

Автоматизация процесса фертигации как цифровая технология сельскохозяйственных предприятий

М. С. Оборин^{1, 2, 3}✉, Р. Ф. Шайдулин³, М. Г. Субботина³

¹Пермский институт (филиал) Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова, Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

³Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, Пермь, Россия

✉E-mail: recreachin@rambler.ru

Аннотация. Внедрение цифровых технологий существенно меняет вектор развития сельскохозяйственной отрасли, способствуя повышению качества процессов и результатов. Сложность заключается в специфических объектах воздействия, живых организмах, представленных сельскохозяйственными растениями и животными. Особенностью производства является создание благоприятных условий для поддержания биологических процессов в зависимости от отраслевой специализации предприятия. Важным направлением технологической оптимизации производства является ресурсное обеспечение растениеводства. Сельскохозяйственные культуры отличаются требованиями к уходу и выращиванию, чувствительностью к составу питательных веществ, их дозировке. Перечисленные факторы усиливают риски ошибок и неточностей, связанных с обеспечением процесса питания и нарушением его технологий. Последствиями могут быть недостаточная продуктивность, убытки, снижение качества продукции. В связи с этим автоматизация данной функции является актуальным направлением развития цифровизации и автоматизации производства растениеводческих предприятий. **Цель исследования** – проектирование автоматизации процесса фертигации для тепличных комплексов. **Задачи исследования:** 1) рассмотреть фертигацию как технологию сельскохозяйственного предприятия в условиях цифровизации растениеводства; 2) описать технологическую схему автоматизации процесса фертигации, этапы технологии; 3) проектирование аппаратного решения процесса автоматизации фертигации. **Методы исследования:** процессный подход, анализ, описание, моделирование. **Научная новизна** заключается в разработке решения для автоматизации процесса фертигации. **Результаты.** В статье рассматриваются ключевые преимущества использования фертигации в сельском хозяйстве, а также предлагается решение для автоматизации этого процесса в тепличном комплексе Пермского государственного аграрно-технологического университета. В рамках работы представлена схема, описывающая технологию внедрения системы фертигации, а также подобрано необходимое оборудование для эффективного решения поставленной задачи.

Ключевые слова: автоматизация, полив, маточный раствор, ризосферная зона растения, теплица, ресурсосбережение, микроконтроллер, датчик

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта Министерства науки и образования РФ, номер государственной регистрации 1023051000003-9-4.1.1.

Для цитирования: Оборин М. С., Шайдулин Р. Ф., Субботина М. Г. Автоматизация процесса фертигации как цифровая технология сельскохозяйственных предприятий // Аграрный вестник Урала. 2025. Т. 25, № 09. С. 1467–1480. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-09-1467-1480>.

Дата поступления статьи: 10.01.2025, **дата рецензирования:** 07.05.2025, **дата принятия:** 31.07.2025.

Automation of the fertigation process as a digital technology of agricultural enterprises

M. S. Oborin^{1, 2, 3✉}, R. F. Shaydulin³, M. G. Subbotina³

¹ Perm Institute (branch) Plekhanov Russian University of Economics, Perm, Russia

² Perm State National Research University, Perm, Russia

³ Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov, Perm, Russia

✉ E-mail: recreachin@rambler.ru

ЭКОНОМИКА

Abstract. The introduction of digital technologies significantly changes the vector of development of the agricultural sector, contributing to an improvement in the quality of processes and results. The difficulty lies in the specific objects of impact, living organisms represented by agricultural plants and animals. A feature of production is the creation of favorable conditions for the maintenance of biological processes, depending on the industry specialization of the enterprise. An important area of technological optimization of production is the resource provision of crop production. Agricultural crops differ in their requirements for care and cultivation, sensitivity to the composition of nutrients, and their dosage. These factors increase the risks of errors and inaccuracies associated with the provision of nutrition and disruption of its technology. The consequences may be insufficient productivity, losses, and a decrease in product quality. In this regard, automation of this function is an urgent direction for the development of digitalization and automation of crop production. **The purpose** of the study is to design automation of the fertigation process for greenhouse complexes. **Research objectives:** 1) consider fertigation as a technology of an agricultural enterprise in the context of digitalization of crop production; 2) describe the technological scheme of automation of the fertigation process, the stages of technology; 3) design of a hardware solution for the automation of fertigation. **Research methods:** process approach, analysis, description, modeling. **The scientific novelty** lies in the development of a solution for automating the fertigation process. **Results.** The article discusses the key advantages of using fertigation in agriculture, and also suggests a solution for automating this process in the greenhouse complex of Perm State Agrarian and Technological University. As part of the work, a diagram is presented describing the technology of implementing the fertigation system, as well as the necessary equipment for the effective solution of the task.

