

Е. П. ПОПЕЧИТЕЛЕВ, В. В. СКИБЕНКО

(Москва)

**МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
СКАНИРУЮЩЕГО СЛЕДОВОГО МЕТОДА
ОЦЕНКИ ПОДВИЖНОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ**

В [1, 2] предложен и исследован следовой способ измерения показателя подвижности популяции, основанный на телевизионном методе регистрации и анализе суммарной площади следов движения микроорганизмов при их перемещении за измеренное значение показателя подвижности $V_{и}$ отличается от расчетного $V_{р}$, при этом относительная погрешность измерений δ_V^S находится как

$$\delta_V^S = \frac{V_{и} - V_{р}}{V_{р}} = \frac{1 + \delta_{сл}}{\sqrt{1 + \delta_{кр}}} - 1, \quad (2)$$

здесь $\delta_{сл} = \Delta S_{сл}/S_{сл}$, $\delta_{кр} = \Delta S_{кр}/S_{кр}$ — относительные погрешности измерения площадей $S_{сл}$ и $S_{кр}$. Полная ошибка измерения площадей $S_{сл}$ и $S_{кр}$ содержит методическую и аппаратную составляющие, причем последняя может быть оценена известными в литературе методами [3].

На величину методической составляющей в основном влияют направление и скорость перемещения объекта относительно телевизионного раstra, кривизна траектории движения, форма и ориентация самого объекта, если он не круглый.

Причинами возникновения ошибок измерения $S_{сл}$ и $S_{кр}$ являются строчность структуры телевизионного раstra, различие направлений перемещения объектов относительно строк разложения; ошибка также зависит от выбора частоты $f_{и}$ опорных импульсов, используемых для измерения площади. Поэтому полная ошибка ΔS измерения площади следа может быть определена как

$$\Delta S = \Delta S_c + \Delta S_{и},$$

где ΔS_c — ошибка, зависящая от положения строк разложения относительно следа; $\Delta S_{и}$ — ошибка, зависящая от положения импульсов опорной частоты.

При движении объекта круглой формы перпендикулярно строкам разложения (рис. 1, б) получаем

$$\Delta S_{\perp} = \frac{h_x}{2} h_y N + h_y \sqrt{D h_y - h_y^2}, \quad (3)$$

здесь $N = (Vt + D)/h_y$ — количество строк, фиксирующих след; h_y — расстояние между строками; h_x — шаг дискретизации по строке (задается частотой опорных им-

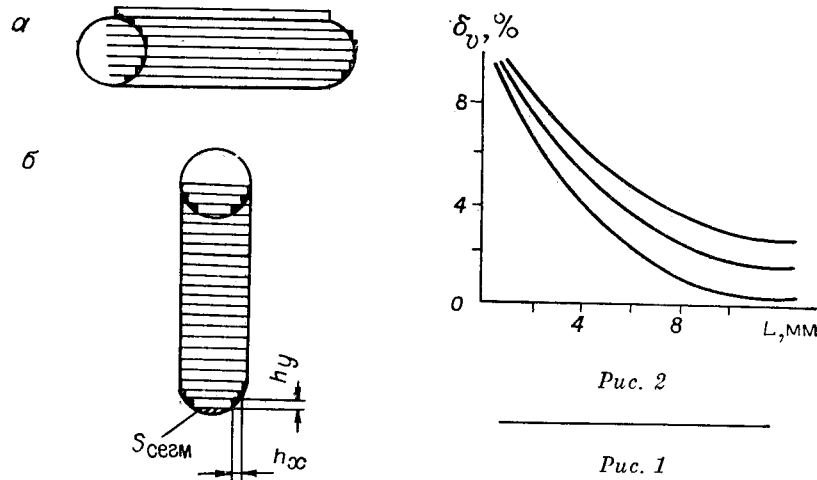


Рис. 2

Рис. 1

пульсов); D — диаметр объекта; t — время перемещения (экспонирования). При движении объекта параллельно строкам разложения (рис. 1, а) величина ΔS определяется иначе:

$$\Delta S_{\parallel} = h_x D / 2 + V t h_y. \quad (4)$$

На рис. 2 изображен график зависимости δ_V^S от $L = Vt$ при различных диаметрах объектов, позволяющий выбрать такое соотношение между скоростью V и временем экспонирования t , чтобы для объекта заданного диаметра ошибка измерения V_p была минимальной.

