

ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING SCIENCES

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ MODELLING OF PROCESSES AND MANAGEMENT IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 620.165.29

Д. А. Гринюк, В. И. Бакаленко, Т. А. Дейнека,
Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова

Белорусский государственный технологический университет

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ В ТЕПЛИЦАХ

В статье сделан анализ существующего уровня информационного обеспечения систем контроля и управления выращивания растений в теплицах. До сих пор можно встретить системы разных поколений. Автоматизация теплиц основана на использовании современных измерительных систем и датчиков, обеспечивающих мониторинг параметров среды и состояния растений в реальном времени. Основная задача таких систем заключается в создании оптимальных условий для роста культур при одновременном снижении затрат воды, энергии и удобрений. В теплицах применяются датчики климат-контроля, воды и орошения, состояния почвы, растений, а также внешние метеостанции. Ключевыми параметрами контроля являются температура, влажность воздуха, концентрация CO_2 и освещенность, поскольку они напрямую влияют на фотосинтез и урожайность. Значительное внимание уделяется датчикам температуры и влажности почвы, которые позволяют оптимизировать полив и предотвратить развитие заболеваний растений. Современные технологии включают как контактные, так и бесконтактные методы измерений, а также использование оптических, электрохимических и инфракрасных сенсоров. Развитие беспроводных сетей, IoT, машинного обучения и искусственного интеллекта способствует интеграции данных в интеллектуальные системы управления. Несмотря на высокую эффективность, многие датчики требуют регулярной калибровки и технического обслуживания. Сенсорные технологии тепличного хозяйства находятся в активной фазе развития и исследований для решения задач максимального использования всевозможных параметров, в первую очередь для научных исследований, а также поиска недорогих вариантов для применения в максимальном количестве прикладных приложений с разными финансовыми возможностями.

Ключевые слова: измерительные системы, климат-контроль, автоматизация теплиц.

Для цитирования: Гринюк Д. А., Бакаленко В. И., Дейнека Т. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г. Информационные и управляющие системы для выращивания растений в теплицах // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2026. № 1 (302). С. 52–75.

DOI: 10.52065/2520-6141-2026-302-6.

**D. A. Hryniuk, V. I. Bakalenko, T. A. Deineka,
N. M. Oliferovich, I. G. Suhorukova**
Belarusian State Technological University

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS FOR GROWING PLANT GROWTH IN GREENHOUSES

This article analyzes the current level of information support for greenhouse plant growth monitoring and control systems. Systems of different generations can still be found. Greenhouse automation relies on modern measurement systems and sensors that monitor environmental parameters and plant health in real time. The primary objective of such systems is to create optimal conditions for crop growth while reducing water, energy, and fertilizer consumption. Greenhouses utilize climate control, water and irrigation sensors, soil and plant health sensors, and external weather stations. The most important control parameters are temperature, humidity, CO₂ concentration in the air and light, as they directly affect photosynthesis and crop yield. Considerable attention is paid to soil temperature and moisture sensors, which optimize irrigation and prevent plant diseases. Modern technologies include both contact and non-contact measurement methods, as well as optical, electrochemical, and infrared sensors. The development of wireless networks, IoT, machine learning, and artificial intelligence facilitates the integration of data into intelligent control systems. Despite their high efficiency, many sensors require regular calibration and maintenance. Greenhouse sensor technologies are actively developing and researching to maximize the use of all possible parameters, primarily for scientific research, as well as to find cost-effective solutions for use in a wide range of applications with varying budgets.

Keywords: Measuring systems, climate control, greenhouse automation.

For citation: Hryniuk D. A., Bakalenko V. I., Deineka T. A., Oliferovich N. M., Suhorukova I. G., Information and control systems for plant growing in greenhouses. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2026, no. 1 (302), pp. 52–75 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2026-302-6.

Введение. Искусственные условия для выращивания растений создаются уже достаточно долго, но только в последние десятилетия началось интенсивное развитие систем управления по разработке условий максимального эффективного их произрастания. Первоначально системы решали примитивные задачи поддержания температуры и влажности. Однако это не всегда приводило к успешному результату. На сегодняшний день выделяют пять поколений систем управления (СУ) теплицами, развитие которых происходило с учетом последних достижений систем информации, накопления опыта и усложнения задач. Цель модернизации – повышение эффективности, сокращение трудозатрат и оптимизация здоровья растений.

Для первого поколения (до 1980-х годов) характерно было ручное управление – операторы использовали простейшие системы контроля, а регулирование температуры и влажности обычно осуществлялся путем открытия или закрытия вентиляционных отверстий, регулировки затеняющих сеток или ручного включения систем отопления. Данные обычно не фиксировались. Эффективность управления определялась способностью оператора накапливать и использовать полученный опыт, учитывать требования к освещенности, влажности и текущему состоянию растений.

Второе поколение (1980-е–1990-е г.) можно определить как полуавтоматическое, и оно характеризовалось уже наличием систем автоматического поддержания основных параметров температуры, влажности и орошения. СУ иногда могли учитывать состояние среды, отопления и вентиляции, реализовать программное управление с учетом фактора времени. Обработка данных велась редко, фиксация параметров могла осуществляться на бумажные носители. Человеческий фактор продолжал играть важную роль, особенно при настройке, мониторинге и корректировке.

Третье поколение (1990-е – 2000-е г.) характеризовалось резким увеличением возможностей компьютеризированных систем. Постепенно происходила полная компьютеризация,

автоматизация управления производилась с учетом взаимосвязи основных параметров технологии. Произошел качественный скачок в построении систем измерений. При управлении начался учет других параметров функционирования теплиц.

Использование централизованных СУ позволяет производить оптимизацию различных параметров, таких как температура, влажность, уровень CO₂, степень освещения и уровень орошения, улучшенный учет при управлении окружающей среды. Управление строится на базе систем реального времени с постоянной обработкой накапливаемых данных. Происходит внедрение сложных систем орошения с внесением дополнительных химических элементов, необходимых для растений в период их развития. Однако стоимость таких разработок значительна, что ограничивало их применение.

Четвертое поколение (2010-е – 2020-е г.) ознаменовалось внедрением технологий интернет-вещей (IoT) и облачных сервисов. Для данного поколения характерно использование автоматизации с удаленным доступом и интеграция IoT. Большинство измерительных систем и исполнительных механизмов разрабатывается с учетом использования IoT, беспроводных сетей, которые непрерывно собирают данные о различных факторах, включая влажность почвы, интенсивность света, температуру, влажность воздуха и даже уровень питательных веществ. Облачные сервисы вместе с машинным обучением позволяют улучшить прогнозирование оптимальных условий и соответствующую корректировку параметров окружающей среды.

Активно применяются технологии Big Data для выявления взаимосвязи параметров и дальнейшего повышения эффективности функционирования теплиц.

Системы четвертого поколения, как и третьего, требуют существенных инвестиций для создания инфраструктуры. Однако функционирование системы четвертого поколения требует меньше человеческих ресурсов. Наличие интернет-соединений не является сильной стороной таких систем в некоторых случаях.

Пятое поколение (2020-е – настоящее время) характеризуется переходом к использованию ИИ с предиктивной аналитикой. Кроме этого, активно используются машинное обучение и робототехника.

Предиктивная аналитика и передовые имитационные модели оптимизируют условия выращивания, сокращают потери и повышают урожайность за счет прогнозирования потребностей окружающей среды (например, когда требуется поливать, регулировать освещение или изменять температурные настройки). Автоматизация реализует управление технологическими параметрами, а робототехнику внедряют для таких задач, как сбор урожая, обрезка и посадка.

Обработка данных осуществляется в реальном времени, происходит мгновенное, автономное реагирование на корректировку температуры, освещения, влажности, CO₂ и орошения, обработку от болезней и т. д. Фактически происходит интегрирование всех систем в классическую пирамиду управления, где все наверху замыкается на ERP-систему предприятия.

Однако это еще больше увеличивает стоимость внедрения и повышает требования к квалификации персонала для эксплуатации и обслуживания. Возникают проблемы безопасности, которые характерны для всех высокоинтегрированных производств. Необходимость использования беспроводных систем только усугубляет эту проблему.

Следует отметить, что даже в рамках одной страны можно наблюдать эксплуатацию одновременно нескольких поколений систем управления для тепличных хозяйств.

Измерительные системы для теплиц. Автоматизация теплиц основана на использовании определенного набора датчиков и измерительных систем для получения первичной информации. В зависимости от поколения систем набор датчиков может варьироваться. Основная задача источников информации – отслеживать потребности растений и обеспечивать учет условий окружающей среды в режиме реального времени.

В литературе приводят примеры о широком использовании многопараметрического мониторинга с применением современных систем машинного обучения, фильтров Калмана,

упреждающего управления, систем компенсации возмущения, что иногда позволяет снизить потребление воды, минеральных удобрений и до 65% энергопотребление [1, 2].

Объекты с управляемым климатом характеризуются набором распределенных в пространстве и изменяющихся во времени параметров, имеющих сложные нелинейные взаимосвязи. Для их мониторинга и управления требуется большое количество датчиков, выпускаемых серийно, и специализированных решений для построения сенсоров, часто с нелинейными свойствами и ограниченной точностью. Как отмечено [3], разработка датчиков и измерительных систем занимает львиную долю исследований, которые посвящены системам управления теплицам и подобным объектам. Датчики часто расположены в рабочей зоне обслуживающего персонала теплиц, поэтому к ним предъявляются дополнительные требования по устойчивости к воздействию окружающей среды, бесшумности и надежности. Результаты разработки современных сенсоров превратили системы автоматизации для климат-контроля в передовой, интеллектуальный, работающий в режиме реального времени инструмент управления.

Датчики и измерительные системы удобно рассматривать по группам в зависимости от функционального назначения:

- датчики климат-контроля;
- датчики состояния почвы для орошения и питания;
- датчики для растений и культур;
- внешние метеостанции.

Датчики климат-контроля. Датчики первой группы можно также определить как датчики окружающей среды растений.

