

Федеральное Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(НИТУ «МИСиС»)

**КОЛИСТРАТОВ МАКСИМ ВАСИЛЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ  
РАСПЛАВЛЯЕМОГО МЕТАЛЛА И УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ  
ЭЛЕКТРОНАГРЕВА**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ**

доктор технических наук, профессор  
Шкундин Семен Захарович

Москва – 2018

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Высокая технологичность алюминиевых сплавов позволяет использовать их в различных отраслях народного хозяйства, поэтому мировой уровень производства и потребления алюминия и его сплавов достаточно высокий.

Литье алюминия под давлением считается одним из наиболее эффективных методов производства благодаря высокой производительности и низкой трудоёмкости. Детали, изготовленные таким методом, практически не нуждаются в последующей механической обработке.

Для алюминиевого сплава АК12 при заливке в машину для литья под давлением необходимая температура составляет  $720^{\circ}\text{C}$ , что больше его температуры плавления –  $577^{\circ}\text{C}$ . Довести алюминий до температуры разливки можно разными способами, в частности, используя плавильные печи сопротивления и дуговые печи.

Преимущество первых состоит в возможности получения металла достаточно высокого качества при сравнительно высоком коэффициенте полезного действия. Из недостатков можно отметить их низкую производительность.

При использовании графитированного электрода для нагрева энергией дугового разряда постоянного тока производительность заметно увеличивается, но в доводимом до температуры разливки жидком металле происходит образование тугоплавких карбидов под дугой. Карбиды алюминия, обладающие низкой теплопроводностью, не позволяют проводить плавку в заданном режиме.

Отливки, получаемые под давлением, часто имеют тонкие стенки, а окислы и карбиды закупоривают проходы и прекращают доступ жидкого сплава в узкие полости формы, вызывая литейный брак.

Существующие системы управления плавильными печами надежно контролируют силу тока и уровень напряжения в зависимости от стадии плавки в дуговых печах, количество затраченной электроэнергии, автоматическое зажигание дуг (в том числе и при их обрыве), устранение технологических коротких замыканий при обвале шихты и температуру металла. Однако не проводится оперативный контроль агрегатного состояния в момент плавки, что приводит к перегреву металла или его недоплавлению при переходе на следующую стадию плавки.

Расплавленный алюминий также начинает активно насыщаться атомарным кислородом дуги, что в свою очередь, снижает пластичность металла.

Существуют плавильные агрегаты, включающие в себя 2 источника электронагрева: дуговой и нагрев сопротивлением – в них объединены

преимущества каждого типа нагрева. Для снижения негативного влияния дуги необходимо ограничить ее использование при доведении температуры жидкого металла до температуры разливки в указанном плавильном агрегате.

После полного расплавления алюминия важно отключить дуговой нагрев, снижая возможность насыщения жидкого металла атомарным кислородом дуги и не давая возможности образования тугоплавких карбидов алюминия.

На данный момент система определения момента расплавления отсутствует. Момент расплавления определяется оператором в процессе плавки, что негативно сказывается на эффективности применения плавильной печи в качестве агрегата для плавки алюминия.

Задача определения момента расплавления шихты в электрических печах не является новой, она решается в черной металлургии при плавке насыпного материала. Методы определения не подходят в случае плавки слитков алюминиевых сплавов из-за различия агрегатного состояния расплавляемого материала и технологии плавки.

### **Цели и задачи работы.**

Целью настоящей работы является разработка метода контроля агрегатного состояния переплавляемого алюминиевого сплава, позволяющего минимизировать отрицательное влияние на него энергии дуги в плавильном агрегате с двумя источниками электронагрева за счет оперативного отключения контура управления дуговым нагревом в момент изменения агрегатного состояния сплава, что позволяет избежать насыщения указанного сплава неметаллическими включениями.

**Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. разработать способ оперативного определения агрегатного состояния слитков алюминиевого сплава в печи с двумя источниками электронагрева;
2. предложить математическое обоснование предложенного способа;
3. предложить алгоритм работы печи на основе разработанного способа определения агрегатного состояния переплавляемого сплава;
4. проанализировать влияние внешних факторов на достоверность определения момента фазового перехода;
5. провести экспериментальную проверку и дать оценку эффективности предложенного способа определения агрегатного состояния на основании анализа результатов тестовых плавов.

**Идея работы** состоит в создании метода фиксации момента (временного интервала) перехода металла из твердого состояния в жидкое с целью улучшения его качественных характеристик на основе возможностей технического зрения.

**Методология** включает изучение процесса изменения поверхности металла при его переходе в состояние расплава, разработку метода контроля этого процесса, разработку математического критерия изменения фазового состояния металла, создание оптического метода и средств, реализующих алгоритм контроля этого изменения и автоматического отключения плавильных печей.

**Методы диссертационного исследования:** экспериментальные исследования поверхности расплавляемого металла, вычислительные методы оценки достоверности применяемых экспериментальных методов исследования поверхности расплавляемого металла и разработка моделей изменения этой поверхности в процессе плавления, статистическая обработка результатов эксперимента.

**Научная новизна исследования:**

– разработан и обоснован метод автоматического определения неровности поверхности слитков, уложенных в пространстве печи для выявления момента их расплавления;

– предложены методы определения агрегатного состояния металла, основанные на обработке визуальных данных, характеризующих контролируемую поверхность металла в процессе плавки;

– экспериментально обоснована эффективность предложенных автоматических методов контроля;

– разработана система автоматического управления электрическим режимом плавильного агрегата с двумя источниками электронагрева с использованием интеллектуального датчика контроля агрегатного состояния расплавляемого металла (патент RU №2630160 от 05.09.2017).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Исследована и доказана возможность контроля фазы перехода металла из твердого агрегатного состояния в жидкое при плавке электрической дугой, предложены методы, позволяющие автоматически контролировать её наступление по характеристикам изображения, формируемого отраженным от поверхности металла светом.

2. Установлено, что переход из твердого агрегатного состояния в жидкое соответствует уменьшению площади поверхности не менее чем на 30% (от первоначального состояния), что является критерием выработки управляющего сигнала автоматизированной системой управления печи для отключения дугового нагрева.

3. Установлено, что при изменении агрегатного состояния переплавляемого металла критерием для отключения дугового нагрева в автоматизированной системе управления плавильным агрегатом с двумя источниками электронагрева

является уменьшение фрактальной размерности контролируемой поверхности металла в процессе плавки на величину не менее 3 %.

4. Предложена автоматическая система оптического контроля агрегатного состояния, основанная на видеофиксации поверхностей переплавляемого металла и разработанных моделей изображений этих поверхностей.

**Достоверность научных положений**, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- корректностью математической модели, методикой обработки экспериментальных данных;
- положительными результатами сходимости аналитических и лабораторных исследований;
- полученным патентом на систему автоматического управления электрическим режимом плавильного агрегата, включающую в себя устройство, реализующее способ определения агрегатного состояния по разностным изображениям.

#### **Теоретическое и практическое значение работы:**

- разработаны методы анализа разностных изображений, изменения площади и фрактальной размерности поверхности металла для оценки времени окончания периода плавки;
- созданы алгоритмы и средства автоматизированного определения момента расплавления металла в печи с двумя источниками электрической энергии;
- даны рекомендации по использованию оптического метода фиксации поверхности в процессе плавки с использованием метода оценки площади на предприятии АО «Специальное конструкторско-технологическое бюро по электрохимии с опытным заводом» (АО «СКТБЭ»), г. Москва.

#### **Апробация работы.**

Бекаревич, А.А. Разработка автоматизированной системы управления плавильной установкой с двумя источниками электронагрева [Текст] / А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов // Материалы II-ой международной научно-практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» Сборник научных трудов, электронное издание, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС, Москва: 2014 г. – С. 1.9-1.11

Бекаревич, А.А. Определение момента расплава шихты в печи комбинированного электронагрева / А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов, Е.А. Калашников, О.Н. Будадин // Материалы III-ой международной научно-

практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» Сборник научных трудов, электронное издание, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС, Москва: 2015 г. – С. 1.8-1.11

Бекаревич, А.А. Способ определения агрегатного состояния металла [Текст] / А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов, Е.А. Калашников // Материалы IV-ой международной научно-практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» Сборник научных трудов, электронное издание, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва: 2016. – С. 1.16-1.19

Использование интеллектуального датчика контроля агрегатного состояния металла при проведении плавов в агрегате с двумя источниками электронагрева (доклад). Неделя горняка-2016. Семинар №16 Технические средства (приборы и системы) обеспечения безопасности горных работ. 25-29 января 2016 г.

