псевдооживленного слоя в процессе окислительного обжига цинковых концентратов позволяет вести непрерывную загрузку материала в объем агрегата параллельно с удалением продуктов обжига самотеком.

В псевдооживленном слое можно наблюдать такое явление, как сегрегация – преимущественная концентрация частиц определенной крупности в различных по высоте зонах в печи. Разделение частиц на основе этого явления позволяет классифицировать смеси с различным гранулометрическим составом. Но применение данной технологии затруднительно из-за необходимости недостижимо точного регулирования параметров процесса.

Наряду с температурой, скоростью подачи дутья и твердого агента, на процесс обжига оказывает влияние и гранулометрический состав сырья. Увеличенная средняя крупность твердого агента приводит к быстрому износу футеровки печи кипящего слоя за счет ее соударения с частицами и изменяет уставку расхода дутья для поддержки псевдооживленного состояния слоя. Наряду с этим увеличение средней крупности твердого агента увеличивает вероятность столкновения больших частиц (агломератов) друг с другом, а значит, интенсифицирует процесс пылеобразования и, следовательно, еще более активного пылевыноса. Мелкие частицы будут либо, не успев прореагировать, попадать в циклон, либо вылетать вместе с об-

жиговыми газами. Высокая концентрация крупных частиц в кипящем слое также увеличивает время, необходимое для полного протекания реакции обжига. При высоком содержании мелкодисперсной фракции количество отводящегося огарка через слив будет уменьшаться, а доля пылесодержания в обжиговых газах расти.

Таким образом, важно определение рационального гранулометрического состава цинкового концентрата.

Для исследования крупности частиц была использована физическая модель печи кипящего слоя. Структурная схема лабораторной установки с физической моделью печи кипящего слоя представлена на рис. 1. Диффузор, расположенный под корпусом, предназначен для равномерного распределения потока воздуха, подаваемого вентилятором. Для имитации частиц цинкового

концентрата используются пенополистироловые шарики различных диаметров.

Для получения изображения частиц в объеме физической модели печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов была использована камера технического зрения Basler acA640-120gc с объективом Ricoh FL-CC2514-2M ( $f=25$  mm, C-mount,  $bf=11.5$  mm).

На начальном этапе была разработана блок-схема для классификации частиц по крупности (рис. 2), которая отображает процесс обработки изображения и процесс классификации частиц на группы: мелкие, средние и крупные. В таблице представлены результаты ручной классификации групп крупности частиц, количество частиц по группам и размеры частиц на матрице камеры с учетом характеристик объектива и расстояния от камеры до модели печи КС (165 мм).

