

Ю. Н. КУЦЕНКО, О. Н. РЕЧИНА

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ФУНКЦИЙ ГАЗООБМЕНА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

***Ключевые слова:** методы исследования, газообмен, растения, диэлектрическая проницаемость, фотосинтез.*

***Аннотация.** В статье приводится обобщенная характеристика методов и устройств для проведения измерений функций газообмена биологических объектов. Показано, что наиболее перспективным методом является метод, основанный на измерении диэлектрической проницаемости газовой среды.*

Разработка и внедрение качественно новых технологий ведения растениеводства защищенного грунта требуют использования высокоточного, быстродействующего оборудования для измерения как параметров микроклимата в теплице, так и параметров процессов жизнедеятельности растений. Наиболее отзывчивой на внешние воздействия функцией растительного организма является фотосинтез. Поэтому данный параметр часто используется в качестве чувствительного показателя, при помощи которого исследуется реакция растения на изменения условий окружающей среды.

Для определения интенсивности фотосинтеза практически применяют один или несколько из следующих критериев: количество поглощенной углекислоты, количество выделенного кислорода, количество образовавшегося органического вещества или накопленной в нем энергии. Причем, в качестве интегрального показателя фотосинтеза все же чаще используют газообмен растения.

Методы исследования газообмена биологических объектов растительного и животного происхождения разрабатывались на протяжении двух столетий и основывались на различных принципах измерения, таких как манометрия, амперметрия, массспектрометрия, радиометрия, оптико-акустический и парамагнитный анализ газов и др.

Долгое время измерение интенсивности фотосинтеза растений проводили с помощью титриметрического анализа. Принцип измерения которого заключается в определении количества углекислого газа путем количественного поглощения его раствором щелочи и последующего измерения концентрации этого раствора по отношению к контрольному [1, с. 370; 2, с. 1796]. Для определения концентрации получившегося раствора используют следующие способы титрования: объемное раствором кислоты в присутствии индикатора, электрометрическое - по величине омического сопротивления щелочи и др. Приборы на основе объемного титрования, несмотря на широкое применение, отличаются громоздкостью, хрупкостью из-за наличия стеклянных частей, ограниченной точностью измерений [3, с. 158]. Электрометрические приборы, обладая высокой чувствительностью измерений (0,004 мг $\text{CO}_2/\text{л}$), не дают возможности получить очень важную для исследования процесса газообмена растения концентрацию CO_2 в воздухе в момент измерения [4 с. 755].

Методы, основанные на измерении pH раствора при его контакте с исследуемым воздухом, с последующим вычислением по полученным данным концентрации углекислоты в воздухе, являются одними из лучших. Методы измерения pH, несмотря на хорошие качества, обладают существенными недостатками, к числу которых следует отнести визуальное определение измеряемой величины и большие ошибки измерений [5, с. 106].

Измерение углекислоты по поглощению инфракрасного излучения, на основе которого разработаны оптико-акустические газоанализаторы, отличается высокой чувствительностью и точностью измерений газообмена (до 0,001% CO_2) [6, с. 1683]. Однако, инерционность измерений и необходимость очищения исследуемого воздуха от водяных паров, имеющих максимум поглощения в инфракрасной области спектра, являются существенными недостатками этого способа измерения [7, с. 305].

Особую группу определения газообмена растений составляют комплексные методы. С их помощью можно определить как количество выделенной углекислоты, так и объем поглощенного кислорода. Углекислота определяется путем поглощения ее щелочью, а кислород - путем измерения объема воды, заполняющей объем сосуда с кислородом по мере изменения его объема [8, с. 33]. К преимуществам описываемых методов относятся возможность измерения как углекислоты, так и кислорода, однако их чувствительность и точность невелика

и поэтому в большинстве случаев при использовании этих методов требуются длительные экспозиции [3, с. 163].

Глубокий анализ газообмена растений проводят измеряя количество выделенного или поглощенного кислорода. Для исследования посредством объемного газового анализа проб газа из приемника периодически отбирается с объектом. Обычно при этом проба газа приводится в соприкосновение с раствором пирогаллола, и весь кислород, имеющийся в пробе, поглощается им. По изменению объема газа судят о концентрации кислорода, но такие измерения не дают возможности достоверно судить о процессах газообмена [3, с.165; 9].

Точные результаты дает метод, основанный на применении масс-спектроскопических измерений содержания компонентов в газовой смеси. Данный метод нашел применение для исследований газообмена со стабильными и радиоактивными изотопами. Несмотря на простоту принципа измерения, практическое его осуществление сопровождается многими трудностями и требует сложной электронно-вакуумной аппаратуры [3, с. 199; 9; 10, с. 54].