Способ определения агрегатного состояния металла при плавке (доклад). Неделя горняка-2017. Неделя горняка-2017. Секция 8.4. Технические средства (приборы и системы) обеспечения безопасности горных работ. 23-27 января 2017 г.

Колистратов, М.В. Контроль фазового перехода металл-расплав / М.В. Колистратов, Ю.А. Белобокова // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы двадцать первого научно-практического семинара. – М.:ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. – 432 с. С. 46-50

#### **Публикации.**

Основные положения диссертации опубликованы в 6 печатных работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, получен один патент на изобретение (RU №2630160 от 05.09.2017).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложения, содержит 90 рисунков, 20 таблиц, библиографический список содержит 97 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертации, отражена цель, раскрыта научная новизна, практическая значимость и приведена структура диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу существующих принципов построения систем автоматического управления процессом плавки материалов в тигельных печах сопротивления и дуговых печах. Описаны способы определения момента расплавления шихты при проведении плавки.

Рассмотренные системы определения агрегатного состояния шихты в зависимости от выбранной технической реализации требуют либо наличия в конструкции печи устройства электромагнитного перемешивания, либо наличия дополнительных пирометрических датчиков при бесконтактном измерении температуры, а также вызывают необходимость подстройки системы при изменении вида и объема шихты.

Момент расплавления слитков алюминиевого сплава в печи с двумя источниками нагрева (один из которых дуга постоянного тока) возможно определить по моменту достижения слитками температуры, превышающей температуру их плавления. При измерении температуры печи термопары фиксируются в футеровке, которая по технологическому процессу в печи комбинированного нагрева на первом этапе прогревается до 700 °С. Существует сложность обеспечения плотности прилегания слитка алюминиевого сплава и горячего спая термопары.

Использование пирометров для определения температуры смены фазового состояния может приводить к неверной интерпретации результатов из-за возможной фиксации отраженного от слитков теплового поля дуги.

Кроме температурного контроля возможно осуществить контроль состояния поверхности переплавляемого материала и на основании анализа полученных данных о поверхности принимать решение о завершении процесса перехода твердый-жидкий. Использование методов неразрушающего контроля для анализа поверхности слитков в процессе плавки невозможно из-за наличия стекла в смотровом окне сводовой крышки печи. Ультразвуковое излучение будет отражаться от поверхности стекла, тепловизионная съемка покажет исключительно температуру стекла, а не слитков в пространстве печи.

На основании анализа способов определения момента смены фазового состояния (и соответственно момента для отключения дугового нагрева) сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** рассматриваются и исследуются методы оценки фиксации момента расплавления слитков алюминиевого сплава.

Предложены методы оценки, основанные на анализе поверхности переплавляемого металла в процессе плавки.

При загрузке в печь слитков алюминиевого сплава трудно обеспечить их идеальное прилегание друг к другу. Алюминий обладает конечным

коэффициентом отражения, поэтому в полостях между слитками свет частично поглощается (рисунок 1).

Полости между слитками на изображении выглядят темнее, чем поверхность слитков. При полном расплавлении полости пропадают, и изображение поверхности металла становится менее контрастным. Получаемые изображения представляются в виде двумерной матрицы чисел, описывающих яркость отражённого от поверхности алюминия света.

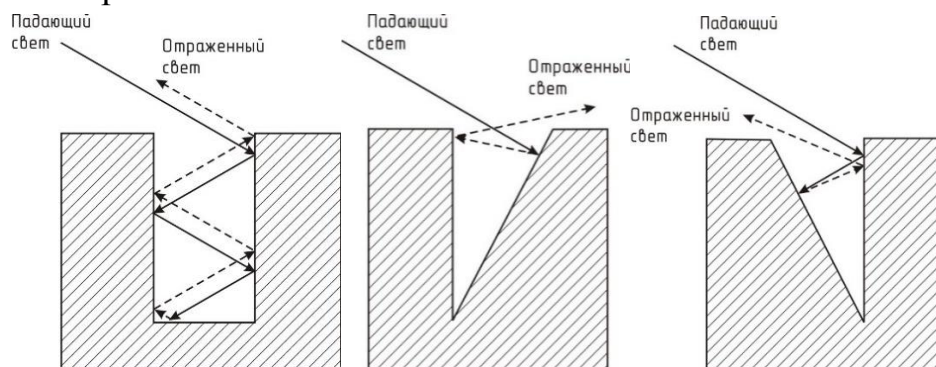


Рисунок 1 – *Пример поведения светового луча в углублении материала с конечным коэффициентом отражения*

Определение окончания расплавления (переход всего расплавляемого материала в жидкое агрегатное состояние) оценивается *по разности изображений*, фиксируемых через заданные промежутки времени. В начальный момент разностные изображения будут «пустыми» (без областей различия), поскольку материал нагревается до температуры плавления, не изменяя своей формы.

При достижении температуры плавления часть металла стекает вниз, заполняя полости между слитками. Попавший в полость свет совершает меньшее количество отражений, поэтому на изображении полости будут выглядеть более светлыми. На разностном бинаризованном изображении проявятся участки различия, указывающие на изменившиеся фрагменты изображения поверхности металла. На определенной стадии плавления все полости оказываются заполненными и поверхность металла представится равномерной. В момент расплавления области различия на бинаризованном разностном изображении пропадают.

Ниже приведено формализованное описание предложенной процедуры.

Вычитание изображений  $y(i, j, t) = |f(i, j, t) - f(i, j, (t-1))|$ , здесь  $f(i, j, t)$  и  $f(i, j, (t-1))$  – матрицы содержащие значения яркостей пикселей изображений полученных в момент времени  $t$  и  $(t-1)$  соответственно;  $y(i, j, t)$  – матрица содержащая разностные значения пикселей;  $i, j$  – координаты соответствующих пикселей.



Получение бинарного разностного изображения  $g(i, j, t)$  с использованием порога яркости  $threshold$  к элементам изображения  $y(i, j, t)$ :

$$g(i, j, t) = \begin{cases} 1, & \text{если } y(i, j, t) > threshold \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases},$$

$$y(i, j, t) \in [0, 255], \quad g(i, j, t) \in [0, 1].$$

Для определения площади различающихся участков исходных изображений  $f(i, j, t)$  и  $f(i, j, (t-1))$  проводится подсчет ненулевых значений разностного

$$\text{бинарного изображения: } S(t) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g(i, j, t).$$

Введен индикатор  $R(t)$ , показывающий начало изменения поверхности металла в процессе смены его агрегатного состояния ( $R(t) = 1$  – изменение началось):

$$R(t) = \begin{cases} 0, & S(t) = 0 \\ 1, & S(t) > 0 \end{cases}.$$

На основании анализа динамики изменения поверхности определяется момент окончания переплава с присвоением переменной  $result\_R$  единичного

$$\text{значения } result\_R = \begin{cases} 1, & \text{если } (R(t-1) = 1) \text{ и } (S(t) = 0) \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

Если рассматривать изображение как поверхность, где более светлые области изображения находятся выше относительно других областей (рисунок 2), то можно оценить степень изменения изображения по площади поверхности, формируемой отражаемым от поверхности светом.

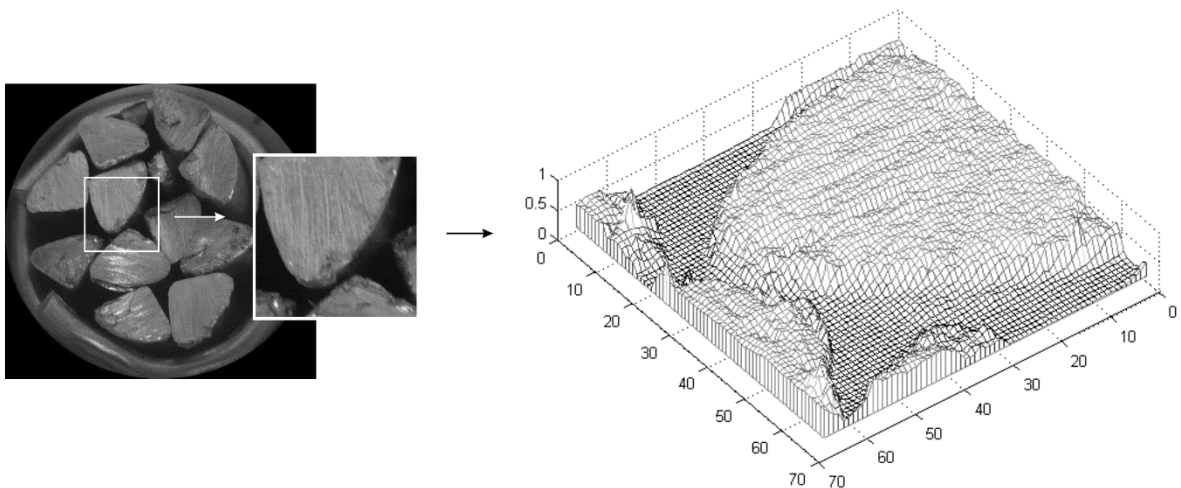


Рисунок 2 – Изображение (а) и его трехмерное представление (б)

Здесь и далее под *площадью* будем понимать площадь поверхности изображения слитков в 3-х мерном пространстве, а не площадь поверхности переплавляемых слитков.

