

МП (HRCэ 63...66) и P6M5K5-МП (HRCэ 63...66) после закалки и отпуска проводились на станке модели PROFIMAT 412 фирмы «BLOHM».

Испытаниями установлено, что в зависимости от характеристики шлифовального круга, принятых схем крепления заготовки и условий подачи СОЖ при шлифовании протяжек на форсированных режимах по схеме глубинного шлифования возможно появление прижогов и микротрещин на поверхности профиля, расположенных в вертикальной плоскости и во впадине зуба.

Наилучшие результаты по производительности предварительного профилирования протяжек из сталей P18, P6M5K5-МП, P9M4K8-МП и P12Ф2К5М3-МП обеспечили высокопористые круги из электрокорунда белого зернистостью 12 твердостью I и номерами структуры 12-16, а по стойкости, точности и качеству окончательной обработки профиля высокопористые круги из электрокорунда белого зернистостью 12, твердостью H - I и номером структуры 12.

Производственными испытаниями высокопористых кругов при шлифовании без охлаждения инструмента из закаленных быстрорежущих инструментальных и конструкционных сталей: P6M5, P9Ф5, P9K10, 25ХГТ и ШХ15 установлено, что такие шлифовальные круги на 50 - 60% превосходят по общей стойкости круги с нормальной пористостью. Испытания проводились при шлифовании профиля червячных фрез на станках фирм «Мичиган» (США), «Икедаи» (Япония) и «Клингельнберг» (ФРГ).

При шлифовании отверстий фрез, шеверов и т.д. на внутришлифовальном станке СТ-1395 при скорости шлифовального круга, равной 20 м/сек, скорости вращения детали - 8 м/мин, предварительной подаче на глубину равной 0,03 – 0,05мм/мин, окончательной подаче - 0,005 – 0,01мм/мин. установлено, что высокопористые круги для внутреннего шлифования превосходят по общей стойкости обычные шлифовальные круги на 25%.

#### **Выводы**

Таким образом, можно сделать вывод о том, что высокопористые шлифовальные круги целесообразно применять в инструментальном производстве при выполнении операций шлифования инструментов, изготавливаемых из быстрорежущих сталей, в том числе порошковых и из твердого сплава.

### ***Контроль феррофракции сред: особенности массово-операционной характеристики ее магнитофореза, двухэкспоненциальная модель***

к.т.н. доц. Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н., д.т.н. проф. Сандуляк А.В.,  
к.т.н. Ершова В.А.  
МГТУ «МАМИ»  
a.sandulyak@mail.ru

*Аннотация.* Излагаются основные положения двухэкспоненциальной модели магнитофоретического контроля ферропримесей в пробах анализируемых сред. Приводятся данные определения массы ферропримесей и их концентрации в формовочной смеси и сахаре.

*Ключевые слова:* ферропримеси, магнитофорез, экспоненциальная модель

#### **Основные положения экспоненциальной модели**

Многие сыпучие и жидкие среды (формовочная смесь для литьевых форм, бензин, дизтопливо, масло, СОЖ, пищевые продукты и др.) содержат такую, практически «штатную», фракцию различного рода примесей, как включения-примеси в виде феррочастиц.

«Источниками» их образования и поступления в производственные среды являются износ и коррозия металла (конструкционных сталей) оборудования. Нередко сами технологические операции сопровождаются вынужденным «сбросом» ферровключений (например,

## Раздел 2. Технология машиностроения и материалы.

попадающие в формовочные смеси брызги металла, фрагменты облоя, литниковых систем и пр.). Кроме того, зачастую это и нежелательные последствия выполнения (даже квалифицированного) механических, сварочных работ при ремонте и обслуживании оборудования.

В любом случае для обеспечения необходимого качества (степени чистоты) тех или иных сред требуется квалифицированный контроль содержания ферропримесей, осуществляемый различными (в зависимости от специфики сред) методами.

При часто реализуемом контроле, основывающемся на выполнении неоднократных (но на практике немногочисленных по количеству  $n$ ) опытов-операций магнитофореза, проявляется экспоненциальный характер [1-4] пооперационного убывания массы  $m$  осадка феррочастиц, извлекаемых из подвергаемой анализу пробы той или иной среды:

$$m = A \cdot \exp(-k \cdot n), \quad (1)$$

где  $A$  и  $k$  – эмпирические параметры.