Из всех методов исследования газообмена по кислороду наиболее широкое распространение нашел манометрический [3, с. 210]. Преимуществом манометрии является высокая чувствительность, регистрация показаний за короткий промежуток времени, возможность работы при высоком содержании кислорода и одновременное изучение газообмена двух газов (CO_2 и O_2). В силу указанных преимуществ манометрический способ занимает особое положение даже в сравнении с таким методом, как оптико-акустический [3, с. 211; 9].

В основе манометрического метода широкое распространение получил метод Варбурга. Обычно манометрический прибор представляет собой термостатную ванну, снабженную специальным механизмом для укрепления и приведения в качательное движение набора манометров с присоединенными к ним на шлифах сосудиками. Из разработанных в последнее время приборов манометрического типа заслуживает внимание респирометр с повышенной точностью и графической записью процесса газообмена [10, с. 58]. Поставленная цель достигается с помощью применения в микрореспирометрах стандартных микропипеток (0,1 мм) с ценой деления 0,001 мм³. Тонкий внутренний диаметр микропипетки позволяет улавливать малые перемещения водяного столба манометрической жидкости. Существенными недостатками рассмотренных устройств являются: необходимость калибровки измерительных сосудов, громоздкая и хрупкая манометрическая техника, невозможность автоматизации процесса измерений. В связи с вышеиз-

ложенным, необходимо разработать респирометры, исключаящие указанные недостатки.

Из анализа литературных данных [11, с. 43; 12, с. 550] следует, что измерение функций дыхания биологических объектов можно проводить по изменению диэлектрической проницаемости газа, окружающего биологический объект.

Поляризация $P(\omega)$ газа атмосферы, возникающая под влиянием поля СВЧ, определяется [12, с. 551]

$$P(\omega) = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N}{3} \left[\alpha_0 + \frac{\mu^2}{3KT} \cdot \frac{1}{1 + I\omega\tau} \right], \quad (1)$$

ε – диэлектрическая проницаемость; M – молекулярный вес; ρ – плотность газа; N – число Авогадро; α_0 – средняя поляризуемость молекулярного газа; μ – постоянный дипольный момент; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; τ – время релаксации.

Для внешних полей с частотой меньше 100 ГГц $\omega\tau \ll 1$ и выражение (1) записывается

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N}{3} \left[\alpha_0 + \frac{\mu^2}{3KT} \right] \quad (2)$$

Для неполярных газов $\mu=0$, а выражение (2) имеет вид

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N\alpha_0}{3} \quad (3)$$

Выражение (3) для идеального газа запишется

$$\varepsilon - 1 = K_1 \frac{P}{T} \quad (4)$$

Для полярных газов

$$\varepsilon - 1 = \frac{\rho}{M} 4\pi N \left[\alpha_0 + \frac{\mu^2}{3KT} \right] \quad (5)$$

и с учетом (4)

$$\varepsilon - 1 = K_2 \frac{P}{T} \left(A + \frac{B}{T} \right), \quad (6)$$

K_2, A, B – постоянные коэффициенты.

Предполагая выполнимость закона о парциальных давлениях (закон Дальтона), диэлектрическая проницаемость смеси полярных и неполярных газов можно записать как сумму вида

$$\varepsilon - 1 = \sum_i K_{1i} \frac{P_i}{T} + \sum_q K_{2q} \frac{Pq}{T} \left(Aq + \frac{Bq}{T} \right). \quad (7)$$

С учетом наличия при газообмене углекислого газа (CO_2), сухого воздуха и водяного пара, выражение для « ε » запишется

$$\varepsilon - 1 = K_{11} \frac{P_d}{T} + K_{21} \frac{l}{T} \left(A + \frac{B}{T} \right) + K_{12} \frac{P_l}{T} \quad (8)$$

P_d – давление сухого воздуха; l – парциальное давление водяного пара; P_l – парциальное давление CO_2 .

Из анализа (8) следует, что с использованием метода измерений функции дыхания биологических объектов по величине диэлектрической проницаемости газа отпадает необходимость в определении количества O_2 и CO_2 , так как любые количественные изменения CO_2 и O_2 будут пропорциональны изменению диэлектрической проницаемости газа, окружающего объект.