Предложены и исследованы следующие способы определения площади:

- метод триангуляции;
- метод расщепления поверхности;
- метод площадок.

Для пояснения методов рассмотрим простейшее изображение, состоящее из 9 пикселей. Каждый пиксель, расположенный на высоте пропорциональной его яркости, представляется в виде узла на координатной сетке (рисунок 3).

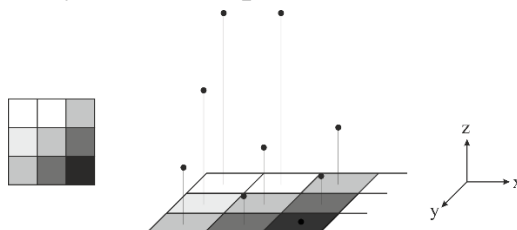


Рисунок 3 – *Изображение и его представление на координатной плоскости*

**Метод триангуляции.** Берутся четыре соседних узла массива-изображения, разбиваются на две тройки, а затем проводится вычисление площади получившихся треугольников (соответственно  $S_1$  и  $S_2$ ). Найденные площади складываются (рисунок 4, а).

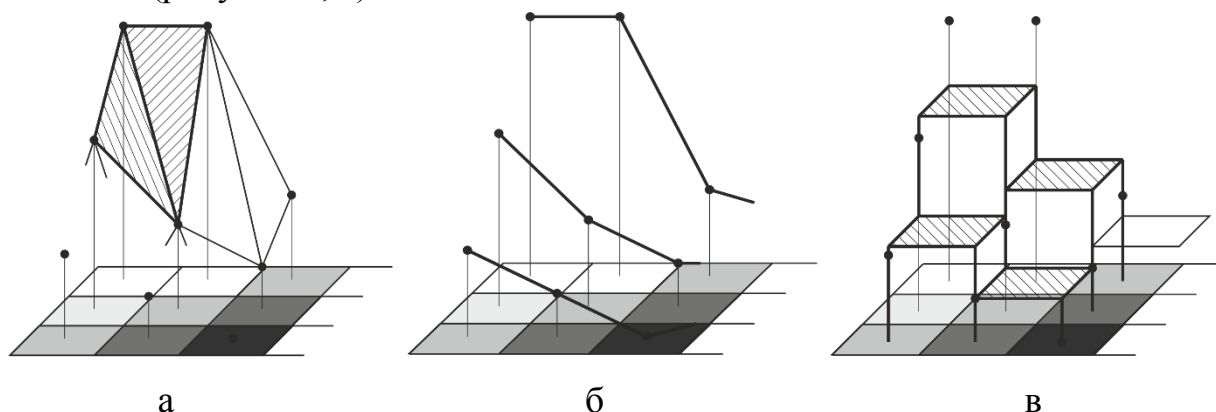


Рисунок 4 – *Способы определения площади поверхности:*  
а – триангуляция, б – метод расщепления, в – метод площадок

Поставим в соответствие каждой координате исходного изображения  $f(i, j)$  определённую яркость  $z(x, y)$ , и вычислим длину каждой стороны, заявленных треугольников:

$$AB = \sqrt{1 + (z(x, y) - z(x, y+1))^2}, \quad BC = \sqrt{2 + (z(x, y+1) - z(x+1, y))^2},$$

$$AC = \sqrt{1 + (z(x, y) - z(x+1, y))^2}, \quad BD = \sqrt{1 + (z(x, y+1) - z(x+1, y+1))^2},$$

$$CD = \sqrt{1 + (z(x+1, y) - z(x+1, y+1))^2}.$$

Для определения площади локальных треугольников используется формула

Герона:  $S_1 = ((p - AB)(p - AC)(p - BC)p)^{\frac{1}{2}}$ ,  $S_2 = ((p_2 - BD)(p_2 - CD)(p_2 - BC))^{\frac{1}{2}}$ ,

где  $p_1 = \frac{AB + AC + BC}{2}$  и  $p_2 = \frac{BD + CD + BC}{2}$  – полупериметры заданных треугольников.

Площадь поверхности, вычисленная методом триангуляции, составляет:

$$Str = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (S_1 + S_2).$$

*Метод расщепления поверхности* заключается в нахождении длины профиля изображения (рисунок 4, б) с последующим суммированием полученных длин. Предлагается делать замеры по горизонтальным и вертикальным сечениям.

Длина одного сечения  $L_y = \sum_{x=0}^{N-1} \sqrt{1 + (z(x, y) - z(x+1, y))^2}$ , площадь

сформированная сечениями в горизонтальном направлении  $S_g = \sum_{y=0}^{M-1} L_y$ . Площадь поверхности, вычисленная по методу расщепления составит:  $S_{pr} = (S_g + S_v)/2$ .

*Метод «площадок».* Усредняется значение четырех соседних пикселей, образуя так называемую площадку на высоте  $h_{xy}$  (рисунок 4, в).

Площадь, формируемая площадками:  $S_h = M \cdot N$

Площадь между площадками:

$$S_{h-h} = \sum_{x=0}^{M-2} \sum_{y=0}^{N-2} |h_{xy} - h_{x+1,y}| + |h_{xy} - h_{x,y+1}|,$$

где  $h_{xy} = \frac{f(x, y) + f(x+1, y) + f(x, y+1) + f(x+1, y+1)}{4}$ .

Площадь поверхности равна  $S_p = S_h + S_{h-h}$ .

Для дальнейшей оценки поверхности введено понятие приведенной площади  $S_0$ :

$$S_0 = \frac{S}{MN},$$

где  $S$  – вычисленная площадь поверхности;

$M, N$  – линейные размеры исследуемой области изображения, пиксели.

Для качественной оценки изображений используется понятие яркостной контрастности  $C \in [0, 1]$ . Значение 0 соответствует однотонному изображению, значение 1 — максимально контрастному:

$$C = \frac{2\sigma}{Y_{\max}},$$

где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение яркости пикселей изображения;

$Y_{\max}$  – максимальное значение яркости.

При расплавлении слитков изменяется контрастность изображения формируемого отраженным от слитков светом. Исчезают резкие переходы яркости отраженного от поверхности света (снижается контрастность), и как следствие, уменьшается расчетная площадь изображения. Оценка площади поверхности (ее изменение) по предложенным выше методам представлена на рисунке 5.

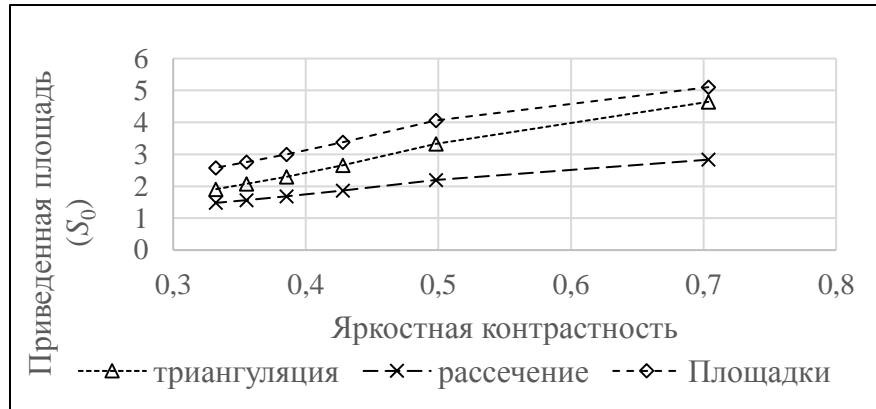


Рисунок 5 – *Результат измерения площади различными методами для пакета изображений kletka-X.jpg*

Выявлено, что метод триангуляции и метод площадок показывают более высокую чувствительность по отношению к изменению контраста изображения ( $\Delta S_0/\Delta C$ ), чем метод рассеяния.