Эта базовая закономерность использована для создания модели оригинального метода (в отличие от имеющихся традиционных методов – прецизионного) контроля содержания (концентрации) феррочастиц в среде [1-4].

К концептуальным положениям этого метода, кроме самой экспоненциальной закономерности (1) пооперационного убывания массы  $m$  осадка феррочастиц, относится и ее следующее замечательное свойство. Дело в том, что эта зависимость – дискретная, представляющая собой количественный ряд, члены которого, начиная с первого  $m_1 = A \cdot \exp(-k \cdot 1)$ , убывают в геометрической прогрессии со знаменателем  $q = \exp(-k)$ . Стало быть, они, поддаваясь экстраполяции-прогнозу за пределы фактически осуществляемых опытов (операций) магнитофореза, поддаются также функциональному суммированию до сколь угодно значения  $n$ , вплоть до  $n \rightarrow \infty$ .

Значит, достоверное определение общей (как фактически извлеченной, так и остаточной) массы ферропримесей пробы анализируемой среды сводится к нахождению суммы  $m_{1...n}$  бесконечного числа членов ( $n \rightarrow \infty$ ) упомянутой прогрессии, т.е.

$$m_{1...n} = \sum_{n=1}^{\infty} m_n = \frac{m_1}{1 - q} = \frac{A}{\exp k - 1}. \quad (2)$$

Заметим, что в отсутствие этого оригинального экспериментально-расчетного подхода такая масса осадка ( $m_{1...n}$ ) могла бы быть получена лишь при теоретически неограниченном (разумеется, на практике не осуществимом) числе операций магнитофореза.

Легко же определяемая по (2), она, как уже оговорено, учитывает не только данные массы осадка этих частиц в результате фактического выполнения  $n$  операций их магнитофоретического извлечения, но и остаточную (все еще остающуюся в пробе анализируемой среды после фактического выполнения  $n$  операций) массу таких частиц.

При этом находящийся в распоряжении экспериментатора (оператора) фактический участок экспериментально полученной массово-операционной характеристики, т.е.  $(m, n)$ -характеристики, подвергается тестированию на соответствие функциональному виду (1), служит и установлению значений фигурирующих в (1) и (2) эмпирических параметров  $A$  и  $k$ .

Найденное же значение суммарной массы осадка  $m_{1...n}$  ферропримесей в пробе анализируемой среды объемом  $V$  и массой  $M$  позволяет определять истинные значения концентрации  $c$  ферропримесей: объемной  $c_V = m_{1...n}/V$  и/или массовой  $c_M = m_{1...n}/M$ .

Конечно же, такой подход дает возможность определять также массу  $m_{1...n}$  ферропримесей, которая извлекается из пробы анализируемой среды при осуществлении ограниченного числа ( $n$ ) операций магнитофореза:

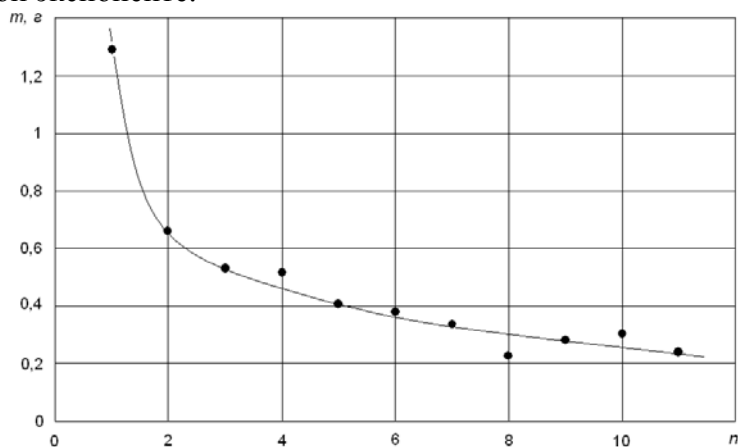
$$m_{1...n} = \sum_{n=1}^n m_n = \frac{m_1 - m_n \cdot q}{1 - q} = A \frac{1 - \exp(-k \cdot n)}{\exp k - 1}, \quad (3)$$

т.е. как сумму ограниченного числа членов характерной геометрической прогрессии.