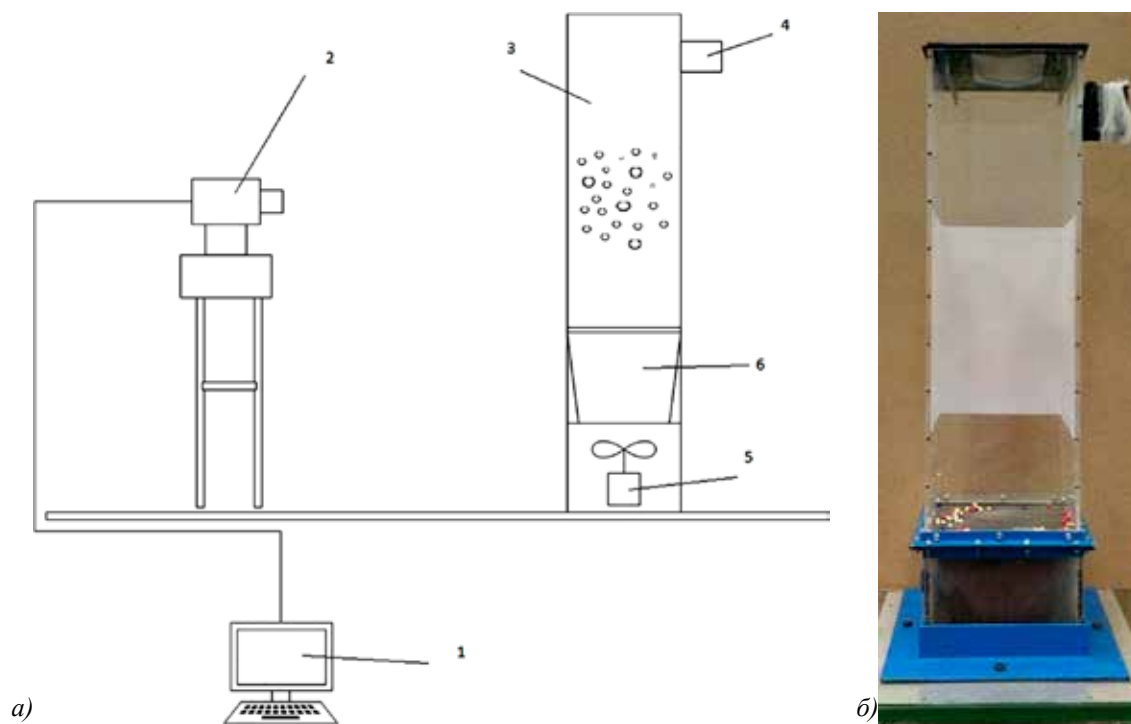


Рис. 1. Лабораторная установка: а) структурная схема лабораторной установки: 1 – ЭВМ; 2 – камера технического зрения; 3 – модель печи КС; 4 – отвод газа и мелких частиц; 5 – вентилятор; 6 – диффузор; б) внешний вид модели печи КС

#### Результаты ручной классификации групп крупности частиц

Группа крупности	Реальные размеры, мм	Количество частиц в объеме всей печи, шт.	Размеры на матрице, pix
Крупные	10–12	40	21,6–32,4
Средние	6–8	60	13,5–21,59
Мелкие	1–4	45	2,7–13,49

