

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ СУБСТРАТА В МАЛООБЪЕМНОЙ КУЛЬТУРЕ ТЕПЛИЧНОГО ОВОЩЕВОДСТВА

В.В. Михайлов,

ст. преподаватель каф. энергетики БГАТУ

В.А. Павловский,

ст. преподаватель каф. автоматизированных систем управления производством БГАТУ

Я.В. Прищепчик,

студент агромеханического факультета БГАТУ

В статье приведены результаты теоретических исследований емкостного датчика влажности для управления поливом овощных культур при выращивании на субстратах в малообъемной технологии тепличного овощеводства. Создание оптимальной влажности способствует эффективному протеканию фотосинтеза. Разработка датчика для измерения влажности субстрата, особенно в условиях малообъемной технологии производства овощных культур, является актуальной задачей.

Ключевые слова: влажность, полив, субстрат, растения, корневая система, фотосинтез.

The paper presents the results of theoretical studies of capacitive humidity sensor for controlling the irrigation of vegetable crops during cultivation on the substrates using low-volume technology of greenhouse vegetable growing. The creation of optimal humidity contributes to the effective photosynthesis. The development of a sensor for measuring substrate humidity, especially in conditions of low-volume technology of vegetable crop production, is a pressing task.

Key words: humidity, irrigation, substrate, plants, root system photosynthesis

Введение

Как показывает практика, основные ресурсы при выращивании растений в теплицах тратятся на создание благоприятных условий, в частности необходимой влажности, при которых фотосинтез будет протекать эффективно [1].

Проблемой емкостных способов определения влажности в различных средах занимались И.Г. Матис [2] и А.А. Джежора [3]. Анализ работ, посвященных емкостным преобразователям для неразрушающего контроля, показал, что большинство методов на основе диэлектрического контроля влажности значительно зависят от толщины измеряемого слоя, дисперсности и плотности материала субстрата, а также от способа соприкосновения с контролируемой поверхностью, что не обеспечивает достаточной точности измерений.

Изменение влажности субстрата является важным информационным каналом в системе управления фотосинтезом и поливом корнеобитаемой среды в малообъемной технологии.

Обоснование и разработка инновационной системы управления процессом фотосинтеза в теплице, прежде всего с использованием датчиков для измерения влажности субстрата, является новой актуальной задачей.

Цель работы – повышение эффективности фотосинтеза производства овощных культур в защищенном

грунте путем совершенствования системы питания растений с использованием датчиков для измерения влажности субстрата в малообъемной культуре.

Основная часть

Основными факторами, влияющими на продуктивность растений в теплице, являются: температура окружающей среды, водно-минеральное питание, освещение, газовый состав воздуха. С учетом сложностей в определении закономерностей влияния факторов впитывания растворов и их недостаточной изученности, при выращивании овощей в закрытом грунте необходимы дополнительные исследования динамики впитывания субстратами питательных растворов, которые имеют ряд особенностей в связи с различными характеристиками используемых материалов при изготовлении субстратов, а также влияния периода вегетации растений и срока эксплуатации субстрата.

Явления переноса рассматривали применительно к единице площади субстрата. Количество раствора, переносимое через единицу площади субстрата за единицу времени, который можно назвать коэффициентом массопереноса или коэффициентом проницаемости G (отн. ед), можно представить в следующем виде:

$$G = k_G \cdot \Delta\mu, \quad (1)$$

где k_G – величина сопротивления проникновения поливочного раствора, оказываемого субстратом, м/моль;

$\Delta\mu$ – градиент силы проницаемости материала субстрата, моль/м.

Диаметр капель будет зависеть от диаметра поливочной трубки и давления подачи поливочного раствора, а прохождение поливочного раствора через субстрат можно описать уравнением:

$$G = \frac{k_G(Q_1 - Q_2)}{l}, \quad (2)$$

где Q_1 и Q_2 – концентрация проникающего в субстрат раствора, моль;

l – толщина субстрата, м.