Датчики температуры. Датчики температуры играют ключевую роль в обеспечении условий произрастания и развития растений. Более того, большая часть энергозатрат (70–85%) в тепличной системе приходится на регулирование температуры [4]. Поэтому мониторинг и контроль температуры должны быть первостепенной функцией в теплице. Распределение температуры внутри теплицы в основном неравномерное (разность в различных точках может достигать 3,3°C) [5], при этом наибольшая изменчивость наблюдается в дневное время летнего сезона. Немаловажным является место установки датчиков, которые должны измерять температуру в месте расположения растений, а не в месте удобства монтажа. Существует оптимальное место установки датчика в каждом конкретном случае [6]. Датчики температуры и влажности могут быть представлены в одном конструктивном модуле. Теплицы различных климатических условий имеют разные температурные профили – это также необходимо учитывать при выборе их места установки. Температура почвы предоставляет важную информацию о жизни почвенной экосистемы. Температура листьев необходима для контроля здоровья растений [7, 8]. Обычно рекомендуются бесконтактный способ контроля листьев [9, 10]. Датчик температуры не должен подвергаться прямому воздействию солнечного излучения или системы отопления, вентиляции и сильному электромагнитному излучению.

Помимо этого, датчиками температуры измеряют параметры воздуха (внутри и снаружи), иногда температурные градиенты [11]. Используют разные типы температурных преобразователей: термисторы, терморезисторы, термопары [12] с аналоговыми и цифровыми выходами. Инфракрасные пирометры в основном применяют для бесконтактного контроля температуры растений или поверхности почвы. Современные решения от ведущих производителей обеспечивают точный контроль для оптимизации роста, особенно в коммерческих организациях, путем обнаружения тепловых сигналов и передачи данных в системы управления для автоматического обогрева/охлаждения, гарантирующих идеальные условия без прямого контакта, хотя ключевым моментом является калибровка под конкретные растения [13]. Использование таких средств требует соответствующего обслуживания приборов: избегать попадания на измерительные поверхности пыли, воды и т. д.

Достоинством использования пирометров является целенаправленный мониторинг объекта контроля. Например, поверхность листа растения, участка почвы корневой системы и т. д. Такой подход может позволить системе автоматизации теплиц повысить точность создания оптимальных параметров климата для растений. Это весьма важно для контроля микроклимата чувствительных культур и предотвращает перегрев или переохлаждение, что снижает риск потери урожая. Эффективность применения пирометров существенно зависит от правильности выбора длины волны для измерения. Для уменьшения влияния на точность показаний пыли, водяного пара или загрязнений на поверхности линзы лучше использовать двухцветные пирометры. Измерительный прибор следует размещать таким образом, чтобы получить точные показания о реальном воздействии растений на них, а не только на удаленные поверхности.

Кроме непосредственно климат-контроля, датчики температуры используются в системах отопления, охлаждения, защиты от заморозков и т. д.

Датчики влажности. Датчики влажности в теплицах (гигрометры) – это важнейшие устройства, измеряющие влажность воздуха и помогающие пользователям поддерживать идеальные условия для выращивания здоровых растений, оказывать влияние на дыхание, транспирацию и усвоение питательных веществ [14].

В самом простом случае производят контроль относительной влажности (RH). Более продвинутые системы измеряют также дефицит давления пара (VPD) [15, 16]. Иногда используют расчетное значение данного параметра по RH и температуре.

Этот параметр можно рассчитать как разность давлений насыщенных паров (SVP) и фактического давления пара (AVP). Если значение параметра высоко, то воздух сухой и растение теряет много влаги (устьица закрываются). При низком значении данного показателя (воздух влажный) растение плохо испаряет воду (устьица закрыты), а также падает поглощение CO₂.

Эти параметры широко используются для систем вентиляции и увлажнения в теплицах и гроубоксах. VPD также важен для профилактики заболеваний растений.

Знания истории изменений RH и VPD данных параметров позволяет выявить тенденции потребностей в отоплении и вентиляции для оптимизации последующих процессов.

Наиболее распространенными датчиками влажности являются емкостные по измерению диэлектрической проницаемости [3, 17]. Их популярность обеспечивают быстрдействие, высокая точность, стабильность и низкие затраты на обслуживание.

Еще одним распространенным типом датчиков влажности является резистивный, измеряющий влажность по изменению электрического сопротивления [18, 19].

Реже используется традиционный метод с измерением температуры влажного и сухого термометра – психрометрический [20].

Концентрация CO₂ – определяющий фактор влияния на фотосинтез растений. Листья растений поглощают CO₂ из атмосферы, корни получают питательные вещества из почвы вместе с водой, а световая энергия, поглощаемая хлорофиллом, необходима для завершения фотосинтеза. Концентрация CO₂ в открытом пространстве составляет приблизительно 400 ppm, но рост и урожайность растений увеличиваются при высоком уровне CO₂ (400–1000 ppm) [21]. При этом оптимальная концентрация существенно зависит от типа растений. На концентрацию CO₂ влияет время суток. Растения повышают его ночью и снижают днем. Процесс биологического разложения удобрений и биотоплива понижает концентрацию CO₂. Растение поглощает CO₂ через устьица, на которые оказывают сильное влияние температура и влажность. При управлении концентрацией CO₂ следует учитывать влияние вентиляции [22].

Следует отметить, что контроль и регулирование CO₂, как и температуры, существенно влияют на энергоэффективность теплиц. Управление концентрацией углекислого газа вместе с другими параметрами в режиме реального времени способствует оптимизации процесса роста растений.

Датчики CO₂ можно разделить на три основных класса в зависимости от принципов их работы: оптические датчики CO₂, электрохимические датчики CO₂ и датчики CO₂ на основе оксидов металлов [23].

Недисперсионные инфракрасные (NDIR) датчики обнаруживают CO₂ путем измерения поглощения инфракрасного света на определенных длинах волн. Молекулы CO₂ поглощают инфракрасный свет, и датчик рассчитывает концентрацию на основе количества поглощенного света. Они характеризуются хорошей точностью, надежностью и долговечностью, однако являются очень дорогими.

Электрохимические датчики (или датчики химической абсорбции) используют химическую реакцию для определения уровня углекислого газа. Вещество в датчике меняет цвет или другие свойства при взаимодействии с CO₂. Несомненным преимуществом их является невысокая стоимость и простота конструкции, однако для них свойственны низкая точность и частая калибровка.

Принцип работы емкостных или резистивных датчиков основан на измерении сопротивления или емкости материала при воздействии CO₂. Они также относительно просты и недороги и, как электрохимические, требуют регулярных калибровок, и еще они менее точны, чем датчики NDIR.

Высокая стоимость NDIR-датчиков и необходимость постоянных калибровок химических и резистивных решений ограничивают использование таких элементов контроля. Для некоторых датчиков характерна зависимость точности показаний от значения шкалы. Следует отметить, что на показания датчиков CO₂ оказывают влияние факторы окружающей среды: температура, влажность, присутствие аммиака и другие факторы. Это может влиять на точность датчика, т. е. приводить к ложным показаниям. Для датчиков углекислого газа также характерна существенная динамическая ошибка.

Некоторые производители предлагают комплексные измерители температуры, влажности и CO₂ [24].

Датчик освещенности. Для обеспечения оптимального процесса развития растений необходимо регулировать освещенность, не допуская как ее недостаток, так и избыток. Солнечная энергия является основным источником световой и тепловой энергии внутри теплицы. Часто освещенность из-за конструкции, расположения, качества и состояния изолирующих устройств бывает неравномерной. Однако рассеянный свет лучше влияет на фотосинтез растений, чем прямое освещение [25]. Кроме того, разные типы растений требуют разной освещенности.

При климат-контроле бывают различные варианты управления количеством света. В некоторых случаях используется только энергия солнца и регулируется только избыток света путем управления шторами затемнения. В других – солнечный свет сочетается с искусственным освещением [26]. В третьем варианте полагаются сугубо на искусственные источники света, в качестве которых в современных теплицах используются светодиодные светильники благодаря их энергоэффективности, долговечности и надежности.

Приборы для измерения освещенности в теплицах можно условно разделить на две категории [27]. Обычно в небольших теплицах используются светочувствительные резисторы (LDR). Квантовые датчики фотосинтетически-активного излучения (PAR) лучше определяют фактическое количество света, которое получают растения. Поскольку растения чувствительны к световому спектру 400–700 нм, квантовый датчик света измеряет интенсивность света в этом диапазоне и выражает ее в терминах плотности потока фотонов фотосинтеза (PPFD).

Датчики состояния почвы для орошения и питания. Контроль состояния почвы или субстанции является важнейшим фактором развития растений. Обеспечение влагой и питанием корневой системы растений занимало важное место на протяжении развития всех поколений систем управления в закрытых объектах выращивания.

Датчик влажности почвы. Хотя проникновение влаги в растение происходит разными путями, однако корневая система здесь занимает основное место. Вместе с влагой

через корневую систему происходит транспортировка необходимых питательных веществ. Влажность почвы – один из основных факторов развития растений. Ее избыток в почве может повлечь негативные последствия для растений, способствовать развитию заболеваний. При этом для ряда растений оптимальный диапазон может изменяться на различных этапах развития. Следует отметить, что часто системы с обратной связью в теплицах заменяются на программный полив на основании накопленного опыта [28]. Однако такой подход к системе полива не всегда благополучно влияет на конечный результат, поэтому полив по показаниям текущего значения влаги способен обеспечить более качественный урожай и экономии влаги. Пороговые значения оптимального диапазона влагосодержания почвы также зависят от ее текстуры, химического состава [29].

Датчики влажности почвы – это устройства, используемые для измерения количества воды, присутствующей в почве [30]. Данные с датчиков помогают определить оптимальные потребности сельскохозяйственных культур в воде, что обеспечивает устойчивое водопользование и эффективные методы орошения. Современные датчики предоставляют данные в реальном времени, позволяя пользователям удаленно отслеживать состояние почвы, что улучшает возможности принятия решений.

Разнообразие методов достаточно велико, развиваются альтернативные решения, которые могут прийти на смену традиционным. Одной из самых последних исследований в данном направлении является работа [31]. Авторы подразделяют все датчики контроля влажности почвы в первую очередь на контактные, которые функционируют с нарушением структуры почвы в процессе монтажа чувствительного элемента, и бесконтактные.