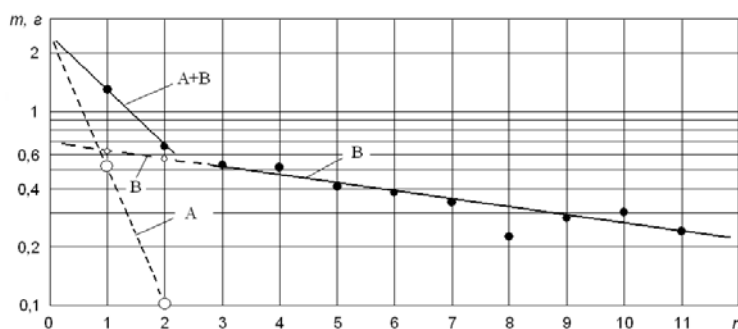
### Примеры нарушения одноэкспоненциальной модели: полулогарифмическая $(m,n)$ -аргументация. Основные положения двухэкспоненциальной модели

Экспериментально получаемая зависимость извлекаемых масс феррочастиц  $m$  от числа операций магнитофореза  $n$  легко проверяется на соответствие или несоответствие закономерности (1) [1-4] по склонности к линейаризации в полулогарифмических координатах.

В отличие от имеющихся многочисленных данных [1-4], проведение операций магнитофореза ферропримесей оборотной формовочной смеси и сахара-песка с получением соответствующих массово-операционных характеристик (рисунки 1а, 2а) показывает, что они, будучи представленными в полулогарифмических координатах (рисунки 1б, 2б), не подчиняются классической экспоненте.



а)



б)

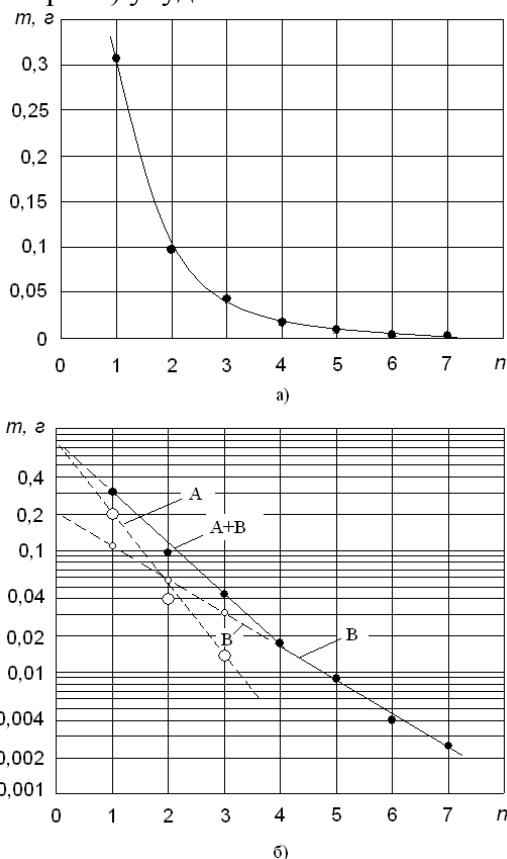
**Рисунок 1 - Изображенные в обычных (а) и полулогарифмических (б) координатах пооперационные данные массы полученного магнитофорезом осадка ферропримесей в пробе формовочной смеси ( $M = 40$  г).**

Точнее же, судя по возможности кусочной линейаризации в полулогарифмических координатах (рисунки 1б, 2б) явных, «стыкующихся» участков  $(m,n)$ -зависимости, склонность к экспоненциальному виду этих зависимостей все же сохраняется.

Это обстоятельство, скорее указывающее не на отказ от экспоненциальной модели, а на возможность ее углубления, напрямую свидетельствует о наличии в анализируемой среде феррочастиц сравнительно широкого спектра крупности и магнитной восприимчивости, т.е. о наличии подфракций феррочастиц. Так, подобного рода факт отмечался на примере поведения  $\xi$ -параметра [5, 6], «линейно-кусочно» зависящего от длины зоны магнитного захвата при фильтрационной очистке жидкостей и газов от «разносортных» феррочастиц.

И, по всей видимости, как и ранее [5, 6], здесь также целесообразно прибегнуть к приему оправданного квазифракционирования феррочастиц-примесей. При этом, повторим, факт реального присутствия двух резко отличающихся друг от друга фракций (по сути – подфракций в рамках рассматриваемой фракции феррочастиц) явствует из рисунков 1б, 2б по прояв-

ляющим себя косвенным признакам, а именно по наличию двух четких участков ( $m, n$ )-характеристики – даже отражающей не «поочередное», а одновременное осаждение обеих подфракций. Первая подфракция – условно «легкоизвлекаемая» ( $A$ ), состоящая из частиц более крупных, обладающих улучшенными магнитными свойствами. Вторая подфракция – условно «трудноизвлекаемая» ( $B$ ), состоящая из частиц более высокодисперсных, обладающих сравнительно (в сравнении с первой) ухудшенными магнитными свойствами.