Диэлькометрические методы измерения дыхания биологических объектов предъявляют высокие требования к чувствительности измерений: до 10^{-8} для $\Delta\varepsilon'$ и $10^{-6} - 10^{-7}$ для $\Delta\varepsilon''$. Из анализа измерений диэлектрической проницаемости газов следует, что резонаторные методы измерения диэлектрической проницаемости газов могут быть использованы для измерения функции дыхания биологических объектов. Теория всех методов проста и справедлива для всех типов резонаторов. Соотношения для диэлектрических параметров газа имеет вид [11, с. 45]

$$\Delta\varepsilon' = \frac{2\Delta f}{f_0}; \quad \Delta\varepsilon'' = \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2} \right), \quad (9)$$

Δf – изменение частоты резонатора при дыхании биологического объекта; Q_0 и Q_1 – добротности резонатора без газообмена и при наличии газообмена.

Однако, данный вопрос требует не столько теоретических, сколько экспериментальных исследований. Поэтому, дальнейшие исследования направлены на разработку устройства измерения функций газообмена растений защищенного грунта на основе диэлектрической проницаемости газовой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриллиант В. А. Методы изучения фотосинтеза / В. А. Бриллиант // Тр. Бот. ин-та АН СССР, сер. VI. Эксперим. бот. Вып. 7. 1950. С. 358–385.
2. Санадые Г. А. Применение титрометрического газоанализатора для определения фотосинтеза и дыхания / Г. А. Санадые // Ботанический журнал. 1963. Т. 48. № 12. С. 1796–1799.
3. Вознесенский В. Л. Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений / В. Л. Вознесенский, О. В. Заленский, О. А. Семихатова. М.: Наука, 1965. 306 с.
4. Вознесенский В. Л. Измерение интенсивности фотосинтеза кондуктометрическим методом / В. Л. Вознесенский // Биофизика, 1996. Т. V. № 6. С. 755–757.
5. Силева М. Н. Колориметрический метод определения фотосинтеза и дыхания растений / М. Н. Силева. Бюлл. Гл. бот. сада, Вып. 20. 1955. С. 101–106.
6. Зеленский О. В. О взаимоотношениях между фотосинтезом и дыханием / О. В. Зеленский. Бот. журн., 1957, т. 42, № 11, С. 1674–1690.
7. Зеленский О. В. Обзор методов изучения фотосинтеза наземных растений / О. В. Зеленский. – В кн.: Полевая геоботаника, т. 1, Изд. АН СССР, М. Л., 1959, С. 245–311.
8. Беликов П. С. Опыт применения инфракрасного газоанализатора (ГИП-5) для определения интенсивности фотосинтеза / П. С. Беликов, М. В. Моторина, Е. Б. Куракова. Изв. Тимирязевск. с-х акад., 1960, вып. 3 (34), С. 30–39.
9. А.с. 482652 (СССР). Респирометр для изучения дыхания биологических объектов / Н. С. Пушкарь, В. А. Иткин, Э. Л. Обозный [и др.]. Оpubл. в БИ, 1975, № 35.
10. Коган Н. А. Сложные волноводные системы / Н. А. Коган, Б. М. Машковцев, К. Н. Нибизов. Л.: Судпромгиз, 1963. 356 с.
11. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. М.: Физматгиз, 1964. 404 с.
13. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот / А. Ф. Харвей. М.: Сов. радио, 1965. 783 с.

**ANALYSIS METHODS AND DEVICES
MEASURING FUNCTIONS GAS EXCHANGE
BIOLOGICAL OBJECTS**

Keywords: research methods, gas exchange, plant, the dielectric constant, photosynthesis..

The summary. The article summarizes the characteristics of methods and devices for measurements of gas exchange functions of biological objects. It is shown that the most effective method is a measure method based on the measurement of dielectric constant of the gas medium.

КУЦЕНКО ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода, Таврический государственный агротехнологический университет, Украина, Мелитополь, (kucenko2010@gmail.com).

РЕЧИНА ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА – инженер-энергетик, ассистент кафедры автоматизированного электропривода, Таврический государственный агротехнологический университет, Украина, Мелитополь, (olyar83@list.ru).

KUTSENKO YURIY NYCOLAYEVICH – candidate of tecnic sciences, the senior lecturer of automated elektroprivod, Tavria State Agrotechnical University, Ukraine, Melitopol, (kucenko2010@gmail.com).

RECHINA OLGA NYCOLAYEVNA – Power-Engineer, the asistent of automated elektroprivod, Tavria State Agrotechnical University, Ukraine, Melitopol, (olyar83@list.ru).