Полученные изображения бывают искажены шумами и помехами различного физического происхождения: шумами видеодатчика, ошибками в каналах передачи информации, ошибками из-за компрессии изображений.

Проведены исследования степени влияния шума на изображении на результат вычисления площади. Показано, что наличие шума искажает результат расчета площади. Связано это с тем, что малый фрагмент изображения (пиксель, или ряд пикселей) с резко выраженной увеличенной яркостью, относительно своего ближайшего окружения, на трехмерном отображении «образует» пирамиду. Чем больше уровень шума на изображении, тем больше пикселей с выбросом яркости, тем больший вклад в площадь вносят образованные поверхности пирамид. Менее контрастные изображения подвержены влиянию шума в большей степени (изменяется знак  $\Delta S_0/\Delta C$ ). Для снижения влияния шумовой составляющей рекомендовано использовать усредняющий фильтр с маской не ниже 7x7 пикселей.

Рассмотрено влияние смещения камеры в процессе съемки на результат вычисления площади. При смещении области захватываемой устройством видеофиксации на 10% линейно в сторону от стационарного положения изменение

значения площади не происходит. При осевом смещении области фиксации на  $5^\circ$  относительно исходного положения изменение значения площади не превышает значения 1%. Таким образом при малых смещениях нет необходимости в использовании алгоритмов стабилизации изображения.

Проведена оценка быстродействия методов определения площади с учетом предварительного сглаживания обрабатываемых изображений. Наиболее быстродействующим методом вычисления площади является метод расщеплений. В случае, если производить расчет площади по каждой второй точке, все методы показывают сравнительно одинаковую производительность. При этом метод расщеплений показывает значительно меньшее значение вычисленной площади.

Изменение формы слитков происходит в момент расплавления и заканчивается когда металл (сплав) переходит в жидкое состояние. Изменение площади в процессе можно разделить на три стадии:

- нагрев металла до температуры плавления – постоянная площадь;
- плавление металла – площадь уменьшается;
- металл расплавился – площадь постоянна.

На рисунке 6 представлено схематическое изменение площади поверхности в процессе плавки с учетом возможных искажений (шум, сдвиг, изменение яркости) в процессе плавки.

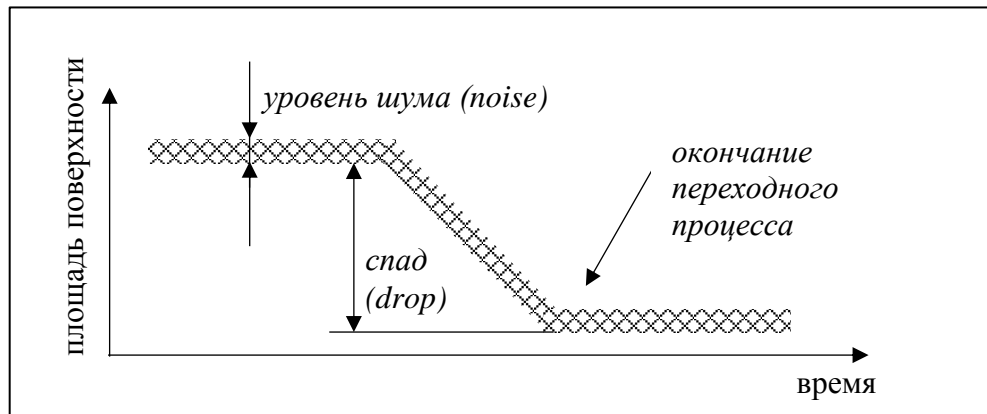


Рисунок 6 – Предполагаемое поведение площади металла при переплаве

Используется следующий алгоритм определения окончания плавки на основании анализа изменения площади поверхности металла:

$$S_{izm}(t) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} S_0(k) - \frac{1}{n} \sum_{m=t+1}^{t+n+1} S_0(m)}{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} S_0(k)},$$

здесь  $n$  – количество усредняемых значений площади ( $n = 3 \div 5$ );  
 $S_0$  – значение приведенной площади.

– определение момента начала расплавления ( $trigger = 1$ ) по резкому уменьшению площади при заданном уровне шума (параметр  $noise$ ). Оценка шумовой составляющей определяется в начальный период плавки.

$$trigger = \begin{cases} 1, \text{ если } S_{izm} > noise \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases};$$

– фиксация значения площади в начале спада

$$Str_f = \begin{cases} S_{izm}(t), \text{ если } trigger = 1 \text{ и } Str_f = 0 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}$$

Далее происходит выявление окончания спада. Спад должен быть не менее 30% от начального уровня (уровень спада определен при проведении экспериментальных плавов в лабораторной печи).

$$result\_Str = \begin{cases} 1, \text{ если } \frac{Str_f - Str(t)}{Str_f} \geq 0,3 \text{ и } S_{izm}(t) \leq noise \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}.$$

При  $result\_Str = 1$  процедура алгоритма управления переходом твердое-жидкое считается законченной.

*Оценка фрактальной размерности поверхности при расплавлении.* Отличительной особенностью фрактальной размерности является то, что она характеризует степень заполнения пространства, в которой существует фрактальная система. Большому значению фрактальной размерности соответствует большая степень заполнения изображения (его трехмерного представления).

Воспользуемся для описания фрактальных размерностей размерностью Минковского, которая вычисляется следующим образом (на примере черно-белого изображения):

- изображение покрывается сеткой с заданным размером ячейки  $\epsilon$ ;
- подсчитывается количество ячеек сетки, в которые попадает фрактал изображения  $N(\epsilon)$ ;
- размер ячейки уменьшается, считается новое значение  $N(\epsilon)$ ;
- процедура уменьшения размера ячейки  $\epsilon$  и расчета  $N(\epsilon)$  повторяется до достижения требуемого размера  $\epsilon$ .

Выражение для расчета фрактальной размерности  $D$ :

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\log N(\varepsilon) / \log(\varepsilon))$$

При длине ячейки  $\varepsilon = L$ ,

$$\forall L \in [1, L_{\max}]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N(L) = 0 \\ \forall i \in \left[ 1, \text{floor}\left(\frac{M}{L}\right) \right] \\ \forall j \in \left[ 1, \text{floor}\left(\frac{N}{L}\right) \right] \\ count = \sum_{k=(i-1)L+1}^{iL} \left( \sum_{l=(j-1)L+1}^{jL} S(k, l) \right) \\ N(L) = \begin{cases} N(L) = N(L) + 1, count > 0 \\ N(L), count = 0 \end{cases} \end{array} \right.$$

здесь  $\text{floor}(x)$  – функция округления в меньшую сторону до ближайшего целого числа;

$count$  – число ненулевых пикселей в заданной клетке;

$S(k, l)$  – значение функции в клетке с заданными координатами;

$N(L)$  – количество клеток, содержащих хотя бы один ненулевой пиксель, при размере клетки  $L$ .

Обозначим  $\varepsilon_L = \log(L)$ ,  $\eta_L = \log(N(L))$ . Искомая функция (прямая) описывается уравнением  $f(\varepsilon) = m\varepsilon_i + b$ , используя метод наименьших квадратов найдем коэффициенты  $m$  и  $b$ , при которых функция минимальна:

$$E = \sum_{i=1}^n (\eta_i - f(\varepsilon))^2 = \sum_{i=1}^n (\eta_i - (b + m\varepsilon_i))^2 \rightarrow \min.$$

Вычисление производных первого порядка позволяет получить выражения для расчета коэффициентов  $m$  и  $b$ . Параметр  $m$  является значением фрактальной размерности  $m \in [1, 2]$ .

$$m = \frac{n \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \eta_i - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \sum_{i=1}^n \eta_i}{n \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right)^2},$$

здесь  $n$  – количество пар значений (ячейка – количество ячеек).