**Рисунок 2 - Изображенные в обычных (а) и логарифмических (б) координатах пооперационные данные массы полученного магнитофорезом осадка ферропримесей в пробе поставок (на хлебозавод) сахара-сырья (55 кг).**

Для разработки соответствующей физической модели (с получением необходимых расчетных зависимостей) в ее основу следует положить принципы «автономного» магнитофоретического поведения каждой из подфракций и суперпозиции основных характеристик этих подфракций.

Очевидно, что для каждой из подфракций  $A$  и  $B$  подобно (1) справедливы «индивидуальные» характеристики экспоненциального убывания пооперационных масс феррочастиц:

$$m_A = A_A \cdot \exp(-k_A \cdot n), \quad m_B = A_B \cdot \exp(-k_B \cdot n), \quad (4)$$

где:  $A_A$  и  $A_B$ ,  $k_A$  и  $k_B$  – соответствующие эмпирические параметры для  $A$ -подфракции и  $B$ -подфракции (о приемах их определения идет речь ниже).

На основании (4) подобно (2) можно получить выражения для общих масс феррочастиц (каждой из подфракций):

$$(m_{1...n})_A = \frac{A_A}{\exp k_A - 1}, \quad (m_{1...n})_B = \frac{A_B}{\exp k_B - 1}. \quad (5)$$

Для обеих подфракций (вместе) пооперационная масса и общая масса извлекаемых ферропримесей составляют:

$$m = m_A + m_B = A_A \cdot \exp(-k_A \cdot n) + A_B \cdot \exp(-k_B \cdot n), \quad (6)$$

$$m_{1...∞} = (m_{1...∞})_A + (m_{1...∞})_B = \frac{A_A}{\exp k_A - 1} + \frac{A_B}{\exp k_B - 1}. \quad (7)$$

Однако судить о значениях необходимых параметров  $A_A$  и  $A_B$ ,  $k_A$  и  $k_B$ , пользуясь получаемой экспериментальной зависимостью (рисунки 1 и 2), которая не дает явную информацию об индивидуальных характеристиках пооперационных масс осадка, нельзя.

Вместе с тем, отсутствие такой информации легко восполнить, если экспериментально получаемую пооперационную зависимость  $m$  от  $n$  (рисунки 1а, 2а), подвергающейся кусочной линеаризации в используемых здесь полулогарифмических координатах (рисунки 1б, 2б), графически разложить на составляющие (по  $A$  и  $B$ ) зависимости.

Своеобразной отправной точкой в этом может служить «точка излома» (при  $n=[n]$ ) получаемой зависимости (рисунки 1б, 2б). Ее хвостовой участок ( $n \geq [n]$ ), надо полагать, характеризует только фракцию  $B$  – в условиях почти полного отсутствия (уже практически извлеченной до  $n = [n]$ ) фракции  $A$ .

Такое, как будет подтверждено ниже, оправданное допущение позволяет разложить начальный участок ( $1 \leq n \leq [n]$ ) зависимости  $m$  от  $n$  на составляющие (рисунки 1б, 2б, пунктирные линии  $A$  и  $B$ ). При этом для идентификации составляющей  $B$  фактический участок  $B$  (сплошная линия) зависимости  $m$  от  $n$  экстраполируется в область малых значений  $n$ , а для идентификации составляющей  $A$  осуществляется простое вычитание соответствующих ординат фактического участка ( $A+B$ ) зависимости  $m$  от  $n$  и экстраполированного участка  $B$ .

Экстраполяция полученных зависимостей вплоть до  $n \rightarrow 0$  непосредственно дает значения  $A_A$  и  $A_B$ , а необходимые расчеты с использованием этих полученных значений  $A_A$  и  $A_B$  в зависимостях (5) позволяют находить значения  $k_A$  и  $k_B$ .