Среди бесконтактных выделены:

- датчики на основе микроволнового излучения (Microwave-based Sensors);
- датчики с использованием гамма-излучения (Gamma-ray Sensors);
- датчики на основе радиоакустических и сейсмических волновых явлений (Radio Acoustic, and Seismic Wave-based Approaches);
- сейсмоэлектрические датчики (Seismoelectric Sensors);
- датчики на основе космических лучей (Cosmic Ray-based Sensors);
- датчики на основе электромагнитной индукции (Electromagnetic induction);
- датчики видимого и ближнего инфракрасного диапазона (Near-Infrared Optical Approach);
- горадары (Ground Penetrating Radar)
- интерферометрическая рефлектометрия с использованием системы географического позиционирования (Geographical positioning system interferometric reflectometry).

Эти датчики и измерительные системы позволяют оценивать влажность почвы вблизи поверхности, когда растительный покров не создает значительных помех, но они не могут предоставить информацию обо всей корневой зоне почвы.

Контактные датчики имеют сейчас больший коммерческий потенциал для их использования в системах управления. Среди основных можно выделить:

- датчики матричного потенциала (Matrix Potential Sensors, MPS);
- микроструктурированное оптическое волокно (Microstructured Optical Fibre, MOF);
- нейтронные зонды (Neutron Probe, NP);
- волоконно-оптические датчики (Fibre Optic Sensors, FOC);
- радиочастотная идентификация (Radio Frequency Identification, RFID);
- датчики тепловых импульсов (Heat Pulse Sensors, HPSMS);
- датчики на основе гидрогеля (Hydrogel-based Sensors, HBS);
- микроэлектромеханические системы (Micro Electro-Mechanical System, MEMS);
- блоки теплоотвода (Thermal Dissipation Blocks, TDB);
- биоразлагаемые датчики (Biodegradable Sensors, BDS);
- диэлектрические датчики (Dielectric Sensors, DS).

Сенсоры MPS оценивают содержание почвенной влаги на основе энергетического состояния воды. Существует ряд решений, которые основаны на этом принципе, но использование тензиометров является самым распространенным способом для измерения силы, которую

растение должно приложить для извлечения воды из почвы, т. е. почвенного натяжения. Доступность, простота в использовании, точность и малое влияние колебаний температуры и солености почвы определили популярность данных сенсоров. Однако их эксплуатация требует мониторинга и технического обслуживания. Неоднородность почвы также может оказывать влияние на точность показаний. Как пример – тензиометры от Irrrometer модели 2001.

Энергетическое состояние воды можно оценивать и с помощью гипсовых блоков, в которых контроль сопротивления позволяет косвенно оценивать натяжение почвенной влаги. Кроме гипса применяют стекловолокно, керамику, нейлон. Их главное преимущество – экономичность и долговечность, что делает их пригодными для многократных длительных измерений в течение всего вегетационного периода. Примером могут быть блоки для измерения влажности почвы от Spectrum Technologies. Подобным вариантом являются гранулированные матричные датчики (GMS) влажности почвы Watermark (Irrrometer Company, Inc., США) [32].

Появились реальные успехи в использовании для измерения влажности почвы с помощью микроструктурированного оптического волокна (MOF). Оптическое волокно покрыто тонким слоем диоксида олова (SnO_2), в котором происходит адсорбция и десорбция молекул воды, что обеспечивает точное измерение влажности почвы. Однако неаккуратный монтаж, деградация и температурные дрейфы затрудняют пока использование данного подхода для автоматизации полива.

Нейтронные зонды (Neutron Probe, NP) контролируют количество атомов водорода и пересчитывают в количество молекул воды. Он считается наиболее точным методом ($\pm 1\text{--}2\%$ объемного содержания воды), надежным и быстрым (время отклика всего от 1 до 2 минут). Зонды NP имеют возможность оценивать влажность в большом объеме почвы и на разных глубинах и выпускаются с поверхностным и профильным чувствительными элементами. Необходимость ручных операций, высокая стоимость, риски для здоровья ограничивают применение в автоматизированных системах орошения. Основное применение приходится на научные исследования. Решение Vimprex с зондом Hydrosense может быть примером данного подхода.

Датчики влажности почвы FOC работают за счет обнаружения деформаций в специальном волокне при его нагревании. Эти системы привлекли значительное внимание благодаря своей способности обеспечивать высокоточные распределенные измерения. Последние разработки сосредоточены на повышении точности, чувствительности и практического применения этих датчиков при долговечности и мониторинге на больших расстояниях с хорошей динамикой.

В RFID используются пассивные (без батарей) или полупассивные RFID-метки в сочетании с инновационными наноматериалами и технологиями MEMS. Стоимость варьируется от менее 1 до 50 долларов США, что обеспечивает экономичное решение для мониторинга влажности почвы. Расстояния считывания около 2 м, что обуславливает их применение в питомниках на ранних стадиях выращивания растений. Измерительная система с двумя метками работает на основе анализа дифференциального минимального порога отклика (DMRT) между парами меток. Этот метод обеспечивает высокоточные измерения с погрешностью в пределах 5%.

Принцип действия датчиков HPSMS основан на влиянии влажности почвы на рассеивание тепла в почве. Основные преимущества включают высокую точность и минимальное влияние засоленности и температуры почвы. Хотя эти датчики надежны и достаточно точны, однако их производство не выведено на промышленную основу, установка остается технически сложной, калибровка специфична, относительно высокая стоимость, хрупкость, энергоемкость и большое время отклика.

Основной принцип HBS заключается в способности специальных полимеров поглощать в 10–1000 раз больше своего первоначального веса или объема воды за короткий период времени, что фиксируется тензоизмерительной системой или системой регулирования

прямого действия. Недостатком этих датчиков является сильное влияние температуры и засоленность почвы, высокая степень их деградации, легкость механических повреждений при многократных циклах установки, и время отклика может достигать 60 мин.

В основе MEMS лежат нанотехнологии с использованием микросенсоров, наносенсоров и актуаторов, управляемых микросхемами. Измерительная система компенсирует деформации влагочувствительной пленки и на базе этого формирует значение текущего количества влаги. Усовершенствованные с помощью нанотехнологий MEMS предлагают значительные преимущества, включая миниатюризацию, высокую чувствительность и низкое энергопотребление. Датчики на основе нанотехнологий обеспечивают повышенную точность и надежность по сравнению с традиционными методами измерения влажности почвы, но, несмотря на их потенциал, практическое применение датчиков влажности почвы на основе MEMS требует дальнейших исследований, особенно в отношении долговременной стабильности, калибровки для конкретных типов почвы и масштабируемости.

Датчики TDB, которые изготавливают из пористых керамических или металлических материалов со встроенным нагревателем, судят о влажности по скорости теплоотвода. Хотя TDB обеспечивают надежные измерения влажности, они требуют калибровки, специфичной для конкретного типа почвы, и, как правило, дороже, чем резистивные датчики, и более инерционные. Их преимущества включают устойчивость к засоленности, колебаниям температуры и долговременную стабильность.

Принцип биоразлагаемых датчиков BDS основан на нагреве посредством магнитных полей элементов датчика в почве и анализе результата с помощью тепловизионной съемки. Этот метод определяет содержание влаги и ее пространственное распределение. После завершения своей работы датчики можно оставить в земле, где они естественным образом разлагаются.

Большинство коммерчески доступных датчиков влажности почвы, включая многоуровневые, основаны на измерении электромагнитной относительной диэлектрической проницаемости почвы. Разнообразие датчиков DS по определению влажности через диэлектрическую проницаемость, достаточно велико и в работе [31] приводится следующая классификация:

- рефлектометрия во временной области (Time Domain Reflectometry, TDR);
- рефлектометрия в частотной области (Frequency Domain Reflectometry, FDR);
- трансмиттометрия во временной области (Time Domain Transmittometry, TDT);
- трансмиттометрия в пространственно-частотной области (Spatial Frequency Domain Transmittometry, SFDT);
- осциллятор линии передачи (Transmission Line Oscillator, TLO);
- рефлектометрия в амплитудной области (Amplitude Domain Reflectometry, ADR);
- коэффициент стоячей волны (Standing Wave Ratio, SWR);
- на основе емкости (Capacitance-based);
- на основе сопротивления (Resistance-based).

Диэлектрическая постоянная воды существенно превышает значение данного параметра воздуха и твердых веществ. Действительная и мнимая части диэлектрической постоянной, которая определяется при измерениях, зависят от рабочей частоты преобразователя, температуры, солености, объемного содержания воды в почве, отношения связанной воды к общему содержанию воды в почве, плотности почвы, формы частиц почвы, пористости и т. д. Для более точного измерения влажности используют различные варианты рефлектометров: рефлектометрию во временной области (TDR), рефлектометрию в частотной области (FDR), коэффициент стоячей волны (SWR), рефлектометрию в амплитудной области (ADR) и передачу во временной области (TDT), которые работают на таких принципах, как емкость, сопротивление, отражение во временной и частотной областях и стоячие волны.

Одним из главных преимуществ технологии TDR является высокая точность и динамика измерения влажности почвы, а также воспроизводимость результатов. Несмотря на меньшую чувствительность по сравнению с другими методами, датчики TDR подвержены влиянию

засоленности почвы при большой влажности. Датчики TDR широко используют для точной настройки орошения [33]. Примером промышленных решений являются датчики TRIME и CS616.

Приборы на принципе FDR выступают альтернативой более дорогим и сложным датчикам TDR. Однако по сравнению с датчиками TDR они более подвержены ошибкам измерения из-за параметров почвы и окружающей среды, неточности монтажа, электромагнитных помех, однако часто применяются в современных системах управления в реальном времени. В практических приложениях датчики FDR оказались особенно ценными для управления орошением в реальном времени [34].

Технология построения на принципе TDT приобрела больший интерес в области точного земледелия. Некоторые решения обеспечивают высокую точность измерения количества влаги в почве. Некоторые решения позволяют одновременно измерять влажность почвы, электропроводность, температуру и матричный (капиллярно-сорбционный) потенциал. Существует много решений с поддержкой беспроводного обмена.

Пространственно-частотная трансмиттометрия SFDT имеет преимущества в сравнении с TDR и FDR и гораздо меньше подвержена влиянию электропроводности почвы, засоленности, различий в текстуре или воздушных зазорах. Достоинством метода является линейная зависимость сигнала от объемного содержания воды, что упрощает калибровку. Отсутствие промышленных прототипов, большие зонды, высокое энергопотребление сдерживают применение SFDT в системах управления.