Для сглаживания возможных колебаний фрактальной размерности применим метод скользящего среднего с величиной окна равного  $n$ :

$$D\_izm(t) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} D(k) - \frac{1}{n} \sum_{m=t+1}^{t+n+1} D(m)}{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} D(k)}.$$

Момент снижения размерности фиксируется в переменной *triggerD*.

$$triggerD = \begin{cases} 1, & \text{если } D > noise \\ 0, & \text{если } D < noise \end{cases}$$

Значение, от которого ведётся отсчет степени изменения размерности:

$$D\_f = \begin{cases} D\_izm(t), & \text{если } triggerD=1 \text{ и } D\_f \neq 0 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Выработка сигнала, характеризующего окончание переплава (*result\_D* = 1) происходит при уменьшении указанной размерности не менее, чем на 3% в период изменения агрегатного состояния переплавляемого металла (выявлено при экспериментальных плавках).

$$result\_D = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{D\_f - D(t)}{D\_f} \geq 0,02 \text{ и } D\_izm(t) \leq noise \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

При *result\_D* = 1 процедура алгоритма управления переходом твердое-жидкое считается законченной.

В работе фрактальная размерность рассчитывается для бинаризованных изображений. Порог бинаризации выбирается по методу Оцу, на основании анализа гистограммы яркостей исследуемого изображения.

Изменения фрактальной размерности не настолько существенные, относительно изменения площади тех же тестовых изображений (уменьшение фрактальной размерности не более чем на 5% против уменьшения площади в пределах 40% при прочих равных условиях), искажения (сдвиг, поворот, наложение шума) вносят бóльшую ошибку в итоговый результат и затрудняют определение момента расплавления.

Для повышения достоверности определения момента полного расплавления алюминия в печи предлагается использовать комбинацию описанных выше методов. Срабатывание двух методов определения агрегатного состояния из трех говорит о необходимости отключения дугового нагрева.

$$result\_all = (result\_R \wedge result\_Str) \vee (result\_R \wedge result\_D) \vee (result\_Str \wedge result\_D)$$



**В третьей главе** рассматривается система визуального (оптического) контроля поверхности металла в пространстве печи, приведены алгоритмы анализа изображений и принятия решений.

Агрегатное состояние расплавляемого материала возможно оценить по состоянию поверхности, наблюдая через смотровое окно, расположенное в крышке печи.

Установка видеокамеры для съемки поверхности переплавляемого материала непосредственно над смотровым окном печи сопряжена с рядом трудностей. Это вибрации при подъеме и опускании крышки печи, высокая температура этой крышки, а также близость сводового электрода, создающего электромагнитные помехи. Поэтому была предложена система, позволяющая фиксировать отражение поверхности переплавляемых слитков с зеркала, размещённого под углом к оптической оси смотрового окна печи (рисунок 7).

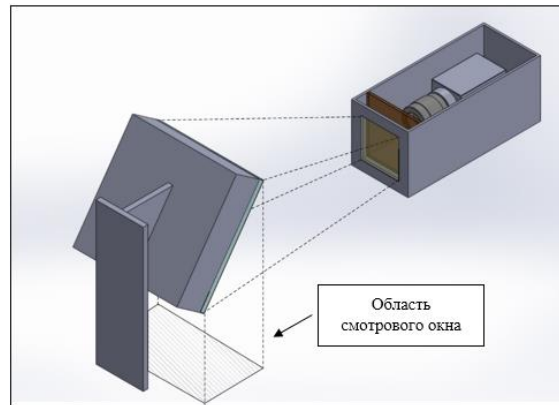


Рисунок 7 – *Оптическая система для фиксации поверхности переплавляемого материала*

Данные с камеры с задаваемой периодичностью поступают в процессор, где с помощью специально разработанных алгоритмов обрабатываются.

В результате математической обработки определяется момент полного расплавления шихты и формируется сигнал о необходимом завершении плавки дугой.

Предложен алгоритм определения смены агрегатного состояния, включающий в себя подпрограммы анализа поступающей информации (изображений поверхности), формирующие ответ на вопрос (решения) об окончании фазового перехода металл-расплав. По совокупности решений вырабатывается управляющий сигнал об окончании плавки дугой постоянного тока.

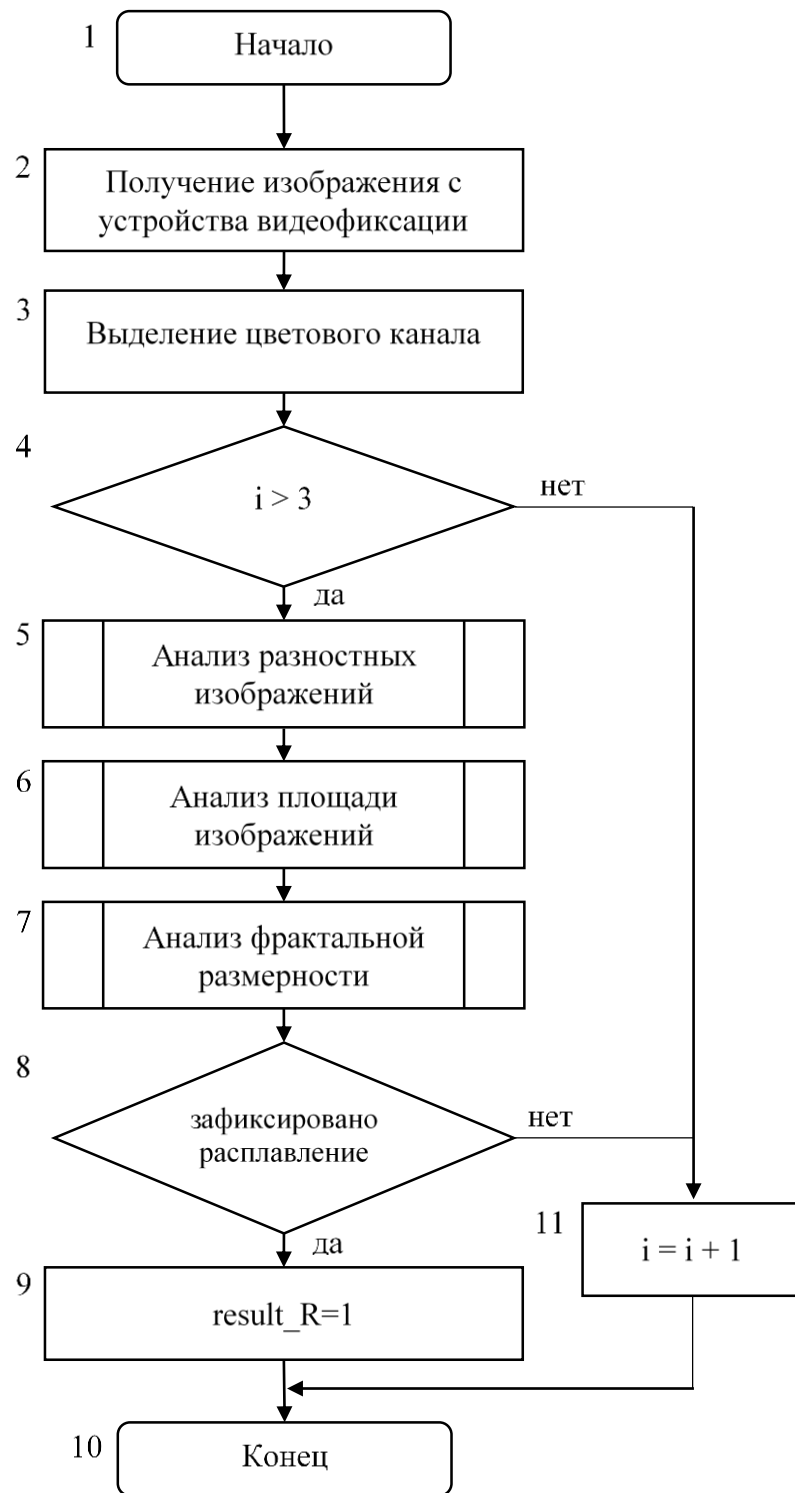


Рисунок 8 – *Укрупненный алгоритм определения агрегатного состояния на основе анализа изображений*

В четвертой главе рассматривается плавильный агрегат с двумя источниками электронагрева, его автоматизированная система управления и место разрабатываемой системы определения агрегатного состояния в данной системе управления печи.

Функциональная схема плавильного агрегата представлена на рисунке 9.

Съемка поверхности металла с целью оценки его агрегатного состояния осуществляется с помощью устройства видеофиксации 7, визированного на указанную поверхность.