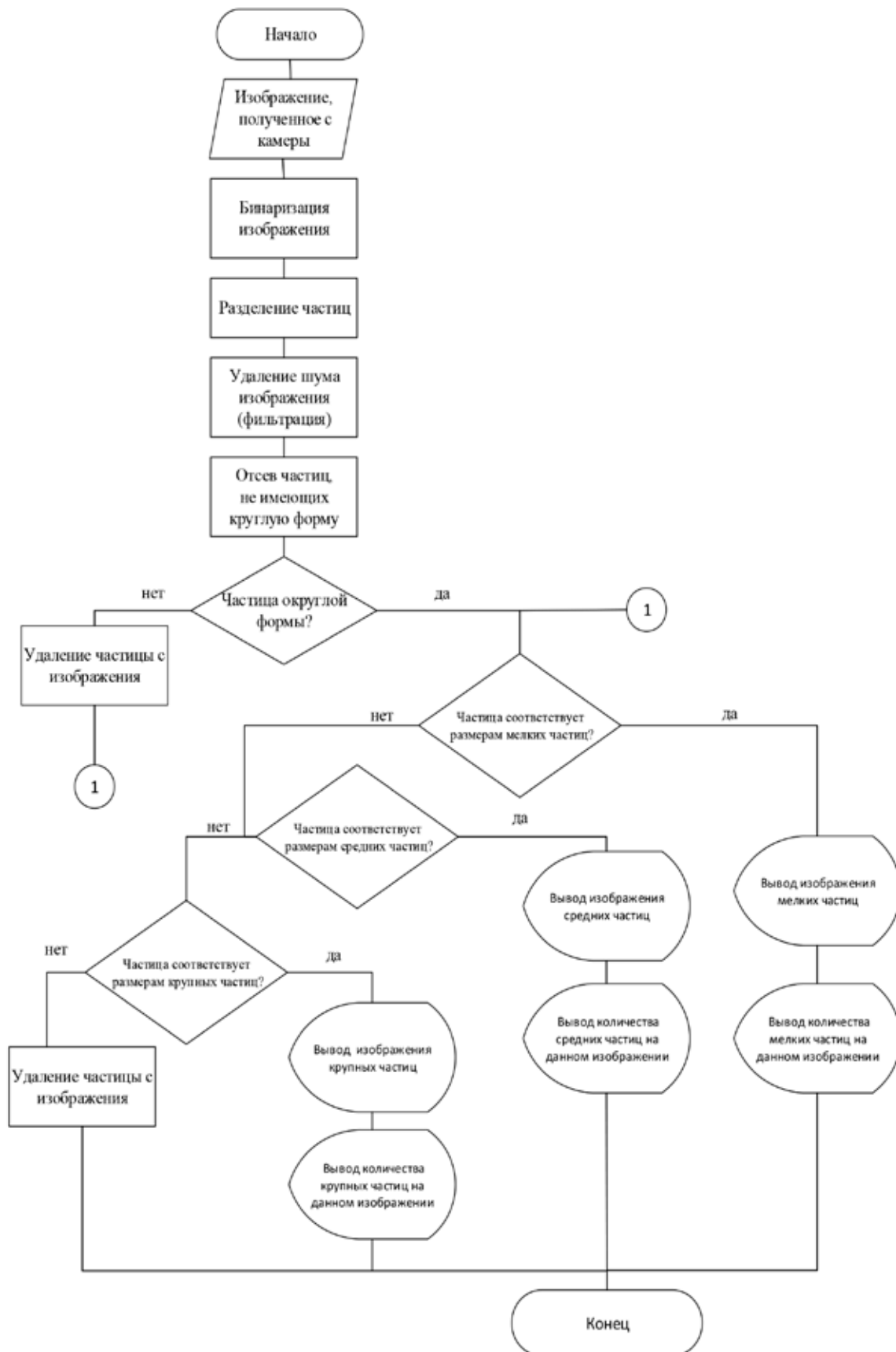


Рис. 2. Цикл алгоритма классификации частиц по крупности (по диаметру)