Кривая проницаемости субстрата вначале имеет S-образный участок, а затем линейный. Уравнение Пуазейля можно записать для выражения количества жидкости V (м³), прошедшей через площадь субстрата S (м²) с количеством пор N (шт) на единицу площади за время t (ч):

$$V = \frac{\pi r^2 \Delta P t S N (Q_1 - Q_2)}{8k\delta}, \quad (3)$$

$$N = \frac{\delta}{\pi r^2}, \quad (4)$$

где P – плотность субстрата, кг/м³;

k – коэффициент проницаемости, м³;

δ – общая пористость субстрата, отн., ед.;

r – радиус поры субстрата, мм.

Важными составляющими освещения являются – спектр излучения, интенсивность и продолжительность облучения. При этом целесообразно использовать светотехнологии, которые позволят максимально экономить энергию и другие ресурсы в тепличном овощеводстве. Применение искусственного излучения в условиях светокультуры предъявляет различного рода требования к источникам освещения и системе управления светокультурой, что неизбежно отражается на энергетических и материальных ресурсах [4, 5].

Как правило, при выращивании растений в теплице, главным является естественное освещение. Однако при круглогодичном выращивании растений в условиях Беларуси искусственное освещение более предпочтительно для достаточного накопления растительной биомассы при выращивании овощей в теплице. Особенно важно дополнительное освещение в условиях укороченного светового дня.

Неотъемлемым фактором фотосинтеза также является управляемый полив растений овощных культур, в основе которого лежит рациональное использование водных растворов химических удобрений, содержащих в своем составе все необходимые для питания растений минеральные элементы.

В настоящее время разработаны различные методы подачи питательного раствора в корневую си-

стему растений и технико-технологические особенности доставки минеральных элементов питания [6]:

– *метод водной культуры* (собственно гидропоника) – корневая система растений помещается в питательный раствор, в который периодически (1-4 раза в день) подается воздух для снабжения корней кислородом в зависимости от сезона и возраста растений;

– *метод воздушной культуры* (аэропоника) – периодическое опрыскивание корней питательным раствором (через каждые 15-20 мин);

– *метод гидропоника* – корни растений помещаются в пористую и твердую среду различной природы (инертные гравийные материалы, минеральные ваты), в том числе метод капельного полива растений, выращиваемых в малообъемной культуре на искусственных субстратах.

У растений томатов, выращиваемых в условиях гидропоника, значения анионной и катионной емкостей корней в разы выше, чем у растений, выращиваемых в почве. Это связано с различными условиями минерального питания в обменно-сорбированной форме. Если растение достаточно хорошо поглощает обменно-связанные элементы питания, то величина анионной и катионной емкостей корней возрастает [7]. Это объясняется тем, что корни и листья овощных культур в этих условиях «работают» более эффективно, чем при выращивании на почвогрунтах.

Анализ и корректировка минерального состава питательного раствора выполняется 1-2 раза в неделю. За это время уровень элементов минерального питания достигает 50 % от исходного количества. Ежедневный расход раствора меняется в зависимости от периода роста и развития растений. При этом 2/3 от общего количества влаги поглощается корневой системой растений, а 1/3 испаряется в результате транспирации вегетативной части растений в зависимости от интенсивности роста, образования вегетативной массы, урожая культуры и состояния воздушной среды в теплице (температуры, влажности и кислорода) [8].

Преимущество гидропоника заключается в том, что растения находятся в более выгодных условиях и в большем объеме получают минеральное питание и аэрацию корневой системы [9]. Улучшение аэрации происходит за счет понижения содержания сахаров и повышения содержания органических кислот, образующихся при распаде сахаров [9, 10]. По мнению многих исследователей [7, 8], это связано с тем, что корневая система растений обладает избирательной способностью, позволяющей регулировать поступающие элементы из внешней среды, если их концентрация не превосходит некоторых критических значений в области физиологически приемлемых соотношений элементов питания или концентрацию, в которой корневые системы могут работать избирательно. Это означает, что ответная реакция растений может служить информационным каналом изменения концентрации солей в поливочных растворах, определяемая условиями адаптации к внешней среде по потреблению влаги и минерального питания.