площади следа популяции за время t . Тогда метод подсчета относительной ошибки измерения выражается как

$$\delta_{V,n}^S = \frac{\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2} + \dots + \sqrt{S_n}}{\sum \sqrt{S_{\text{экр}}}} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{d_{\text{ср}} \pi}, \quad (6)$$

где $d_{\text{ср}} = 2\sqrt{S}/\pi N$ — средний диаметр исследуемых объектов; $S_{\text{экр}}$ — их эквивалентная суммарная площадь.

Анализ зависимости величины $\delta_{V,n}^S$ для двух неодинаковых по размерам объектов показывает (рис. 3), что при диаметрах, вдвое отличающихся друг от друга, величина погрешности составляет не более 5% и достигает 10%, когда диаметр одного объекта в 3 раза превышает диаметр другого.

Специфичной для измерения показателя подвижности популяции возможна ошибка, возникающая за счет пересечения следов или их слияния; анализ таких ситуаций требует специального изучения и выходит за рамки данного сообщения. При невысокой плотности объектов в популяции и рациональном выборе времени экспозиции вероятность появления такой ошибки мала. Существенный вклад в величину ошибки измерения V вносят также фактор формы объекта $k = L^2/S$ (где L — периметр объекта, S — площадь объекта) и наличие в популяции неподвижных объектов. На примере объектов эллипсоидной формы показано, что площадь следа эллипса, перемещающегося под углом φ по отношению к главной оси, определяется как

$$S_{\text{сл}} = 2al \sqrt{\frac{(1 + \rho^2 b^4/a^4)(1 + \rho^2 b/a)}{(1 + \rho^2)(a^2 + b^2 \rho^2)}} + S_0, \quad (7)$$

где S_0 — площадь эллипса; a — длина большой оси эллипса; b — длина его малой оси; $\rho = \frac{a}{b} \frac{1}{\text{tg } \varphi}$; l — длина пути центра эллипса.

Относительная ошибка δ_V^S измерения показателя подвижности $V_{\text{рф}}^n$ относительно круглого объекта той же площади определяется следующим образом:

$$\delta_V^S = \frac{a}{r} \sqrt{\frac{1 + \rho^2 b^4/a^4}{1 + \rho^2} \frac{1 + \rho^2 b/a}{1 + \rho^2 b^2/a^2}} - 1. \quad (8)$$

Из этого выражения следует, что ошибка растет с увеличением коэффициента формы эллипса и при $k_{\varphi} = 25$ достигает 93% (рис. 4). Для коррекции указанных ошибок в расчетные соотношения целесообразно вводить поправочные коэффициенты [2].

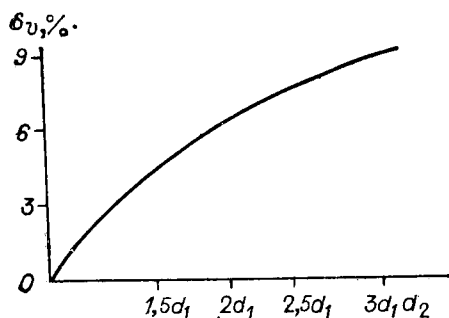


Рис. 3

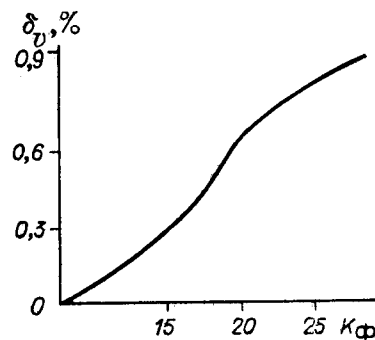


Рис. 4

Ошибку V_p^n за счет измерения площади неподвижных объектов можно учесть, если отселектировать подвижные объекты от неподвижных методами, известными в технике обработки изображений.