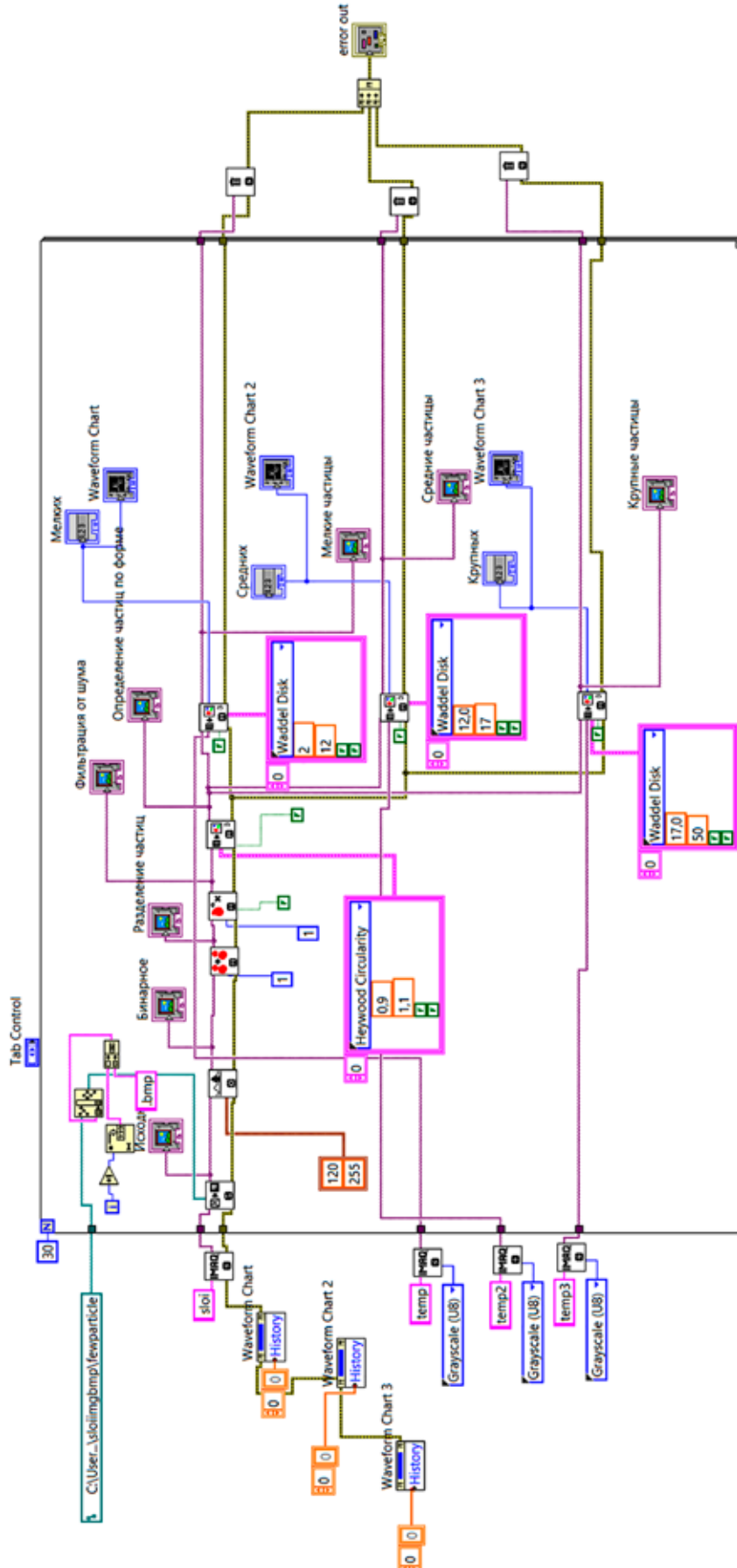


Рис. 3. Программа, реализованная в LabVIEW на основе разработанного алгоритма

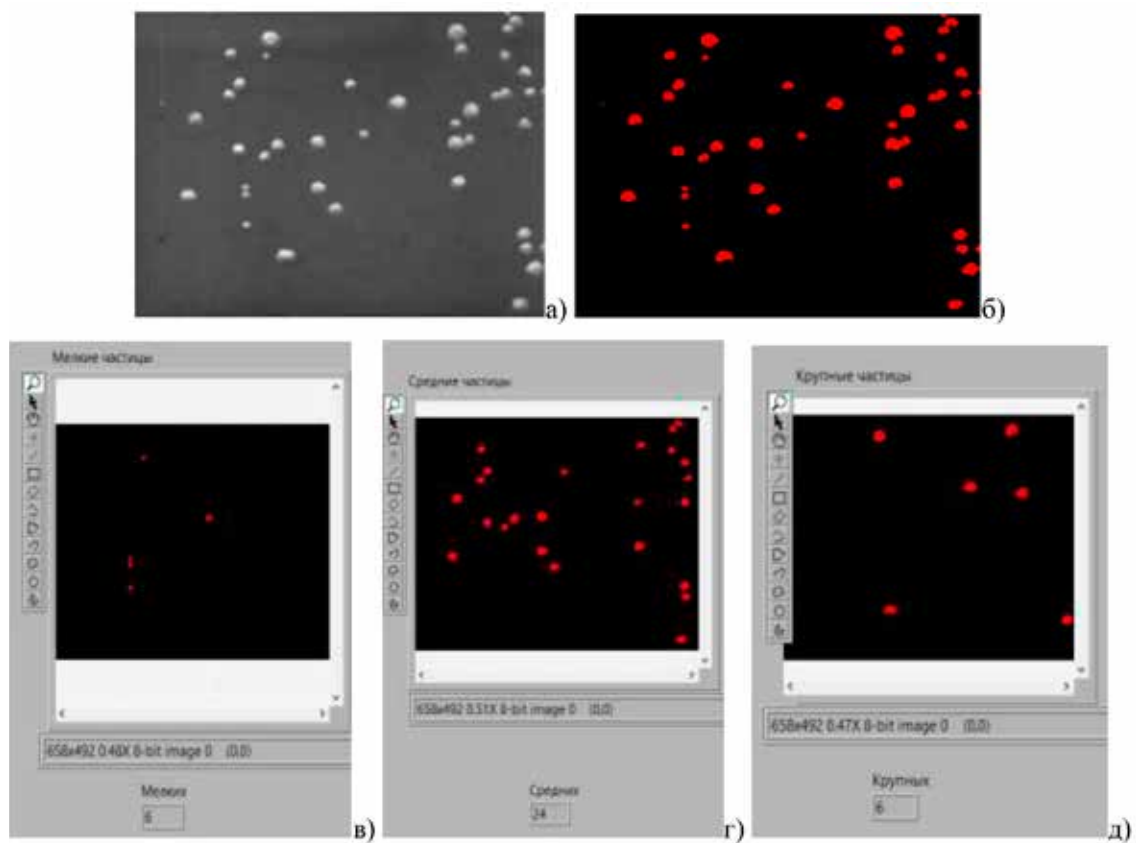


Рис. 4. Результаты классификации: а) исходное изображение; б) изображение после обработки; в) выявленные мелкие частицы; г) выявленные средние частицы; д) выявленные крупные частицы