Анализ отраженного сигнала в методе TLO обеспечивает достаточно высокую точность, однако на точность могут влиять внешние факторы, особенно температура. Методы TLO и FDR обеспечивают частотные характеристики, указывающие на различные уровни влажности, и превосходят TDR и емкостные датчики по диапазону глубины и точности, а TDR по экономической эффективности. Для повышения точности производители рекомендуют производить калибровку на месте применения. На рынке представлено несколько измерительных систем данного типа: CS655 (Campbell Scientific Inc., США), Hydra (Stevens Water, США), Theta (Delta-T Devices Ltd., Великобритания).

Амплитудная рефлектометрия ADR, в отличие от TDR, проще и экономичнее. Имеет более компактные и надежные датчики, меньшее энергопотребление, позволяет использовать в системах непрерывного мониторинга, однако на точность показаний влияет текстура почвы, температура и соленость.

Контроль образования стоящей волны лежит в основе датчиков влажности SWR. Эти датчики, благодаря своей технологической простоте, стоят дешевле, чем TDR и FDR. Однако динамические характеристики хуже, при замене преобразователей необходима калибровка. Точность измерения около $\pm 3,5\%$. В некоторых почвах они превосходят TDR и FDR (особенно при сильно засоленности), а других показывают сравнимые результаты. В целом, датчики SWR обладают значительными преимуществами благодаря низкому энергопотреблению, что делает их совместимыми с сетями мониторинга на основе IoT, а также меньшей чувствительности к колебаниям температуры и солености по сравнению с датчиками FDR, однако требуют проведения калибровки в местах применения.

Контроль диэлектрической постоянной путем измерения емкости – один из старейших и надежных способов определения содержания влаги в почве. По сравнению с другими технологиями измерения влажности почвы емкостные датчики обладают явными преимуществами и ограничениями. Они дают погрешность примерно в два раза выше зондов TDR. Однако требуют постоянной калибровки на рабочей почве или субстрате. Различные примеры использования емкостных датчиков в сельском хозяйстве доказали свою высокую эффективность в управлении орошением. В некоторых случаях емкостные датчики использовались для оценки уровня питательной среды субстрата (объемное содержание азота, фосфора и калия) [35]. Вариантов промышленных датчиков, различающихся по точности и стоимости, очень много: зонды ECH2O с датчиками EC-5 (Meter Group, США); CS616 TDR (Campbell

Scientific Inc., США); TEROS10 и TEROS12 (Meter Group, США), SMT50 (Truebner GmbH, Германия), Scanntronik (Scanntronik Mugrauer GmbH, Германия); SKU:SEN0308 и SKU:SEN0193 (DFRobot, Китай) и т.д.

Самыми простыми и дешевыми являются контактные резистивные датчики RB с контролем проводимости. Иногда для улучшения точности используют матричное построение. Они являются одними из самых распространенных детекторов влажности почвы, но и самых проблемных для точного контроля влажности. Низкая стоимость часто выступает решающим фактором при необходимости контроля влажности в множестве точек, например питомниках. На RB сильно влияет проводимость почвы, засоленность почвы. Контактная система датчиков подвержена влиянию электрохимических реакций на поверхности. В засоленных или сильно удобренных почвах этот эффект может сделать датчики ненадежными в течение одного вегетационного сезона. Данный принцип используют промышленные решения, например, YL100, YL69, датчики Rika Sensors, Vegetronix VH400 [36, 37].

Измерение влажности почвы, в отличие от влажности воздуха, является сложным процессом, и точность измерений в значительной степени зависит от типа датчика, калибровки, условий окружающей среды, свойств почвы и финансовой доступности. Выбор технологии измерения влажности почвы зависит от конкретных условий применения: окружающей среды, типа почвы/субстрата, засоленности почвы, свойств воды, энергопотребления, экономических факторов, интеграции с платформами IoT и т. д.

Датчики уровня питательных веществ (ДУПВ). Несмотря на то, что контроль количества питательных веществ является фундаментом успешного развития и роста растений, возможностью долгосрочного управления качеством почвы, за рамки лабораторий данные измерительные системы стали выходить относительно недавно. Здоровье и плодородие почвы определяются сбалансированным наличием макроэлементов, таких как азот (N), фосфор (P) и калий (K), наряду с микроэлементами, включая железо, цинк и медь, которые играют решающую роль в метаболизме растений и урожайности сельскохозяйственных культур [38].

Датчики ДУПВ можно поделить на электрохимические, оптические и биологические.

Электрохимические датчики наиболее широко представлены благодаря их широкой применимости и экономичности, а также возможности быстрого и автоматического определения различных питательных веществ в почве.

Они строятся с применением ионоселективных мембран (ISM), ионоселективных полевых транзисторов (ISFET), потенциометрических, вольтметрических и амперметрических сенсоров. ISM и ISFET позволяют определять NPK, pH и другие важные параметры почвы при высокой точности и в реальном времени в полевых условиях. Высокой чувствительностью, быстродействием и экономичностью обладают потенциометрические и вольтметрические датчики. Селективность амперметрических датчиков высока, однако они подвержены деградации измерительных электродов.

Показания биосенсоров достаточны для определения состояния питательных веществ NPK в почве, что позволяет выбирать соответствующую норму внесения удобрений.

Оптические датчики, в основе которых лежит использование характеристик отраженного света, достаточно молодое направление для определения питательных веществ. Оно быстро развивается, но пока применяется лишь в лабораторных условиях. Датчики с использованием УФ-видимого, рамановского и ИК-спектроскопического анализа позволяют измерять органическое вещество почвы (ОВП), доступный калий (AK) и другие компоненты почвы без ее разрушения.

Недостатки датчиков для определения концентрации питательных веществ в почве является высокая первоначальная стоимость, необходимость калибровки и техническое обслуживание. Для некоторых из них, как было отмечено выше, характерна деградация из-за воздействия химических веществ почвы, влаги и механических нагрузок. Как и многие датчики влажности почвы, ДУПВ чувствительны к свойствам почвы, окружающей среды и многие из них имеют ограниченный диапазон определяемых веществ. Для прикладного

использования из-за сложности и большого количества результатов измерения необходимо привлекать технологии ИИ, машинного обучения и BigData. На текущем этапе такие измерительные системы доступны больше для крупных компаний, однако в процессе развития они могут получить широкое применение.

Следует отметить, что данный показатель, в отличие от датчиков влажности и температуры воздуха, влажности почвы, необязателен для постоянного контроля. Вполне возможным рациональным будет наличие мобильной системы на автономном ходу наподобие робота-газонокосильщика, которая будет проводить периодические исследования на площади с привязкой по координатам и времени для больших закрытых площадей, или ручного анализатора для параметров контейнера для рассады со считыванием его идентификационного номера.

Датчики рН. Кислотность почвы играет большую роль в развитии растений. Этот показатель имеет решающее значение в определении доступности необходимых питательных веществ для растений, а также общего состояния почвы. Мониторинг рН позволяет оптимизировать рост сельскохозяйственных культур для получения хорошего урожая и поддерживать здоровье почвы (предотвращая проблему блокировки питательных веществ или токсичности). При необходимости рН регулируют путем внесения, например, извести. Хотя шкала рН варьируется от 0 до 14, большинство растений хорошо растут в почве с диапазоном рН от 6,0 до 7,5. Но оптимальное значение этого параметра для разных культур свое. Поддержание идеального уровня рН повышает доступность питательных веществ для растений, что приводит к более эффективному внесению удобрений и уменьшению потерь питательных веществ и, следовательно, способствует экономному использованию ресурсов.

Следует отметить, что есть два подхода к контролю рН. Один предполагает забор проб и анализ с использованием классических подходов, другой непосредственно установку датчика в почву [39]. В первом случае обеспечивается высокая точность, однако требуются большие временные, организационные и финансовые траты. Во втором случае следует учитывать влияние на показания температуры и ее распределение в почве, влагосодержания и других окружающих факторов.

Эти датчики строятся на электрохимическом принципе с двумя электродами, один из которых эталонный замкнутый, другой – со специальной мембраной, которая пропускает ионы водорода, что влияет на потенциал на электроде и обеспечивает измерение рН. Они остаются наиболее распространенными.

Альтернативой являются сенсоры с фотометрическим детектированием, кондуктометрические датчики рН на основе рН-чувствительных гидрогелей, ионно-чувствительные датчики рН на основе полевых транзисторов, модифицированные электроды, напечатанные на трафарете (SPE). Чаще всего рассматривают электроимпедансную спектроскопию (ЭИС) и квадратно-волновую вольтамперометрию (КВВ) [39].

Хотя датчики рН не такие дорогие и более доступные в отличие от системы измерения количества питательных веществ, но этот показатель не меняется в почве быстро. Регистрацию рН можно также организовать с помощью мобильных станций, ручного контроля без существенной потери эффективности использования данного параметра в системах мониторинга и управления.

Конкретные характеристики датчиков рН почвы могут различаться в зависимости от конструкции, технологии и области применения. Существуют варианты (как правило, электрохимические), которые обеспечивают непрерывные или периодические показания, что позволяет своевременно корректировать рН. Современные решения обеспечивают автоматическую калибровку, что снижает необходимость ручной настройки и гарантирует точность измерений. Они достаточно долговечны и дают возможность эксплуатации в широком диапазоне влажности, температуры и параметров почвы. Некоторые производители используют беспроводной способ передачи данных для уменьшения ручного труда, удаленного мониторинга и анализа. Достаточно распространенным решением является включение рН

в системы комплексного контроля почвы наряду с датчиками влажности, температуры, питательных веществ и т. д.

Несмотря на то, что датчики рН являются доступными как для крупных, так и для небольших хозяйств, в то же время большинство датчиков требует частых калибровок и технического обслуживания. Долговечность стеклянного электрода ограничена и требует периодической замены. Текущее техническое обслуживание, включая очистку и повторную калибровку, может увеличить стоимость использования этих датчиков с течением времени. Как отмечалось выше, на показания датчиков рН может оказывать влияние высокая соленость, большое содержание глины или наличие некоторых органических веществ, колебания влажности. Динамические характеристики сенсоров также зависят от структуры почвы. В глинистых почвах получаемые данные будут иметь большую динамическую ошибку. Качественное использование текущих показаний рН для принятия решений по управлению возможно при анализе вместе с другими параметрами, как, например, уровнем питательных веществ, влажностью, текстурой почвы и типом растения, требует большого опыта или применения экспертных систем.