Корневая система и взаимодействующий с ней субстрат непрерывно связаны между собой и составляют единую систему. При определении диэлектрической и магнитной проницаемости поливочного раствора необходимо учитывать влияние электромагнитного поля. Магнитная проницаемость поливочного раствора близка к единице и в процессе изменения концентрации или химических реакций изменяется незначительно.

Впитывание влаги (поливочного раствора) в субстрат является сложным физическим явлением, которое представляет собой неустановившееся движение под действием гравитационных и капиллярных сил. Закономерности впитывания изучаются на протяжении последних лет. Предлагается много расчетных схем и моделей, но ввиду сложности процесса, теоретически трудно показать его количественную сторону с учетом взаимодействия всех факторов (влажность, температура, состав воздуха, химический состав поливочного раствора и др.) Совместное влияние данных факторов применительно к пористым системам искусственных субстратов, включая корневую систему, изучено недостаточно.

Значение влажности субстрата является обоснованным информационным каналом управления фотосинтезом, а определение этого значения является основной задачей для реализации системы управления поливом корнеобитаемой среды в малообъемной технологии.

В настоящее время для измерения влажности субстрата наиболее широкое применение получили электроемкостные способы, когда в качестве первичных преобразователей используют измерительные конденсаторы, выполненные в виде электродов, которые контактируют с контролируемым объектом [11].

Конструктивной особенностью датчика для измерения влажности субстрата является использование электродов, с помощью которых осуществляется неразрушающий контроль влажности искусственного субстрата при изменении электромагнитного поля между электродами и измерении электрических параметров цепи (рис. 1) [3].

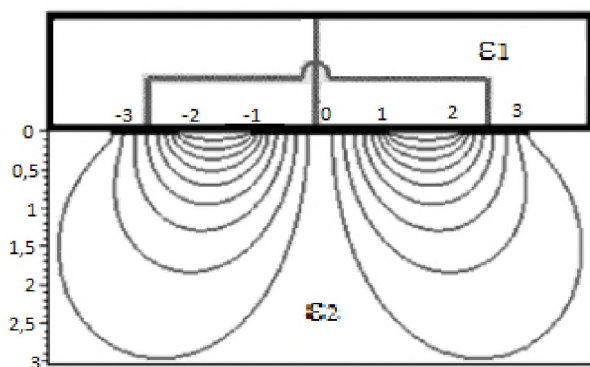


Рисунок 1. Теоретическая модель электроемкостного датчика с жесткими электродами в разрезе: ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость электроизоляционного слоя датчика; ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость внешнего слоя (субстрата) (Ф/м)

На основе теоретических данных [12] был разработан датчик (рис. 2) для определения влажности минерального мата субстрата при выращивании овощей (рассады) в малообъемной культуре. Датчик состоит из чувствительного элемента, который включает два гибких изолированных провода, закрепленных на жестком изоляционном каркасе в вертикальной плоскости датчика, где взаимно противоположные концы указанных проводов герметизированы, а выводы выполнены с возможностью снятия с них полезного сигнала.