Соответствующие значения параметров магнитофоретического контроля «легкоизвлекаемой» ( $A$ ) и «трудноизвлекаемой» ( $B$ ) фракций феррочастиц, т.е.  $A_A$  и  $A_B$ ,  $k_A$ ,  $k_B$ ,  $m_{1...∞}$ , приведены в таблице 1. Здесь же и значения долей  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  этих подфракций, которые определяли как  $\lambda_A = (m_{1...∞})_A / [(m_{1...∞})_A + (m_{1...∞})_B]$  (x100%) и  $\lambda_B = (m_{1...∞})_B / [(m_{1...∞})_A + (m_{1...∞})_B] = (1 - \lambda_A)$  (x100%).

Таблица 1

**Значения параметров магнитофоретического контроля ферропримесей среды**

Проба анализируемой среды	Значения параметров						
	$A_A, \text{г};$ $A_B, \text{г}$	$k_A;$ $k_B$	$(m_{1...∞})_A +$ $(m_{1...∞})_B =$ $m_{1...∞}, \text{г}$	$\lambda_A, \%$ ; $\lambda_B, \%$	$k_{AB}$	$m_{1...[n]} +$ $+m_{([n]+1)...∞} =$ $m_{1...∞}, \text{г}$	$c, \text{г/кг}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Формовочная смесь, $M=40\text{г}, V=32,5\text{мл}$	2,6; 0,7	1,63; 0,094	0,63+7,1= =7,73	8,2; 91,8	0,68	1,98+5,88= =7,86	196
Сахар-песок, $M=55\text{кг}, V=64,6\text{л}$	0,8; 0,21	1,37; 0,64	0,273+0,23 4 =0,507	53,8; 46,2	0,97	0,478+0,018= =0,496	0,009

**Полуформальная двухэкспоненциальная модель**

Осуществляя многократный магнитофорез, экспериментатор получает итоговую, суммарную пооперационную зависимость  $m$  от  $n$  (рисунки 1 и 2) – как уже оговорено, – без «раздельных» (для каждой из подфракций, до «излома») характеристик пооперационных масс осадка феррочастиц.

И, в принципе, если эту, фактически получаемую (первичную) зависимость подвергнуть линеаризации в тех же полулогарифмических координатах, не прибегая к описанному выше приему нахождения «раздельных» ( $m, n$ )-характеристик каждой из подфракций, феноменологически также можно произвести соответствующий расчет интересующей нас массы ферропримесей. Для этого достаточно сложить общие массы по двум первичным экспонентам (рисунки 1б, 2б): формальной до «излома» и фактической после «излома» (включая экс-

траполяционную область остатка ферропримесей вплоть до  $n \rightarrow \infty$ ), т.е.  $m_{1... \infty} = m_{1...[n]} + m_{([n]+1)... \infty}$ .

Здесь масса осадка  $m_{1...[n]}$  (совместно подфракций  $A$  и  $B$  при формальных для их смеси параметрах  $A_{A,B}=A_A$  и  $k_{A,B}$ ) до «излома» зависимости  $m$  от  $n$  (рис.1б, 2б) находится как

$$m_{1...[n]} = A_{AB} \frac{1 - \exp(-k_{AB} \cdot [n])}{\exp k - 1}, \quad (8)$$

а масса осадка, вычисляемая только для хвостовой части зависимости  $m$  от  $n$ , т.е. после ее «излома», где, как отмечено выше, почти полностью превалирует подфракция  $B$ :

$$m_{([n]+1)... \infty} = \frac{A_B}{\exp k_B - 1} - A_B \frac{1 - \exp(-k_B \cdot [n])}{\exp k_B - 1} = A_B \frac{\exp(-k_B \cdot [n])}{\exp k_B - 1}. \quad (9)$$

Значит, выражение для общей массы осадка альтернативно (7) приобретает вид:

$$m_{1... \infty} = m_{1...[n]} + m_{([n]+1)... \infty} = A_{AB} \frac{1 - \exp(-k_{AB} \cdot [n])}{\exp k - 1} + A_B \frac{\exp(-k_B \cdot [n])}{\exp k_B - 1}. \quad (10)$$

В связи с осуществлением такого полуформального (но здесь как арбитражного, основанного на фактических экспериментальных данных) подхода к расчету общей массы феррочастиц появляется возможность сопоставления получаемых данных с предшествующими (таблица 1, п.4), полученными в результате квазифракционирования феррочастиц. В результате появляется аргумент, по которому можно судить о степени достоверности выполненного ранее приема квазифракционирования феррочастиц.