Следует отметить, что параметр рН может быть использован для подготовки питательных растворов в системах управления теплицами [40].

Датчики физиологических параметров растений и культур. Данная группа датчиков начала применяться только в последних поколениях систем мониторинга и управления.

Датчики температуры листьев. Контроль температуры листьев на сегодняшний день в основном изучается в научных работах. С помощью температуры листьев можно контролировать водный статус растения, тепловой стресс и устьичную проводимость. Когда растения испытывают водный стресс, устьица закрываются, транспирация падает и температура листьев повышается. Это позволяет точно планировать полив растений.

Однако температура листьев может характеризовать не только физиологические, энергетические изменения растений и транспирацию, но и отражать состояние здоровья культуры. Урожайность культур напрямую связана с температурой листьев [41].

В то же время температура листьев является косвенным индикатором, и для каждой культуры есть свои значения.

Подходы к построению измерительной системы контроля весьма разнообразны.

Термисторы и терморезисторы (RTD) крепятся непосредственно к поверхности листа с помощью зажимов, ленты или клейких подушечек. Датчики стараются максимально облегчить для уменьшения воздействия на растения с подключением тонкими проводами без натяжения. Недостатком использования таких датчиков является высокая вероятность повреждения листьев растения. Кроме этого, меняется естественный теплообмен, что может приводить к искажениям. Для сбора достаточного количества информации требуются большое число датчиков.

Другим подходом является использование инфракрасных датчиков, которые позволяют контролировать температуру бесконтактно по тепловому излучению. Есть примеры привлечения для этих целей дронов. Недостатком является узкое поле зрения и необходимость калибровки по излучению листа. Кроме одноточечных иногда привлекают тепловизоры. Тепловизоры, или датчики на дронах, позволяют реализовать общий мониторинг на значительных территориях. Однако солнечный свет, отражения с поверхностей и другие помехи могут вносить свои коррективы в показания датчиков. Стоимость выше, чем у контактных систем.

Следует отметить, что интерпретировать результаты измерения температуры листа часто бывает сложно, так как она может повышаться не только из-за нарушения водного баланса, но и по причине высокой внешней температуры или патогенов. Для эффективного использования необходим комплексный анализ с привлечением других параметров [42, 43].

Датчики хлорофилла и нормализованного вегетационного индекса (NDVI). Содержание хлорофилла связано с количеством питательных веществ, в первую очередь азота,

фотосинтетической способностью и общим состоянием здоровья растения. Флуоресценция хлорофилла является прямым отражением преобразования и рассеивания энергии в процессе фотосинтеза растений, особенно во время реакций в фотосистеме, где энергия, не использованная для фотохимических реакций, повторно высвобождается в виде флуоресценции. Технология флуоресценции хлорофилла, как неинвазивный инструмент мониторинга в реальном времени, может предоставить важную информацию о поглощении световой энергии, скорости переноса электронов (ETR), фотохимической квантовой эффективности и нефотохимическом тушении (NPQ). Эти параметры не только показывают эффективность фотосинтеза растений и распределение энергии, но и обеспечивают важную основу для изучения механизма реакции растений в стрессовых условиях, таких как свет, температура, засуха и засоление [44]. Уже существуют множественные примеры применения данного показателя для прикладных задач управления развитием растений. Основные ограничения применения данного показателя на практике связаны с воздействием окружающей среды на результаты, сложностью и высокой стоимостью оборудования [45].

Измерительные системы контроля хлорофилла находятся в стадии активного развития. Некоторые системы строятся с помощью оптических датчиков пропускания со светодиодом и фотодиодным детектором, которые анализируют прохождение спектров света (например, красный (~650 нм) и ближний инфракрасный (~940 нм)) через лист. К примеру, устройства типа SPAD. Другим подходом измерения хлорофилла является анализ спектра отраженного света от поверхности листа. Иногда используют непосредственно специфические флуоресцентные датчики, которые реагируют на флуоресценцию хлорофилла, испускаемую после возбуждения. Последний вариант самый дорогой и информативный.

Датчики хлорофилла демонстрируют быстрое и неинвазивное определение состояния растения, косвенный контроль содержания азота и возможность оптимального внесения количества удобрений. Устоявшегося регламента использования информации с этих датчиков еще нет. Внешние факторы, такие как пыль, наружная освещенность, вода, изменение параметров листьев в процессе развития, являются достаточно сильными помехами, что требует частых калибровок.

Нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), один из первых аналитических продуктов дистанционного зондирования, используемый для упрощения сложных многоспектральных изображений, в настоящее время является наиболее популярным индексом для оценки растительности. Широкое применение связано с тем, что NDVI может быть рассчитан с помощью любого многоспектрального датчика с видимым и ближним ИК-диапазоном. Более низкая стоимость и вес многоспектральных датчиков позволяют устанавливать их на спутниках, летательных аппаратах и, все чаще, на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Хотя исследования показали, что NDVI эффективен для выражения состояния растительности и количественной оценки ее характеристик, его широкое использование, особенно в приложениях для БПЛА, несет в себе риски неправильного применения конечными пользователями, не имеющими необходимого образования в области дистанционного зондирования. Поэтому многие результаты применения NDVI, полученные с помощью БПЛА, требуют исследований по адаптации для эффективного использования на практике.

В отличие от высококлассных спутниковых систем, которые прошли тщательную калибровку, многие коммерческие датчики БПЛА, способные считывать многоспектральные NDVI, могут содержать существенные геометрические и радиометрические ошибки, которые необходимо уменьшить путем калибровки. Однако калибровка БПЛА – это непростой процесс [46].

Примером приборов NDVI может быть портативный прибор GreenSeeker, который используется как активный оптический датчик, измеряющий биомассу растений и отображающий ее в виде нормализованного разностного индекса растительности. Он используется для оценки состояния или жизнеспособности урожая. Датчик излучает красный и инфракрасный

свет, а затем измеряет количество каждого типа света, отраженного обратно на датчик. Интенсивность обнаруженного света является показателем состояния здоровья растения. Датчик отображает значение NDVI, которое затем используется для расчета рекомендуемой нормы внесения удобрений в данном месте [47]. Следует отметить, что прибор NDVI предназначен для оценки характеристик растительности на больших площадях с использованием спутников, самолетов и БПЛА.

Датчики роста. Среди них можно выделить датчики диаметра стебля, высоты растений. Датчики позволяют наблюдать за динамикой роста и выявлять неблагоприятное, стрессовое состояние растения [48]:

- датчики диаметра стебля (дендрометры). Измеряют изменения толщины стебля в микрометровом масштабе. Могут быть датчики контактными (на основе деформации, LVDT) и бесконтактными. В основе может лежать механическое или электронное детектирование;
- датчики удлинения листьев или побегов. Для их построения используют датчики линейных перемещений, которые обычно прикрепляют к растущим органам;
- датчики роста на основе изображений. Для этого используют различные варианты видеокамер. Развитие данного решения происходит интенсивно под влиянием современных технологий. Помимо контроля динамики роста, может производиться оценка урожайности, выявления стресса, фенотипирования, контроль болезней.

Проблемой использования первых двух типов датчиков, которые строятся на контактном принципе, является то, что рост биомассы может приводить к искажениям результатов измерений. В большинстве своем их интеграция в измерительные системы нуждается в большом количестве ручного труда. Использование видео требует высокой стоимости и квалификации специалиста для обработки данных, учета изменения освещенности и пр.

Датчики защиты растений и культур. К этому классу можно отнести измерительные системы, которые разрабатываются для отслеживания самых популярных болезней и вредителей. Они редко бывают универсальные, но часто необходимы при условии интенсивного выращивания для обеспечения урожайности.

Датчики мониторинга вредителей и болезней. Раннее обнаружение вредителей и болезней имеет решающее значение для предотвращения повреждения урожая. Отметим самые популярные направления:

- акустические датчики, которые обнаруживают звуки, издаваемые вредителями, например насекомыми, когда они питаются растениями или передвигаются по почве;
- датчики-ловушки насекомых или грызунов;
- датчики летучих органических соединений (ЛОС), которые измеряют изменения химического состава выбросов растений, которые могут указывать на стресс или нападение вредителей.
- видеослежение. Развитие искусственного интеллекта и машинного обучения способствует применению видеоаналитики для анализа болезней и состояния растений.

Датчики погоды и функционирования систем управления. Следует отметить, что существует большое количество вспомогательных датчиков, с использованием которых реализуются функции защиты и управления.

Датчики погоды. Анемометры служат для контроля скорости ветра, в первую очередь с целью предотвращения повреждения растений и ограждений.

Дождемеры предназначены для решения задач планирования рационального орошения и управления водными ресурсами.

Барометры позволяют прогнозировать погодные тенденции, особенно экстремальные.

Датчики орошения. Управление водными ресурсами – один из основных вопросов получения необходимой динамики роста и урожая. Помимо измерительных систем оценки потребности во влаге, которые были указаны выше, для точного дозирования могут быть использованы серийные промышленные приборы (расходомеры, датчики уровня, дозаторы и т. д.).

Датчики испарения. Для контроля баланса распределения влаги и оптимального полива используют датчики испарения. Испарение происходит двумя путями: выделение влаги из почвы или субстанции и транспирация растений. Это объединяют понятием «эвапотранспирация». Обычно оценка производится косвенно.

Атмометры (испарители), оценивают потери влаги, которые проходят через керамическую пластину из резервуара. Простое решение, которое доступно многим, но требует технического обслуживания ввиду только ручного варианта исполнения.

Лизиметры отслеживают фактическую потерю влаги путем контроля веса либо путем измерения водного баланса [49, 50, 51]. По удобству и точности они считаются самым удачным вариантом [52]. Их недостатком является дороговизна и сложность. Как правило, обычно такой подход используется в лабораториях, для калибровки.

Для контроля этого параметра иногда используют испарительные поддоны, где понижение уровня выступает индикатором интенсивности испарения. Этот подход является одним из самых простых, но малоточным и годится только для примерной оценки.