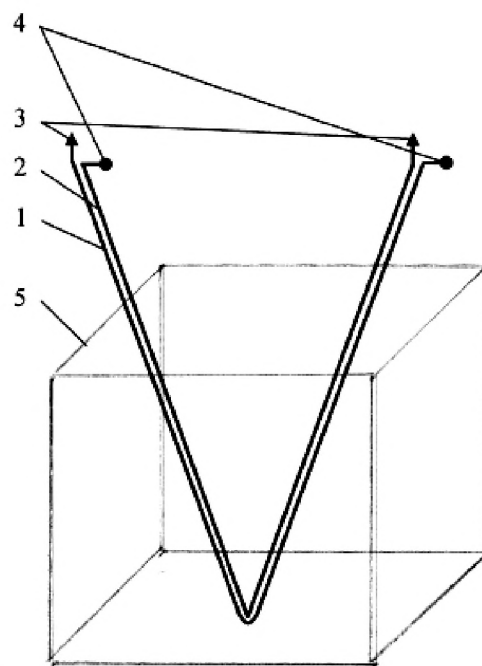


Рисунок 2. Конструкция электроемкостного датчика с жесткими электродами: 1, 2 – два гибких изолированных провода; 3 – концы проводов, подключаемые к измерительно-усилительному устройству; 4 – изолированные концы проводов; 5 – субстрат

Работа электроемкостного датчика основана на явлении изменения диэлектрической проницаемости среды при изменении ее влажности. С изменением влажности субстрата 5 изменяется электрическая емкость между гибкими изолированными проводами 1 и 2, противоположно расположенные концы этих проводов 3 присоединены к усилительно-преобразовательному устройству, другие концы 4 проводов 1 и 2 изолируются (рис. 2) [12].

Требования к способам расчета электроемкости сводятся к следующему:

- 1) расчетная модель контролируемого объекта должна иметь форму, соответствующую конструкции емкостного преобразователя;
- 2) допускается, что измерительная схема подключается с помощью тонких проводников.

Входную комплексную емкость можно представить в виде:

$$C_p = \varepsilon l A, \quad (5)$$

где ε – комплексная диэлектрическая проницаемость материала, Ф/м;

l – длина электродов, м;

A – геометрический коэффициент рабочего полупространства.

$$\varepsilon = \frac{C_p}{l A}. \quad (6)$$

Имея значение диэлектрической проницаемости, получим выражение для определения тангенса угла потерь исследуемого материала. Диэлектрическими потерями d (Ф/м) в воздухе можно пренебречь [3]:

$$\lambda = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – диэлектрическая проницаемость внутреннего и внешнего слоя электродов, Ф/м.

В основе расчета коэффициента λ лежит принцип контроля изменения емкости при изменении влажности материала [3].

В данной методике есть недостатки. На границах раздела участков происходит искажение электрических полей и нет возможности достоверного расчета емкости участка.

В исследованиях необходимо было исключить эти недостатки. Для этого использовали способ, при котором пространство преобразователя заполняют эталонным диэлектриком [3]. В качестве диэлектрика используют твердые среды на основе лака с компаундом. Реализация метода основана на измерении емкости незаполненного диэлектрическим материалом конденсатора (диэлектрическую проницаемость воздушного пространства принимаем равную единице)

$$C_1 = C_p + C_{1n}, \quad (8)$$

где C_p – входная комплексная емкость электрода, Ф.

C_{1n} – емкость внешнего слоя электрода, Ф;

а затем заполненного диэлектрическим материалом конденсатора

$$C_2 = \varepsilon_2 C_p + C_{2n}. \quad (9)$$

Для определения величин ε и μ примем обобщенный параметр концентрации поливочного раствора M [3]:

$$\varepsilon = f_1(M), \quad (10)$$

$$\mu = f_2(M), \quad (11)$$

Для поливочного раствора наиболее применимо описание тангенса угла потерь и концентрации раствора. Для создания датчика измерения влажности субстрата с частотой до 100 МГц обычно используют чувствительные элементы, имеющие вид катушки или конденсатора. Описать изменяющиеся во времени электромагнитные поля можно уравнением Максвелла [5]:

$$\operatorname{rot} H = i + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (11)$$

$$\operatorname{rot} E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (12)$$

где H – напряженность магнитного поля, В/м;

E – напряженность электрического поля, А/м;

ε – диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

μ – магнитная проницаемость, Гн/м.

Степень поляризации диэлектрика выразим как поляризованность или интенсивность поляризации:

$$P = \lim \frac{d\mu}{dV},$$

где $d\mu$ – электрический момент элемента объема;

dV – элемент объема, м³.