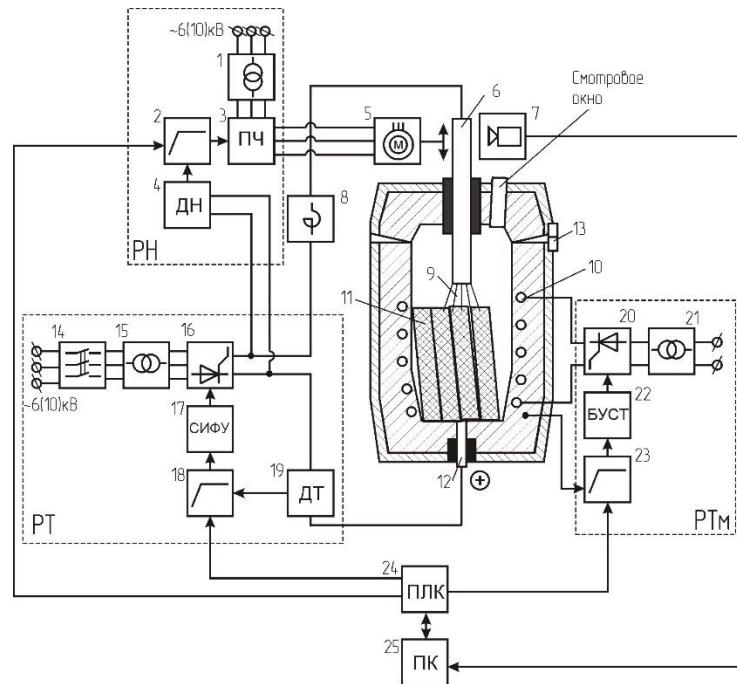
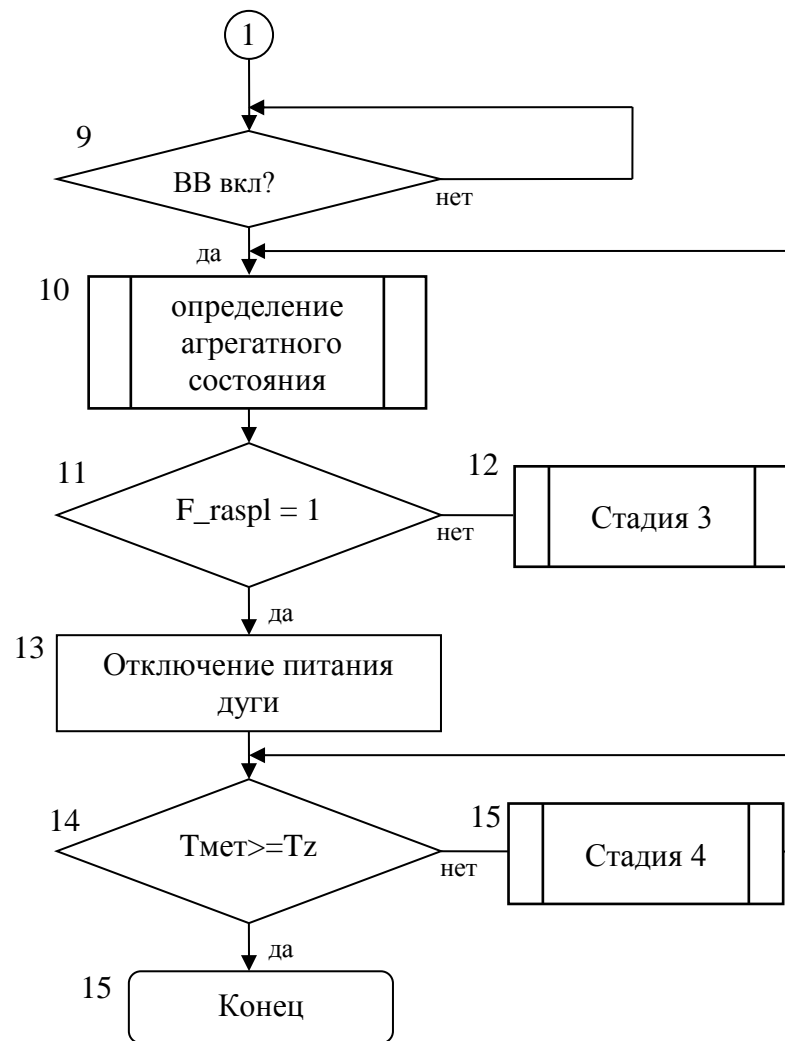
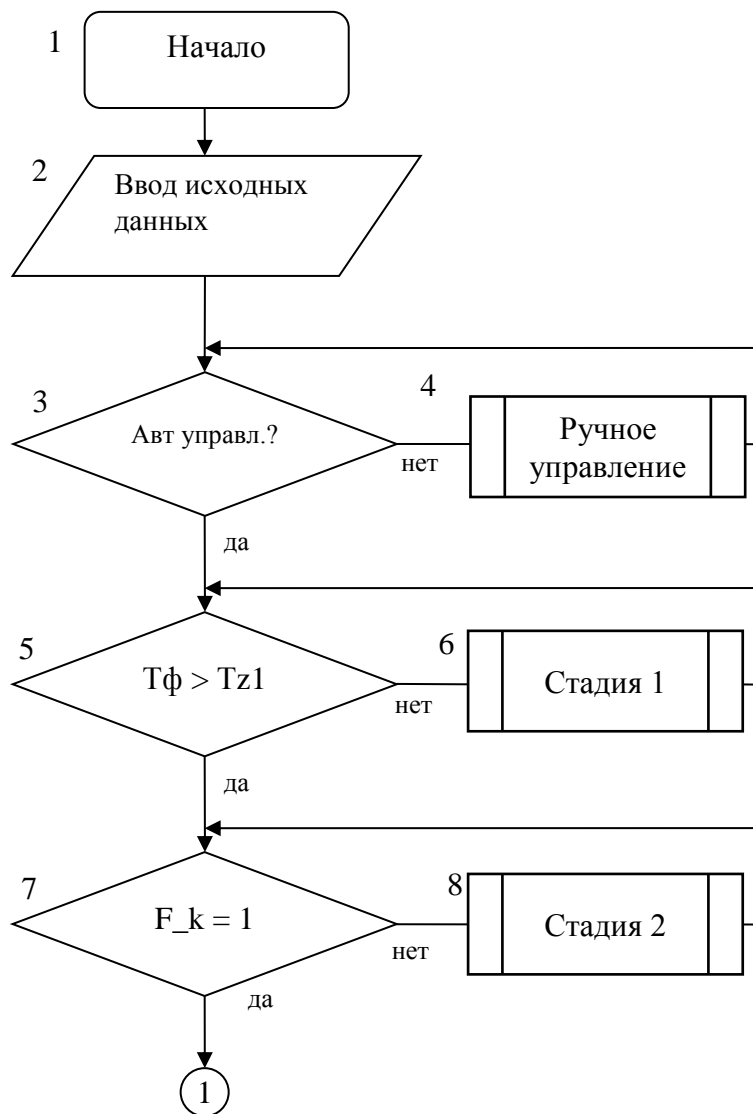


Рисунок 9 – Функциональная схема установки: 1 – трансформатор, 2 – регулятор напряжения, 3 – преобразователь частоты, 4 – датчик напряжения, 5 – асинхронный двигатель, 6 – сводовый электрод, 7 – устройство видеофиксации, 8 – реактор, 9 – межэлектродный промежуток, 10 – нагреватель сопротивления, 11 – слитки алюминия, 12 – подовый электрод, 13 – оконечный выключатель, 14 – высоковольтный выключатель, 15 – трансформатор, 16 – выпрямитель, 17 – система импульсно-фазового управления, 18 – регулятор тока, 19 – датчик тока, 20 – блок тиристоров, 21 – трансформатор, 22 – блок управления тиристорами и симисторами, 23 – регулятор температуры, 24 – программируемый логический контроллер, 25 – персональный компьютер

На основании анализа поступающих изображений поверхности слитков с частотой 1 кадр в секунду (с применением разработанных алгоритмов) выявляется момент перехода металла в расплавленное состояние и формируется сигнал "Металл расплавился", что служит критерием для отключения электрического контура дугового нагрева.

Алгоритм управления печным агрегатом разбивается на 4 стадии (рисунок 10):

– стадия 1: нагрев футеровки с помощью нагревателей сопротивления при закрытой сводовой крышке до температуры, превышающей температуру плавления алюминиевого сплава;



**Tф** – текущая температура футеровки

**Tz1**– заданная температура футеровки

**Tz2**– заданная температура расплава

**Tмет** – текущая температура маталла

**F\_k**– флаг состояния сводовой крышки (0 – крышка открыта, 1 – крышка закрыта)

**F\_raspl**– флаг агрегатного состояния шихты (1 – шихта полностью расплавлена)

Рисунок 10 – Блок-схема основной программы контроллера

– стадия 2: поднятие сводовой крышки и загрузка шихты, при этом регулятором компенсируются потери тепла;

– стадия 3: закрытие крышки, ввод высококонцентрированной энергии дугового разряда, формируемого в цепи сводовый электрод - дуговой промежуток - шихта - подовый электрод;

– стадия 4: после перехода шихты в жидкое состояние, отключение дуги и продолжение нагрева расплава с помощью нагревателей сопротивления до температуры разливки.