Производить оценку испарения можно также на основе датчиков температуры, относительной влажности, солнечной радиации или освещения и скорости воздуха. Использование известной модели Пенмана – Монтейта позволяет провести оценку испарения. Существуют два варианта: энергетический и объемный:

$$\lambda_v E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) g_a}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{g_a}{g_s}\right)} \quad (1)$$

или

$$ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) g_a}{\left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{g_a}{g_s}\right)\right) L_v}, \quad (2)$$

где λ_v – скрытая теплота испарения (энергия, необходимая на единицу массы испаренной воды); E – массовая скорость испарения воды; Δ – зависимость давления насыщенного пара от температуры; R_n – чистая облученность, внешний источник потока энергии; G – тепловой поток от грунта (обычно трудно измерить); ρ_a – плотность сухого воздуха; c_p – удельная теплоемкость воздуха; $(e_s - e_a)$ – дефицит давления паров в воздухе; g_a – совокупная поверхностная и аэродинамическая проводимость; γ – психрометрическая постоянная; g_s – устьичная проводимость; ET – объем испаренной воды; L_v – объемная скрытая теплота испарения.

Может быть вариант формул с использованием сопротивления вместо проводимости:

$$g_a = \frac{1}{r_a}; \quad (3)$$

$$g_s = \frac{1}{r_s} = \frac{1}{r_c}; \quad (3)$$

где r_c – сопротивление потоку от растительного покрова до определенного пограничного слоя.

Атмосферная проводимость g_a учитывает аэродинамические эффекты, такие как высота смещения нулевой плоскости и длина шероховатости поверхности. Устьичная проводимость g_s

учитывает влияние плотности листьев (индекс листовой поверхности), водного стресса и концентрации CO₂ в воздухе, то есть реакцию растения на внешние факторы. Существуют различные модели, связывающие устьичную проводимость с этими характеристиками растительности, например, модели Джарвиса, Джейкобса и др.

Датчики вентиляции. Воздухообмен является важной составляющей обеспечения роста растений. Он может участвовать в обеспечении влагой, температурных режимов и концентрации CO₂. При управлении вентиляцией используют датчики атмосферного давления, анемометры, флюгеры.

Датчики энергетических систем. Энергоэффективность является важнейшим аспектом современных производств. В закрытых системах выращивания теплиц используют измерители мощности или счетчики электроэнергии, датчики тока и напряжения, датчики положения клапанов и приводов.

Обсуждение. Проведенный анализ источников получения информации для управления эффективности ростом растений в теплицах показывает множество существующих технических решений с учетом стоимости и потребности в точности. На данном этапе происходит интенсивное развитие информационных систем контроля выращивания растений как в открытых, так и в закрытых системах типа теплиц, парников и т. д. Это обусловлено проблемой производства продовольствия, переходом под влиянием демографических и других проблем в сельском хозяйстве к активной автоматизации, развитием нанотехнологий и биосенсорики, возможностью внедрения машинного обучения и искусственного интеллекта в более широкие области применения.

Большое количество работ по данной теме посвящено интеграции отдельных датчиков в каналы передачи информации в облачные решения, стандарты беспроводных решений (например, Zigbee, LoRaWAN, NB-IoT и т. д. Идет дискуссия по использованию стационарных и подвижных систем. Разработано и уже опробовано на практике множество наносенсоров на базе химических и биологических подходов [53].

При проектировании датчиков часто приходится решать вопрос между стоимостью и долговечностью. Важной частью разработки является энергоэффективность, особенно при применении беспроводных систем.

За редким исключением, проблемой эффективного использования датчиков являются необходимость частой калибровки и высокая доля ручного труда.

Заключение. Использование датчиков преобразует сельское хозяйство, так как они обеспечивают более интеллектуальные, эффективные и устойчивые методы его ведения. От мониторинга окружающей среды и почвы до качества урожая и борьбы с вредителями датчики предоставляют данные, необходимые для принятия обоснованных решений и оптимизации ресурсов. По мере развития технологий сельскохозяйственные датчики будут все больше интегрироваться в сельскохозяйственную практику, делая точное земледелие более доступным, экономически эффективным и выгодным как для фермеров, так и для окружающей среды.

Список литературы

1. Multi-Sensor Monitoring, Intelligent Control, and Data Processing for Smart Greenhouse Environment Management / E. Vicamumakuba [et al.] // *Sensors*. 2025. Vol. 25 (19). P. 6134. DOI: 10.3390/s25196134
2. Эффективность работы комбинированных систем регулирования. I. Общий анализ // Д. А. Гринюк [и др.] // *Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика*. 2025. № 2 (296). С. 58–75. DOI: 10.52065/2520-6141-2025-296-9.
3. Sensor Systems for Greenhouse Microclimate Monitoring and Control: a Review / A. Bhujel [et al.] // *J. Biosyst. Eng.* 2020. Vol. 45. P. 341–361. DOI: 10.1007/s42853-020-00075-6.

4. Ahamed M. S., Guo H., Tanino K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses // *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 178. P. 9–33. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.
5. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment / K. P. Ferentinos [et al.] // *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 153. P. 70–81. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.005.
6. Nelson P. V. *Greenhouse operation and management*. New York: Prentice Hall. 2011. 607 p.
7. Liang-Ying, Guo Y. F., Zhao-Wei. Greenhouse environment monitoring system design based on WSN and GPRS networks // 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, IEEE-CYBER. Shenyang, 2015. P. 795–798. DOI: 10.1109/CYBER.2015.7288044.
8. A decision support system based on multisensor data fusion for sustainable greenhouse management / G. Aiello [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 172. P. 4057–4065. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.197.
9. Zafar M., Wei B. Comparison Analysis of Thermistor and RTD for Energy Transfer Station Application // 2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Seattle, WA, USA. 2023. P. 800–805. DOI: 10.1109/AIM46323.2023.10196150.
10. Huynh T. *Thermal sensors // Smart Sensor Systems*. Berlin: Springer, 2015. P. 5–42. <https://doi.org/10.1002/9780470866931.ch6>.
11. Perret J., Al-Ismaïli A., Sablani S. Humidification-dehumidification system in a greenhouse for sustainable crop production // *Sharm El-Sheikh*. 2005. P. 840–860.
12. A Method for measuring Greenhouse Cover Temperature using a Thermocouple / A. M. Abdel-Ghany [et al.] // *Biosystems Engineering*. 2006. Vol. 95 (1). P. 99–109. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2006.05.014.
13. Esen M., Yuksel T. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse // *Energy Build*. 2013. Vol. 65. P. 340–351.
14. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review / R. R. Shamshiri [et al.] // *International Agrophysics*. 2018. Vol. 32 (2). P. 287–302. DOI: 10.1515/intag-2017-0005.
15. Microclimate control in greenhouses / Y. Mukazhanov [et al.] // *International Multi-disciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017. Vol. 17 (62). P. 699–704. DOI: 10.5593/sgem2017/62/S27.089.
16. Fuzzy modeling vapor pressure deficit to monitoring microclimate in greenhouses / J. C. Ramos-Fernández [et al.] // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49 (16). P. 371–374. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.068.
17. Quan V. M., Sen Gupta G., Mukhopadhyay S. Review of sensors for greenhouse climate monitoring // 2011 IEEE Sensors Applications Symposium, San Antonio, TX, USA, 2011. P. 112–118. DOI: 10.1109/SAS.2011.5739816.
18. Yin T., Feng W., Li Z. Temperature and humidity wireless sensing and monitoring systems applied in greenhouse // *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology*. Harbin, China, 2011. P. 857–861. DOI: 10.1109/ICCSNT.2011.6182097.
19. A resistive sensor for humidity detection based on cellulose/polyaniline/ I. Ragazzinia // *RSC Adv*. 2022. Vol. 12. P. 28217–28226. DOI: 10.1039/D2RA03982F.
20. Zhang W., Ma H., Yang S. X. An Inexpensive, Stable, and Accurate Relative Humidity Measurement Method for Challenging Environments // *Sensors*. 2016. Vol. 16 (3). P. 398. DOI: 10.3390/s16030398.
21. Greenhouses for CO₂ sequestration from atmosphere / J. Bao [et al.] // *Carbon Resources Conversion*. 2018. Vol. 1 (2). P. 183–190. DOI: 10.1016/j.crcon.2018.08.002.
22. Design of ecological CO₂ enrichment system for greenhouse production using TBAB + CO₂ semi-clathrate hydrate / S. Takeya [et al.] // *Energies*. 2017. Vol. 10 (7). P. 1–11. DOI: 10.3390/en10070927.