Вычисления значений общей массы  $m_{1... \infty}$  ферропримесей формовочной смеси и сахара по данным рисунков 1 и 2 (таблица 1, п.7) при характерных значениях  $A_{A,B}=A_A$  и  $k_{A,B}$  (таблица 1, п.п. 2,3) по формуле (10) показывает их полное взаимное согласие (отличие в пределах 1-2%) со значениями (таблица 1, п.4), полученными по формуле (7). И это подтверждает правильность расчетной двухэкспоненциальной модели.

В практическом плане это также свидетельствует о возможности применения как формулы (7), требующей соответствующего разложения  $m, n$ -характеристик, так и формулы (10), не требующей такого разложения.

### Выводы

1. На примере таких сред, как формовочная смесь, сахар-песок, не подчиняющихся (одно) экспоненциальной модели, приведены и проанализированы показательные массово-операционные характеристики магнитофоретического контроля находящихся в них ферропримесей.
2. Предложена и реализована двухэкспоненциальная модель, предполагающая графо-аналитическую детализацию  $m, n$ -характеристики магнитофоретического контроля ферропримесей (по подфракциям ферропримесей).
3. Показана возможность выполнения практических расчетов как в соответствии с моделью, требующей соответствующей детализации  $m, n$ -характеристик (по подфракциям), так и формально – без такой детализации.

### Литература

1. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Свистунов Д.И. и др. Контроль ферропримесей пробными, «экстраполируемыми» операциями магнитофореза // Известия МГТУ «МАМИ», 2010, №1(9), с.148-158.
2. Сандуляк А.А., Мартынов О., Полисмакова М.Н. и др. Прецизионный магнитный метод контроля ферропримесей // Хлебопродукты, 2010, №3, с.34-35.
3. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Ершов В.А. и др. Функциональная экстраполяция массово-операционной характеристики магнитофореза как основа прецизионного метода контроля феррочастиц // Измерительная техника, 2010, №8, с.57-60.
4. Сандуляк А.А., Свистунов Д.И., Полисмакова М.Н., и др. «Экстраполируемая цепочка»

магнитных тест-фильтров как средство контроля ферропримесей // Законодательная и прикладная метрология, 2010, №3, с.26-27,35-39.

5. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Саккани Ч. Особенности модели поглощающего экрана магнитного фильтра // Тяжелое машиностроение, 2004, №10, с.18-23.
6. Сандуляк А.В. Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов. М.:Химия, 1988,133с.

### **Особенности измерений геометрических параметров на малых областях**

к.т.н. проф. Суслин В.П., к.т.н. доц. Джунковский А.В, к.т.н. доц. Макаров А.И.  
 МГТУ «МАМИ»  
 (495) 223-05-23, доб. 1392

В статье показана эффективность применения метода регуляризации для решения плохо обусловленных задач измерения геометрических объектов на малых областях.

*Ключевые слова:* координатно-измерительная машина, КИМ, плохо обусловленные задачи, регуляризация.

При геометрических измерениях машиностроительных деталей встречаются ситуации, когда геометрический объект входит в конструкцию не целиком, а лишь своей частью, например в виде сегмента цилиндра. Если эта часть составляет небольшую долю от полного объекта, то при контроле с помощью координатно-измерительных машин его параметры будут получены с большими ошибками. Метрологам известно, что не следует измерять на координатно-измерительных машинах дуги окружностей, меньшие 90 градусов – ошибки измерений будут слишком велики.

Большие ошибки параметров при измерении малых сегментов вызваны плохой обусловленностью измерительных задач. В публикациях [7,8] показано, что числа обусловленности матриц систем уравнений для определения параметров малых дуг окружностей и малых сегментов сфер достигают порядков 10<sup>8</sup> - 10<sup>10</sup>, из-за чего ошибки определения радиусов и координат центральных точек становятся недопустимыми.

Задача определения параметров геометрических объектов по результатам измерений обычно решается методом наименьших квадратов:

$$F(a) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

где:  $a = a_0, a_1, \dots, a_m$  - параметры геометрического объекта;

$\delta_i = |P'_i - P_i|$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  - отклонения измеренных точек;

$P'_i = (X_i, Y_i, Z_i)$  - измеренная на объекте точка;

$P_i = (X'_i, Y'_i, Z'_i)$  - точка на геометрическом объекте, соответствующая измеренной.

При измерении окружности функция  $F(a)$  имеет вид:

$$F(R, a, b) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[ (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2 \right]^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где:  $a, b$  – координаты центра;

$R$  – радиус окружности;

$x_i, y_i$  – координаты измеренных точек.