Момент молекул одного вида в однородном поле:

$$\mu = \alpha \cdot E, \quad (13)$$

где α – коэффициент поляризуемости молекулы.

Для повышения чувствительности датчика можно увеличить количество электродов N (шт). В этом случае расчет секций примет вид:

$$N_g = 2\varepsilon \left(n \frac{k_1}{k'_1} + n \frac{k_2}{k'_2} \right), \quad (14)$$

где k – модуль эллиптического интеграла

$$k_1 = \frac{\operatorname{tg} \left(\pi \frac{r_0}{r_2 + r_1} \right)}{\operatorname{tg} \left(\pi \frac{r_1}{r_2 + r_1} \right)}, \quad (15)$$

где r_0 – радиус электрода с изоляционным материалом, мм;

r_1 – внутренний радиус электрода, мм;

r_2 – наружный радиус электрода, мм.

Заключение

Рассмотрены теоретические аспекты и особенности впитывания влаги корневой системой тепличных растений при выращивании их на минеральных субстратах.

Предложен расчетный способ определения рабочей емкости датчика для измерения влажности субстрата.

Измерение влажности субстрата с помощью разработанного датчика открывает новые возможности для интеллектуального управления электротехнологическими процессами при выращивании овощных культур на субстратах в малообъемной технологии тепличного овощеводства.

Полученные результаты исследований позволяют создавать условия для эффективного протекания процесса фотосинтеза в растениях при выращивании в закрытом грунте.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ**

1. Герасимович, Л.С. Принципы интеллектуального управления биотехнической системой тепличного комбината. // Л.С. Герасимович // Научные чтения БГТУ. – Минск, 2020 – С. 153.

2. Матис, И.Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля / И.Г. Матис. – Рига: Зинатне, 1982. – 302 с.

3. Джежора, А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета / А.А. Джежора. – Минск: Белорусская наука. – 2008. – 305 с.

4. Протокол исследовательских испытаний светильников № 82/15 от 18.06.2015 г. – ЦСОТ НАН Беларуси.

5. Усиков, С.С. Электрометрия жидкостей / С.С. Усиков. – Л.: Химия, 1974. – 144 с.

6. Емкостной датчик для определения влажности минерального субстрата в посадочной емкости при выращивании культур в закрытом грунте: пат 21053 Респ. Беларусь / В.В. Михайлов, В.А. Павловский; заявитель Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20140269; заявл. 13.05.2014; опублик. 30.06.2017.

7. Свентицкий, И.И. Энергосбережение и энергетическая экстремальность самоорганизации / И.И. Свентицкий. – М.: ВИЭСХ, 2007 – 468 с.

9. Веремейчик, Л.А. Научные основы питания томатов на минеральных субстратах: монография / Л.А. Веремейчик, Л.С. Герасимович; под ред. акад. Л.С. Герасимовича. – Минск: Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 2005. – 234 с.

10. Мировые и российские перспективы тепличного овощеводства // Агробизнес [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: <http://agbz.ru/articles/mirovyye-i-rossiyskie-perspektivy-teplichnogo-ovoshevodstva>. – Дата доступа: 25.02.2024.

11. Герасимович, Л.С. Исследование влияния светодиодного освещения на рост томатов в теплицах / Л.С. Герасимович, В.В. Михайлов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: сб. науч. статей Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23-24 ноября 2017 г. / Под ред. М.А. Прищепова. – Минск: БГАТУ, 2017.

12. Способ управления светокulturой при выращивании овощных культур в теплице: патент 22299 Респ. Беларусь / Л.С. Герасимович, В.В. Михайлов, В.А. Павловский; заявл. Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20150665; заявл. 29.12.2015; опублик. 30.08.2017.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 14.10.2024

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 2-е полугодие 2024 года: для индивидуальных подписчиков - 45,45 руб., ведомственная подписка - 47,85 руб.