23. Neethirajan S., Jayas D. S., Sadistap S. Carbon Dioxide (CO₂) Sensors for The Agri-food Industry – A Review // *Food and Bioprocess Technology*. 2009. Vol. 2 (2). P. 115–121. DOI: 10.1007/s11947-008-0154-y.
24. Regression analysis to estimate morphology parameters of pepper plant in a controlled greenhouse system / J. K. Basak [et al.] // *Journal of Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 44 (2). P. 57–68. DOI: 10.1007/s42853-019-00014-0.
25. Li T., Yang Q. Advantages of diffuse light for horticultural production and perspectives for further research // *Frontiers in Plant Science*. 2015. Vol. 6. P. 1–5. DOI: 10.3389/fpls.2015.00704.
26. Adding blue to red supplemental light increases biomass and yield of greenhouse-grown tomatoes, but only to an optimum / E. Kaiser [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 9. P. 1–11. DOI: 10.3389/fpls.2018.02002.
27. Wilson J. S. *Sensor Technology Handbook*. Burlington: Elsevier Inc., 2005. 691 p.
28. Bonachela S., González A. M., Fernández M. D. Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data // *Irrigation Science*. 2006. Vol. 25 (1). P. 53–62. DOI: 10.1007/s00271-006-0034-z.
29. Khotimah E. L., Putri R. A., Winata R. A. Precision Agriculture: Soil Moisture-based IoT Drip Irrigation System to Optimize Water Usage for Aglaonema in Greenhouse Environment // *International Journal of Horticultural Science and Technology*. 2025. Vol. 12 (4). P. 1219–1228. DOI: 10.22059/ijhst.2025.376832.852.
30. Измерение проводимости почвы / Д. А. Гринюк [и др.] // *Химическая технология и техника: материалы 89-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 3–18 февр. 2025 г. Минск: БГТУ, 2025. С. 327–329.*
31. Soil Moisture Sensing Technologies: Principles, Applications, and Challenges in Agriculture / D. Loconsole [et al.] // *Agronomy*. 2025. Vol. 15 (12). P. 2788. DOI: 10.3390/agronomy15122788.
32. Larson G. F. 1985. Electrical sensor for measuring moisture in landscape and agricultural soils. U. S. Patent 4 531 087. Date issued: 23 July.
33. Walczak A., Lipiński M., Janik G. Application of the TDR sensor and the parameters of injection irrigation for the estimation of soil evaporation intensity // *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 2309.
34. Smith J.B., Kean J.W. Long-Term Soil-Water Tension Measurements in Semiarid Environments: A Method for Automated Tensiometer Refilling // *Vadose Zone J.* 2018. Vol. 17. P. 1–5.
35. Strooboscher Z. J., Athelly A., Guzmán S. M. Assessing capacitance soil moisture sensor probes' ability to sense nitrogen, phosphorus, and potassium using volumetric ion content // *Front. Agron.* 2024. Vol. 6. P. 1346946.
36. Review of research progress on soil moisture sensor technology / L. M. Yu [et al.] // *Int. Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. Vol. 14. P. 32–42. DOI: 10.25165/ijabe.20211404.6404.
37. Datta S., Taghvaeian S. Soil water sensors for irrigation scheduling in the United States: A systematic review of literature // *Agricultural Water Management*. 2023. Vol. 278. P. 108148. DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108148.
38. Sobhy D. M., Anandhi A. Soil Nutrient Monitoring Technologies for Sustainable Agriculture: A Systematic Review // *Sustainability*. 2025. Vol. 17 (18). P. 8477. DOI: 10.3390/su17188477.
39. Espial: Electrochemical Soil pH Sensor for In Situ Real-Time Monitoring / M. A. Eldeeb [et al.] // *Micromachines*. 2023. Vol. 14 (12). P. 2188. DOI: 10.3390/mi14122188.
40. Automated agricultural greenhouse with PV energy using IoT-based monitoring system / N. Watjanatepin [et al.] // *Int. J. Re-new. Energy Res.* 2023. Vol. 13. P. 1581–1591.
41. A Review on Leaf Temperature Sensor: Measurement Methods and Application / Yu L. [et al.] // *Advances in Information and Communication Technology*. 2016. Vol. 478. DOI: 10.1007/978-3-319-48357-3.

42. Kerbler S. M., Wigge P. A. Temperature Sensing in Plants // *Annual Review Plant Biology*. 2023. Vol. 74. P. 341–366. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-102235>.
43. Бакаленко В. И., Дейнека Т. А., Бровенко А. Л. Контроль температуры листовых пластин растений с помощью сенсоров MLX 90614 // *Химическая технология и техника: материалы 85-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 29 янв. – 16 фев. 2024 г. Минск: БГТУ, 2024. С. 319–322.*
44. Chlorophyll fluorescence sensing for smart agriculture / L. Ma [et al.] // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2025. Vol. 394. P. 116930. DOI: 10.1016/j.sna.2025.116930.
45. Estimation of Chlorophyll Fluorescence at Different Scales: A Review / Z. Ni [et al.] // *Sensors*. Vol. 19 (13). P. 3000. DOI: 10.3390/s19133000.
46. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing / S. Huang [et al.] // *J. For. Res.* 2021. Vol. 32. P. 1–6. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1.
47. Greenhouse gas mitigation benefits and profitability of the GreenSeeker Handheld NDVI sensor: evidence from Mexico / D. S. Lapidus [et al.] // *Precision Agric.* 2022. Vol. 23. P. 2388–2406. DOI: 10.1007/s11119-022-09925-z.
48. PlantRing: A high-throughput wearable sensor system for decoding plant growth, water relations, and innovating irrigation / T. Sun [et al.] // *Plant Communications*. 2025. Vol. 6 (5). P. 101322. DOI: 10.1016/j.xplc.2025.101322.
49. Shahrajabian M. H., Sun W. A Review of Lysimeter Studies and Experiments by Considering Agricultural Production // *J. of Stress Physiology & Biochemistry*. 2024. Vol. 20. P. 114–132.
50. Dabrowska D., Wojciech R. A Review of Lysimeter Experiments Carried Out on Municipal Landfill Waste // *Toxics*. 2021. Vol. 9 (2). P. 26. DOI: 10.3390/toxics9020026.
51. Бакаленко В. И., Дейнека Т. А. Автоматический весовой потометр // *Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–31 дек. 2024 г. Минск: БГТУ, 2024. С. 16–17.*
52. Irrigation of Greenhouse Crops / G. Nikolaou [et al.] // *Horticulturae*. 2019. Vol. 5 (1). P. 7. DOI: 10.3390/horticulturae5010007.
53. A review on the application of advanced soil and plant sensors in the agriculture sector / Y. Faqir [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 226. P. 109385. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109385.

References

1. Bicamumakuba E., Md Nasim R., Hongbin J., Samsuzzaman K.-H. L., Sun-Ok C. Multi-Sensor Monitoring, Intelligent Control, and Data Processing for Smart Greenhouse Environment Management. *Sensors*, 2025, vol. 25 (19), p. 6134. DOI: 10.3390/s25196134.
2. Hryniuk D. A., Dubikovskaya E. V., Suhorukova I. G., Oлиферович N. M., Orobei I. O. Efficiency of feedforward and feedback control systems. I. General analysis. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2025, no. 2 (296), pp. 58–75. DOI: 10.52065/2520-6141-2025-296-9 (In Russian).
3. Bhujel A., Basak J. K., Khan F., Arulmozhi E., Jaihuni M., Sihalath T., Lee D., Park J., Kim H. T. Sensor Systems for Greenhouse Microclimate Monitoring and Control: A Review. *J. Biosyst. Eng.*, 2020, vol. 45, pp. 341–361. DOI: 10.1007/s42853-020-00075-6.
4. Ahamed M. S., Guo H., Tanino K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, 2019, vol. 178, pp. 9–33. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.
5. Ferentinos K. P., Katsoulas N., Tzounis A., Bartzanas T., Kittas C. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment. *Biosystems Engineering*, 2017, vol. 153, pp. 70–81. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.005.

6. Nelson P. V. Greenhouse operation and management. New York, Prentice Hall Publ., 2011. 607 p.
7. Liang-Ying, Guo Y. F., Zhao-Wei. Greenhouse environment monitoring system design based on WSN and GPRS networks. In *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, IEEE-CYBER 2015*. Shenyang, 2015, pp. 795–798. DOI: 10.1109/CYBER.2015.7288044.
8. Aiello G., Giovino I., Vallone M., Catania P., Argento A. A decision support system based on multisensor data fusion for sustainable greenhouse management. *J. of Cleaner Production*, 2018, vol. 172, pp. 4057–4065. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.197.
9. Zafar M., Wei B. Comparison Analysis of Thermistor and RTD for Energy Transfer Station Application. *2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Seattle, WA, USA, 2023, pp. 800–805. DOI: 10.1109/AIM46323.2023.10196150.
10. Huynh T. Thermal sensors. *Smart Sensor Systems*. Berlin, Springer Publ., 2015, pp. 5–42. DOI: 10.1002/9780470866931.ch6.
11. Perret J., Al-Ismaili A., Sablani S. Humidification-dehumidification system in a greenhouse for sustainable crop production. *Sharm El-Sheikh*, 2005, pp. 840–860.
12. Abdel-Ghany A.M., Ishigami Y., Goto E., Kozai T. A Method for measuring Greenhouse Cover Temperature using a Thermocouple. *Biosystems Engineering*, vol. 95 (1), 2006, pp. 99–109, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2006.05.014.
13. Esen M., Yuksel T. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy Build*, 2013, vol. 65, pp. 340–351.
14. Shamshiri R. R., Jones J. W., Thorp K. R., Ahmad D., Man H. C., Taheri S. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 2018, vol. 32 (2), pp. 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>.
15. Mukazhanov Y., Kamshat Z., Assel O., Shayhmetov N., Alimbaev C. Microclimate control in greenhouses. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2017, vol. 17 (62), pp. 699–704. DOI: 10.5593/sgem2017/62/S27.089.
16. Ramos-Fernández J. C., Balmat J. F., Márquez-Vera M. A., Lafont F., Pessel N., Espinoza-Quesada E. S. Fuzzy modeling vapor pressure deficit to monitoring microclimate in greenhouses. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49 (16), pp. 371–374. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.068.
17. Quan V. M., Gupta G. S., Mukhopadhyay S. Review of sensors for greenhouse climate monitoring. *2011 IEEE Sensors Applications Symposium, San Antonio, TX, USA*, 2011, pp. 112–118, DOI: 10.1109/SAS.2011.5739816.
18. Yin T., Feng W., Li Z. Temperature and humidity wireless sensing and monitoring systems applied in greenhouse. *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology*. Harbin, China, 2011, pp. 857–861. DOI: 10.1109/ICCSNT.2011.6182097.
19. Ragazzinia I., Castagnolia R., Gualandi I., Cassani M. C., Nanni D., Gambassia F., Scavettaabc E., Bernardiac E., Ballarin B. A resistive sensor for humidity detection based on cellulose/polyaniline. *RSC Adv.*, 2022, vol. 12, pp. 28217–28226. DOI: 10.1039/D2RA03982F.
20. Zhang W., Ma H., Yang S. X. An Inexpensive, Stable, and Accurate Relative Humidity Measurement Method for Challenging Environments. *Sensors*, 2016, vol. 16 (3), pp. 398. DOI:10.3390/s16030398.
21. Bao J., Lu W.-H., Zhao J., Bi X. T. Greenhouses for CO₂ sequestration from atmosphere. *Carbon Resources Conversion*, 2018, vol. 1 (2), pp. 183–190. DOI: 10.1016/j.crcon.2018.08.002.
22. Takeya S., Muromachi S., Maekawa T., Yamamoto Y., Mimachi H., Kinoshita T., Murayama T., Umeda H., Ahn D. H., Iwasaki Y., Hashimoto H., Yamaguchi T., Okaya K., Matsuo S. Design of ecological CO₂ enrichment system for greenhouse production using TBAB + CO₂ semi-clathrate hydrate. *Energies*, 2017, vol. 10 (7), pp. 1–11. DOI: 10.3390/en10070927.