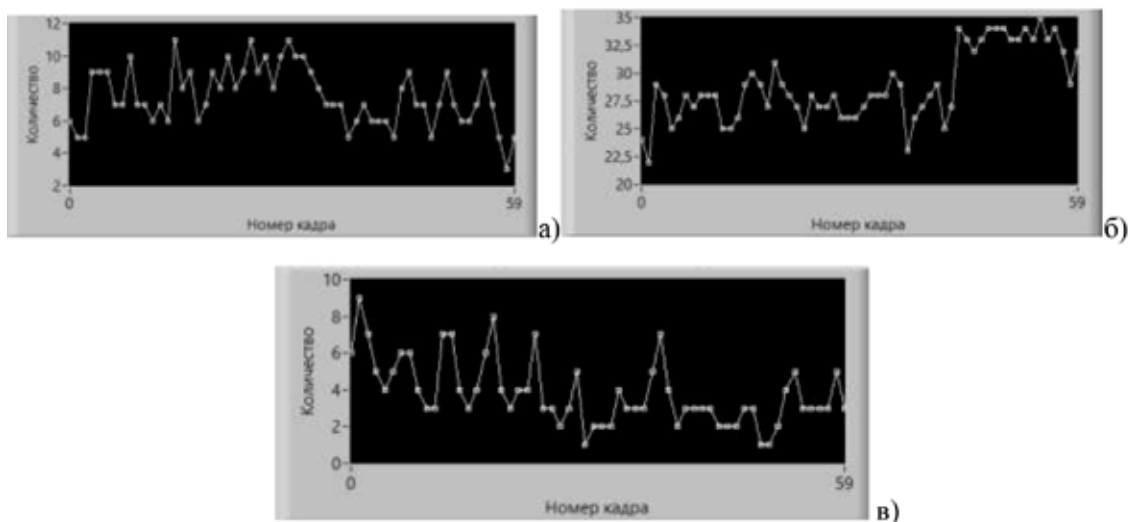


Рис. 5. Изменение количества мелких (а), средних (б) и крупных (в) частиц в течение эксперимента

После создания псевдооживленного слоя твердых частиц в физической модели печи кипящего слоя, была осуществлена съемка в течение 12 с. В результате получено 60 кадров.

Реализация алгоритма классификации частиц по крупности осуществлена в программной среде LabVIEW с применением пакета IMAQ Vision (рис. 3).

Для определения округлости частицы будет использоваться критерий округлости Хейвуда в блоке IMAQ ParticleFilter 3, равный

$$F_c = P_p / P_c,$$

где  $F_c$  – критерий округлости Хейвуда,  $P_p$  – периметр обнаруженной частицы,  $P_c$  – периметр окружности с той же площадью, что и у частицы.

Результаты проведения процедуры классификации представлены на рис. 4.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты проведения эксперимента представлены на рис. 5. Графики отображают изменения количества частиц от кадра к кадру.

Представленные графики отображают процесс сегрегации частиц. Более крупные частицы уменьшаются в количестве к концу эксперимента, оседая ближе к низу слоя, число средних частиц слабо изменяется и имеет тенденцию к росту, а количество мелких частиц в объеме рабочего слоя модели уменьшается.

#### Заключение

Разработан алгоритм и программа классификации частиц по крупности на базе технологии технического зрения. На основе полученных экспериментальных данных может быть подготовлено входное распределе-

ние частиц для модели баланса популяций для агломератов, которые образуются в процессе обжига в печи КС из-за неравномерности гранулометрического состава сырья и несоблюдения температурного режима.

#### Список литературы

1. Крупнов Л.В., Марченко Н.В., Носова О.В., Рогова Л.И., Каверзин А.В. Промышленные плавильные агрегаты для производства тяжелых цветных металлов: монография. Норильск: ЗГУ, 2022. 234 с.
2. Фомичев В.Б., Носова О.В., Рогова Л.И., Крупнов Л.В. Теория пирометаллургических процессов: учебное пособие. Норильск: ЗГУ, 2020. 202 с.
3. Алкацев В.М., Рутковский А.Л., Макоева А.К. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 669–676.
4. Антропова И.Г., Гуляшинов П.А., Перинов А.А. Исследование процесса обжига сульфидной свинцово-цинковой руды в атмосфере водяного пара // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 11. С. 56–67.
5. Кульничский А.А., Булатов В.В., Бойков А.В., Комарова Т.Ю., Бажин В.Ю. Применение систем технического зрения для контроля технологических параметров и оборудования на производстве // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. № 20–1. С. 17–22.
6. Бойков А.В., Пайор В.А. Система технического зрения для мониторинга левитационной плавки цветных металлов // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 85–89.
7. Кульничский А.А., Мансурова О.К., Николаев М.Ю. Распознавание дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования оптическим методом с помощью нейронных сетей // Черные металлы. 2023. № 3. С. 81–88.
8. Кульничский А.А., Кашин Д.А. Оптический контроль качества брикетированной металлошихты // Цветные металлы. 2022. № 9. С. 92–98.