**В пятой главе** приводятся экспериментальные исследования разработанной системы. Съемку поверхности проводили, используя зеркало, закрепленное на штативе под углом  $45^\circ$  относительно горизонта (рисунок 11).

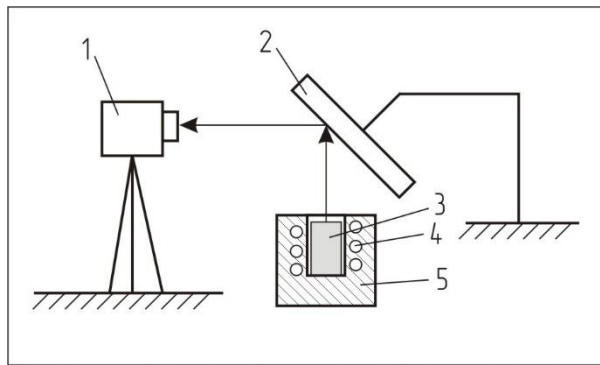


Рисунок 11 – *Схема расположения оборудования*

*1 – устройство видеофиксации, 2 – зеркало, 3 – тигель с алюминием, 4 – индуктор, 5 – индукционная печь*

В качестве переплавляемого материала использовали алюминиевые стержни, помещенные в графитовый тигель. С помощью светильника, стоящего рядом с плавильной установкой, имитировалось направленное свечение. Записанное видео плавки разделялось на кадры, которые потом использованы в качестве входной информации для алгоритмов определения агрегатного состояния. Кадры пронумерованы в соответствии с временем от начала фиксации процесса плавки в секундах.

Перед использованием разностного метода определения агрегатного состояния на начальном этапе проведена оценка уровня шума на изображениях (для определения необходимого порога бинаризации). Для этого вычитали значения яркости на изображениях, зафиксированных в последовательные промежутки времени. Итоговый уровень порога определялся с помощью выражения  $threshold = \max(\max_{i \in T_n} y(i, j, t))$ , где  $y(i, j, k)$  – разностное изображение,  $T_n$  – промежуток времени в течение которого фиксируется уровень шума.

Результаты процедуры оценки различия изображений в течение плавки №25 приведен на рисунке 12.

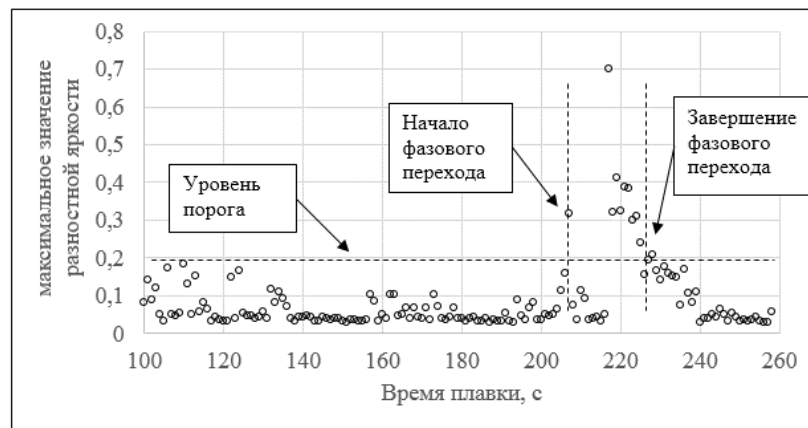


Рисунок 12 – *Результаты вычисления максимальной яркостной разности между изображениями при плавке*

Значения выше порога интерпретируются как области изменения поверхности в момент смены фазового состояния твердое-жидкое и подсчитываются для каждого изображения. Определенный алгоритмом момент расплавления соответствует времени 227 с от начала плавки (рисунок 13).

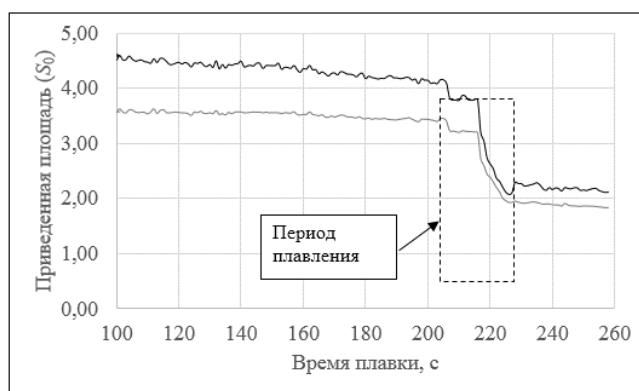


Рисунок 13 – *Результат обработки разностных изображений*

Выброс на 207 секунде произошел вследствие смещения камеры в момент съемки и невозможности достаточной компенсации этого смещения программным способом.

Результаты расчета приведенной площади, вычисленной с использованием метода площадок, и оценка изменения приведенной площади  $S_{izm}$  в каждый момент времени показаны на рисунке 13.

Приведенная площадь изображения, вычисленная с использованием метода площадок, была определена для каждого кадра видео процесса плавки (рисунок 14, а). Темная кривая – значения площади, вычисленные по исходным изображениям плавки, светлая кривая – значения площади тех же изображений, но предварительно сглаженных с применением низкочастотного фильтра.



а



б

Рисунок 14 – *Результаты расчета приведенной площади (а) и степень изменения этой площади во времени для фильтрованных изображений(б)*

Значение площади изменилось скачком с 4,09 единиц в момент начала перехода до 2,28 единиц в момент стабилизации, что составляет около 40%. С помощью разработанного алгоритма анализа площади определено, что расплавление произошло через 227 секунду от начала плавки.

Результаты плавки №№8–27 представлены на рисунке 15. В результате обработки изображений плавки №11 и №23 неверно установлен момент окончания переплавления. На основании полученных данных видно, что уменьшение площади для каждого из рассмотренных случаев более, чем на 30% может служить критерием окончания момента расплавления.

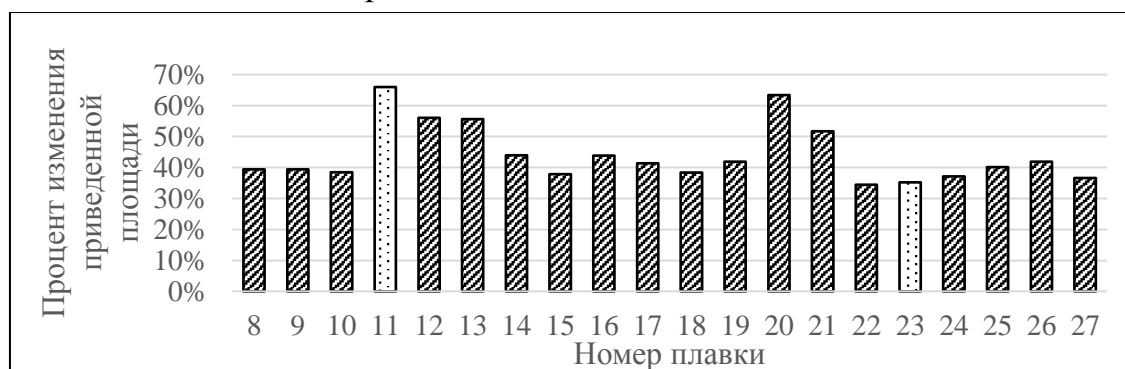


Рисунок 15 – *Процент уменьшения приведенной площади в процессе изменения формы слитков при плавке*

Фрактальная размерность изображений в период плавки и степень изменения заявленной размерности показаны на рисунке 16.