23. Neethirajan S., Jayas D. S., Sadistap S. Carbon dioxide (CO₂) sensors for the agri-food industry – A review. *Food and Bioprocess Technology*, 2009, vol. 2 (2), pp. 115–121. DOI: 10.1007/s11947-008-0154-y.
24. Basak J. K., Qasim W., Okyere F. G., Khan F., Lee J., Park J., Kim H. T. Regression analysis to estimate morphology parameters of pepper plant in a controlled greenhouse system. *J. of Biosystems Engineering*, 2019, vol. 44 (2), pp. 57–68. DOI: 10.1007/s42853-019-00014-0.
25. Li T., Yang Q. Advantages of diffuse light for horticultural production and perspectives for further research. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, pp. 1–5. DOI: 10.3389/fpls.2015.00704.
26. Kaiser E., Ouzounis T., Giday H., Schipper R., Heuvelink E., Marcelis L. F. M. Adding blue to red supplemental light increases biomass and yield of greenhouse-grown tomatoes, but only to an optimum. *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 9, pp. 1–11. DOI: 10.3389/fpls.2018.02002.
27. Wilson J. S. *Sensor Technology Handbook*. Burlington, USA, Elsevier Inc. Publ., 2005. 691 p.
28. Bonachela S., González A. M., Fernández M. D. Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. *Irrigation Science*, 2006, vol. 25 (1), pp. 53–62. DOI: 10.1007/s00271-006-0034-z.
29. Khotimah E. L., Putri R. A., Winata R. A. Precision Agriculture: Soil Moisture-based IoT Drip Irrigation System to Optimize Water Usage for Aglaonema in Greenhouse Environment. *International J. of Horticultural Science and Technology*, 2025, vol. 12 (4), pp. 1219–1228. DOI: 10.22059/ijhst.2025.376832.852.
30. Hryniuk D. A., Bakalenko V. I., Bylina M. D., Zakhvey I. A. Measuring soil conductivity. *Khimicheskaya tekhnologiya i tekhnika: materialy 89-y nauch.-tekhn. konf. prof.-prepodovat. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunar. uchastiyem)* [Chemical Technology and Engineering: Proceedings of the 89th Scientific and Technical Conference of Faculty, Researchers and Postgraduates (with International Participation)]. Minsk, 2025, pp. 327–329 (In Russian).
31. Loconsole D., Elia M., Conversa G., De Lucia B., Cristiano G., Elia A. Soil Moisture Sensing Technologies: Principles, Applications, and Challenges in Agriculture. *Agronomy*, 2025, vol. 15 (12), pp. 2788. DOI: 10.3390/agronomy15122788.
32. Larson G. F. 1985. Electrical sensor for measuring moisture in landscape and agricultural soils. U. S. Patent 4 531 087. Date issued: 23 July.
33. Walczak A., Lipiński M., Janik, G. Application of the TDR sensor and the parameters of injection irrigation for the estimation of soil evaporation intensity. *Sensors*, 2021, vol. 21, pp. 2309.
34. Smith J. B., Kean J. W. Long-Term Soil-Water Tension Measurements in Semiarid Environments: A Method for Automated Tensiometer Refilling. *Vadose Zone J.*, 2018, vol. 17, pp. 1–5.
35. Strooboscher Z. J. Athelly A., Guzmán S. M. Assessing capacitance soil moisture sensor probes' ability to sense nitrogen, phosphorus, and potassium using volumetric ion content. *Front. Agron*, 2024, vol. 6, pp. 1346946.
36. Yu L. M., Gao W. L., Shamshiri R. R., Tao S, Ren Y. Z., Zhang Y. J., Su G. Review of research progress on soil moisture sensor technology. *International J. of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, vol. 14, pp. 32–42. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211404.6404.
37. Datta S., Taghvaeian S. Soil water sensors for irrigation scheduling in the United States: A systematic review of literature. *Agricultural Water Management*, 2023, vol. 278, pp. 108148, DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108148.
38. Sobhy D. M., Anandhi A. Soil Nutrient Monitoring Technologies for Sustainable Agriculture: A Systematic Review. *Sustainability*, 2025, vol. 17 (18), pp. 8477. DOI:10.3390/su17188477.
39. Eldeeb M. A., Vikram N. D., Anirban P., Sriram M., Shalini P. Espial: Electrochemical Soil pH Sensor for In Situ Real-Time Monitoring. *Micromachine*, 2023, vol. 14 (12), pp. 2188. DOI: 10.3390/mi14122188.
40. Watjanatepin N., Srisongkram W., Wongsuriya W., Sukthang K., Boonmee C., Kiatsookkanatorn P. Automated agricultural greenhouse with PV energy using IoT-based monitoring system. *Int. J. Re-new. Energy Res.*, 2023, vol. 13, pp. 1581–1591.

41. Yu L., Wang W., Zhang X., Zheng W. A Review on Leaf Temperature Sensor: Measurement Methods and Application. *Computer and Computing Technologies in Agriculture IX. CCTA 2015. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2016, vol. 478. DOI: 10.1007/978-3-319-48357-3.
42. Kerbler S. M., Wigge P. A. Temperature Sensing in Plants. *Annual Review Plant Biology*, 2023, vol. 74, pp. 341–366. DOI: 10.1146/annurev-arplant-102820-102235.
43. Bakalenko V. I., Deineka T. A., Brovenko A. L. Monitoring the temperature of plant leaf blades using MLX 90614 sensors. Kontrol' temperatury listovykh plastin rasteniy s pomoshch'yu sensorov MLX 90614. *Khimicheskaya tekhnologiya i tekhnika: materialy 88-y nauch.-tekhn. konf. prof.-prepodovat. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunar. uchastiyem)* [Chemical Technology and Engineering: Proceedings of the 88th Scientific and Technical Conference of Faculty, Researchers and Postgraduates (with International Participation)]. Minsk, 2024, pp. 319–322 (In Russian).
44. Ma L., Yin M., Chen X., Wan Z., Zhang R., Yang Z., Xiao X.-Q. Chlorophyll fluorescence sensing for smart agriculture. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2025, vol. 394, pp. 116930, DOI: 10.1016/j.sna.2025.116930.
45. Ni Z., Lu Q., Huo H., Zhang H. Estimation of Chlorophyll Fluorescence at Different Scales: A Review. *Sensors*, 2019, vol. 19 (13), pp. 3000. DOI: 10.3390/s19133000.
46. Huang S., Tang L., Hupy J. P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.*, 2021, vol. 32, pp. 1–6. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1.
47. Lapidus D. S., Salem M. E., Beach R. H., Zayed S., Ortiz-Monasterio I. Greenhouse gas mitigation benefits and profitability of the GreenSeeker Handheld NDVI sensor: evidence from Mexico. *Precision Agric.*, 2022, vol. 23, pp. 2388–2406. DOI: 10.1007/s11119-022-09925-z.
48. Sun T., Lu C., Shi Z., Zou M., Bi P., Xu X., Xie Q., Jiang R., Liu Y., Cheng R., Xu W., Wang H., Zhang Y., Xu P., PlantRing: A high-throughput wearable sensor system for decoding plant growth, water relations, and innovating irrigation. *Plant Communications*, 2025, vol. 6 (5), pp. 101322, DOI:10.1016/j.xplc.2025.101322.
49. Shahrajabian M. H., Sun W. A Review of Lysimeter Studies and Experiments by Considering Agricultural Production. *J. of Stress Physiology & Biochemistry*, 2024, vol. 20, pp. 114–132.
50. Dabrowska D., Wojciech R. A Review of Lysimeter Experiments Carried Out on Municipal Landfill Waste. *Toxics*, 2021, vol. 9 (2), pp. 26. DOI: 10.3390/toxics9020026.
51. Bakalenko V. I., Deyneka T. A. Automatic weigh counter (Lysimeter). *Avtomaticheskij kontrol' i avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Automatic control and automation of production processes: materials of the International scientific and technical conference, Minsk, December 26–31, 2024]. Minsk, 2024, pp. 16–17 (In Russian).
52. Nikolaou G., Neocleous D., Katsoulas N., Kittas C. Irrigation of Greenhouse Crops. *Horticulturae*, 2019, vol. 5 (1), pp. 7. DOI: 10.3390/horticulturae5010007.
53. Faqir Y., Qayoom A., Erasmus E., Schutte-Smith M., Visser H. G. A review on the application of advanced soil and plant sensors in the agriculture sector. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, vol. 226, pp. 109385. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109385.

Информация об авторах

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: hryniukda@gmail.com. SPIN-код 3877-2521. Scopus ID: 56725779200. ORCID: 0000-0003-4427-3943. ResearcherID: GLT-1372-2022.

Бакаленко Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный

технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vibakalenko.w@gmail.com. SPIN-код: 9246-6190. Scopus ID: 7801664083.

Дейнека Татьяна Александровна – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tdein@rambler.ru.

Олиферович Надежда Михайловна – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: oliferovich@belstu.by. SPIN-код: 6932-1738. Scopus ID: 56725765100. ORCID: 0009-0007-1324-0192.

Сухорукова Ирина Геннадьевна – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@rambler.ru. SPIN-код: 5395-8253. Scopus ID: 56725781000. ORCID: 0009-0000-9642-1077.

Information about the authors

Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniukda@gmail.com. SPIN code: 3877-2521. Scopus ID: 56725779200. ORCID: 0000-0003-4427-3943. ResearcherID: GLT-1372-2022.

Bakalenko Vladimir Ivanovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vibakalenko.w@gmail.com. SPIN code: 9246-6190. Scopus ID: 7801664083.

Deineka Tatiana Aleksandrovna – Senior Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tdein@rambler.ru.

Oliferovich Nadezhda Mikhaylovna – Senior Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oliferovich@belstu.by. SPIN code: 6932-1738. Scopus ID: 56725765100. ORCID: 0009-0007-1324-0192.

Suhorukova Irina Gennad'yevna – Senior Lecturer, the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru. SPIN code: 5395-8253. Scopus ID: 56725781000. ORCID: 0009-0000-9642-1077.

Поступила после доработки 15.12.2025