Проведенный анализ источников ошибок и полученные расчетные соотношения позволяют оценить методические ошибки, сопровождающие процесс определения параметра подвижности популяции объектов по следовому методу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скибенко В. В. Телевизионный анализатор для измерения скорости перемещающихся объектов // Медтехника.— 1980.— № 3.
2. Скибенко В. В. Следовый метод и аппаратура для определения параметров подвижности микроорганизмов в процессе культивирования: Автореф. канд. дис.— М.: НИИ по БИХС, 1984.
3. Горелик С. Л., Кац Б. М., Киврин В. И. Телевизионные измерительные системы.— М.: Связь, 1980.

Поступило в редакцию 14 августа 1984 г.

УДК 621.375.826

А. М. БАДАЛЯН, В. И. КОВАЛЕВСКИЙ, Г. И. СМИРНОВ, Д. А. ПАПИРО

(Новосибирск)

ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ

Для прецизионных измерений магнитной индукции однородных полей применяются обычно методы, использующие разные виды магнитного резонанса — резонансного поглощения электромагнитной энергии электронами или ядрами вещества в постоянном магнитном поле [1—3]. Методы связаны с применением в качестве детекторов магнитного поля образцов веществ, резонансное поглощение электромагнитной энергии в которых, в частности, существенно зависит от температуры образцов и подвержено сильным тепловым дрейфам. В основе описанного в данной работе способа измерения индукции магнитных полей лежит новое физическое явление: индуцирование сверхузких нелинейных магнитооптических резонансов поглощения лазерного излучения молекулярным газом [4, 5]. Как показано в [4], сверхузкие магнитооптические резонансы обусловлены наличием сверхтонкой структуры колебательно-вращательных переходов молекул, проявляющейся в условиях низкого давления газа. В этом случае зависимость поглощения лазерного излучения от аксиального магнитного поля имеет резонансную особенность с центром при нулевом поле. Ширина сверхузких магнитооптических резонансов определяется главным образом сверхтонким расщеплением молекулярных термов и весьма слабо зависит от давления и температуры газа. Это является отличительной чертой данного способа и позволяет значительно повысить точность регистрации магнитной индукции.

Рассматриваемый метод регистрации магнитной индукции заключается в том, что измеряемое магнитное поле компенсируется магнитным полем, создаваемым эталонным током, причем компенсация магнитных полей фиксируется путем получения магнитооптического резонанса при наложении взаимокompенсирующих полей на ячейку с газом, нелинейно поглощающим направленное на него лазерное излучение. Точность настройки на центр резонансов нелинейного поглощения составляет примерно 10^{-3} — 10^{-4} от его ширины. Поэтому узость магнитооптического резонанса нелинейного поглощения характеризует высокую разрешающую способность измерения индукции магнитного поля, а абсолютная погрешность измерения практически не зависит от величины магнитной индукции.

При экспериментальной проверке данного метода был применен одночастотный гелий-неоновый лазер с метановой поглощающей ячейкой (длина волны излучения $\lambda = 3,39$ мкм). Экспериментальное устройство для измерения магнитной индукции указанным методом схематически изображено на рис. 1. Ячейка 1 длиной 1,5 м и диаметром 15 мм с поглощающим молекулярным газом (метан при давлении около $0,1$ Н/м²) помещалась внутри соленоида, создающего аксиальное магнитное поле. Последовательно с ячейкой в резонаторе лазера располагалась усиливающая гелий-неоновая трубка 2 длиной 1 м и диаметром 7 мм. Резонатор лазера образован плотными 3 и выходным 4 (с коэффициентом пропускания $\sim 10\%$) зеркалами. Лазерное излучение мощностью около 1 мВт регистрировалось фоторезистором 5 (ФСГ-223А2). Сигналы, поступающие с фоторезистора, и параметры тока соленоида контролировались измерительной системой 6 (например, автоматизированной системой обработки данных в стандарте КАМАК).

В качестве примера конкретного исполнения регистрирующей аппаратуры следует указать систему селективного усиления и синхронного детектирования пе-