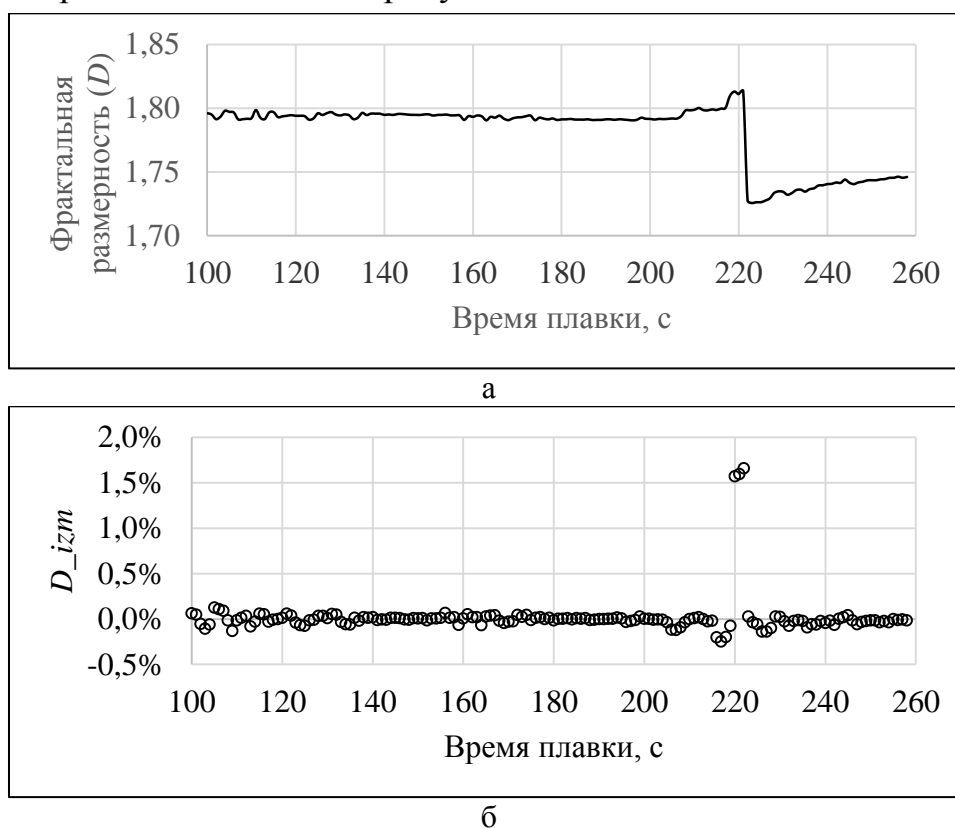


Рисунок 16 – *Фрактальная размерность (а) и степень ее изменения (б)*

Критерием для фиксации начала переплавления металла принят  $D_{izm} > 3\%$ .

Фрактальная размерность для рассматриваемой плавки уменьшилась от уровня 1,81 до уровня 1,73 (спад 4,4%). Разработанным алгоритмом время завершения зафиксировано на отметке 225 с.

Результаты остальных плавок приведены на рисунке 17. Значения выделенные светлым фоном означают, что при данной плавке не зафиксировано время ее окончания. Отсутствующие значения – невозможность определить уровень спада.

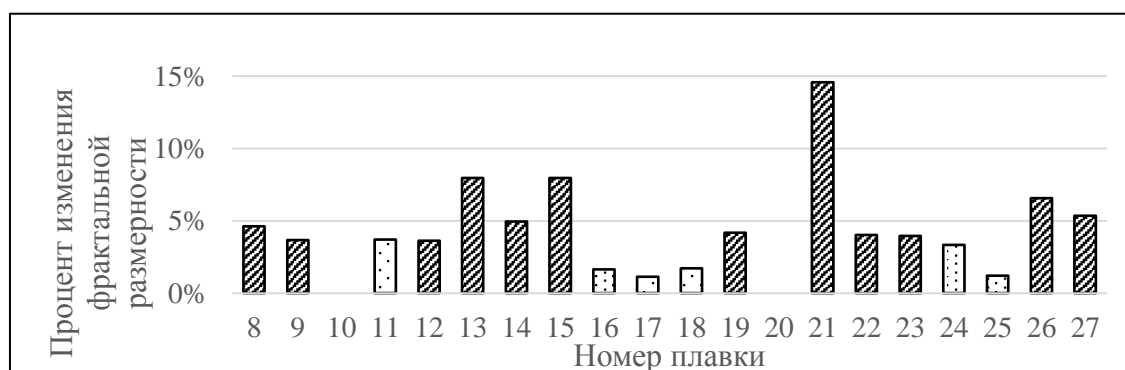


Рисунок 17 – *Процент уменьшения фрактальной размерности в процессе изменения формы слитков при плавке*



По результатам плавки выяснилось, что доля правильного определения момента окончания фазового перехода для разностного метода, метода определения площади поверхности и фрактального метода составляет 0,75, 0,9 и 0,6 соответственно. Это показывает, что ни один из методов не дает 100% результата и требуется совместное использование методов для повышения достоверности определения момента расплавления.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация является научно-квалификационной работой, содержащей решение задачи разработки метода определения изменения агрегатного состояния металла на основе анализа его поверхности, имеющая существенное значение при проектировании системы управления печами с двумя источниками электронагрева для плавки алюминиевых сплавов и развития знаний по научной дисциплине 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»

### **Основные результаты и выводы, полученные лично автором и перспективы дальнейшей разработки**

1. Разработан и обоснован метод определения времени перехода слитков алюминия из твердого состояния в жидкое, основанный на определении неровности поверхности слитков, расположенных в пространстве печи.

2. Предложено средство (система технического зрения) и алгоритмическое обеспечение для реализации разработанного метода контроля, исследованы его характеристики.

3. Предложен алгоритм работы плавильной печи, включающий в себя подпрограмму определения агрегатного состояния, вырабатывающую управляющее воздействие на контур управления дуговым нагревом. Работа подпрограммы основывается на реализации, предложенного исследованного метода.

4. Экспериментально доказано, что рассчитываемая площадь поверхности переплавляемого металла, достигшего расплавленного состояния изменяется на величину не менее 30% от первоначального состояния (до начала плавки).

5. Показана эффективность использования фрактальной размерности для получения количественного критерия оценки смены агрегатного состояния переплавляемого металла.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

*В рекомендованных ВАК РФ научных журналах и изданиях:*

1. Фарнасов, Г.А. Способ переплава слитков алюминиевых сплавов в печи с комбинированным электронагревом [Текст] / Г.А. Фарнасов, М.В. Колистратов, Р.В. Гребенщиков // Электromеталлургия. – 2011. – №3. – С. 8-13
2. Фарнасов, Г.А. Особенности переплава лома и слитков алюминиевых сплавов в дуговых печах постоянного тока и печах сопротивления [Текст] / Г.А. Фарнасов, М.В. Колистратов // Электromеталлургия. – 2013. – №8. – С. 38-41.
3. Шкундин, С.З. Проверка работоспособности алгоритмов определения изменения агрегатного состояния металла [Текст] / С.З. Шкундин, М.В. Колистратов, Ю.А. Белобокова // Системный администратор. – 2018. – №10. – С. 90-93

*Патент РФ:*

4. Система автоматического управления электрическим режимом плавильного агрегата с двумя источниками электронагрева с использованием интеллектуального датчика контроля агрегатного состояния расплавляемого металла [Текст]: пат. 2630160 МПК С2 F27В 3/28 / А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов, Г.А. Фарнасов [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС". – 2016106984 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 05.09.2017, Бюл. №25. – 9 с.

*Статьи в сборниках научных конференций:*

5. Бекаревич, А.А. Разработка автоматизированной системы управления плавильной установкой с двумя источниками электронагрева [Текст] / А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов // Материалы II-ой международной научно-практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» Сборник научных трудов, электронное издание, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС, Москва: 2014 г. – С. 1.9-1.11
6. Бекаревич, А.А. Определение момента расплава шихты в печи комбинированного электронагрева / А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов, Е.А. Калашников, О.Н. Будадин [Текст] // Материалы III-ой международной научно-практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» Сборник

научных трудов, электронное издание, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва: 2015 г. – С. 1.8-1.11

7. Бекаревич, А.А. Способ определения агрегатного состояния металла [Текст] / А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов, Е.А. Калашников // Материалы IV-ой международной научно-практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» Сборник научных трудов, электронное издание, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва: 2016. – С. 1.16-1.19

8. Колистратов, М.В. Контроль фазового перехода металл-расплав [Текст] / М.В. Колистратов, Ю.А. Белобокова // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы двадцать первого научно-практического семинара. – М.:ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. – 432 с. С. 46-50

*Депонированная рукопись:*

9. Шкундин, С.З. Методы оценки момента расплавления металла при плавке [Текст] / С.З. Шкундин, М.В. Колистратов М.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Деп. рук., 50 с. – Справка №1106/1117 от 14.09.2017