Keywords: automation, irrigation, mother liquor, rhizosphere zone of the plant, greenhouse, resource conservation, microcontroller, sensor

Acknowledgements. The study was supported by a grant from the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, state registration number 1023051000003-9-4.1.1.

For citation: Oborin M. S., Shaydulin R. F., Subbotina M. G. Automation of the fertigation process as a digital technology of agricultural enterprises. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25 (09): 1467–1480. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-09-1467-1480>. (In Russ.)

Date of paper submission: 10.01.2025, **date of review:** 07.05.2025, **date of acceptance:** 31.07.2025.

Постановка проблемы (Introduction)

Сельское хозяйство как одна из ключевых отраслей человеческой деятельности, обеспечивающая растущую численность населения планеты не только питанием, но и сырьевыми источниками для многих производств, стремится к постоянному совершенствованию и оптимизации процессов для увеличения урожайности и качества продукции.

В глобально меняющихся климатических условиях специалистам растениеводческой отрасли все сложнее регулировать питание растений, особенно в открытом грунте, за счет внесения удобрений в сухом виде и даже листовых подкормок. Аномаль-

ные погодные явления все чаще приводят к значительным недоборам урожаев сельскохозяйственных культур [1–5].

При недостатке влаги снижается способность корневой системы растений поглощать элементы питания из грунта или почвы за счет массового потока, что приводит к нарушению физиологических процессов, снижению качества и уровня урожайности сельскохозяйственных культур, а следовательно, использованию не в полной мере потенциала сортов [6–11].

В этом контексте фертигация, или внесение удобрений в почву в растворенном виде в процес-

© Оборин М. С., Шайдулин Р. Ф., Субботина М. Г., 2025

се полива или орошения, выступает важным инструментом, позволяющим сельхозпроизводителям добиваться максимальной эффективности при использовании ресурсов.

Фертигация представляет собой неотъемлемый элемент современных технологий питания растений, где точность и рациональность играют решающую роль. Этот подход объединяет в себе две ключевые составляющие – подкормку растений и полив, обеспечивая целенаправленное внесение необходимых питательных веществ прямо в ризосферную зону в соответствии с фенологическими фазами конкретной культуры и ее сортовых особенностей. Основное преимущество фертигации заключается в том, что она предоставляет возможность растениям гораздо быстрее усваивать необходимые элементы, подаваемые уже в ионообменной форме, имитирующей условия почвенного раствора, минимизируя потери и обеспечивая оптимальные условия для их роста и развития [12–14].

С развитием современных технологий и внедрением инноваций в аграрный сектор фертигация переживает новый этап своего развития. Автоматизация этого процесса предоставляет сельхозпроизводителям уникальную возможность добиться более точного, эффективного и ресурсосберегающего использования удобрений, а также экономить трудовые ресурсы в условиях дефицита кадров [13–15].

Производители оборудования для фертигации, такие как Netafim, Rivulis Eurodrip (Израиль), Valmont Industries, Lindsay Corporation (США), Jain Irrigation Systems (Индия), Irritec (Италия) и другие, предлагают как отдельные компоненты (инжекторы, дозаторы), так и комплексные системы. Среди российских производителей можно отметить ГК «БИО-Комплекс», компанию «Полив-Сервис», Завод «Агрополимер» и другие, которые предлагают оборудование для фертигации, но в большинстве случаев имеют ограниченные возможности по автоматизации или поставляются с зарубежной автоматикой. Производители оборудования для фертигации предполагают использование готового маточного раствора или концентрированного раствора с удобрением. Предлагаемый авторами аппаратно-программный комплекс предполагает использование сухих водорастворимых удобрений для автоматической подготовки маточного раствора с заданными параметрами и подачу его в систему орошения.

Наиболее проблемная технологическая задача в системах фертигации – подготовка маточного раствора. Очередность смешивания минеральных удобрений в нужных пропорциях для создания маточного раствора требует внимания к деталям, чтобы обеспечить точное соотношение питательных элементов.

На основе анализа почвы и требований конкретных сельскохозяйственных культур определяется необходимый состав маточного раствора, выбираются подходящие водорастворимые минеральные удобрения, содержащие основные элементы питания (азот, фосфор и калий), а также кальций, магний и другие мезо- и микроэлементы, которые входят в состав комплексных солей с основными элементами. Рассчитывается необходимая дозировка каждого удобрения в соответствии с технологической рецептурой. Навески минеральных удобрений добавляются в воду поочередно, при этом важно обеспечивать интенсивное перемешивание для равномерного растворения [14].

После смешивания важно проверить и, если необходимо, скорректировать уровень pH маточного раствора. Рост и развитие растений в значительной степени зависят от множества факторов, среди которых уровень pH, который влияет на доступность питательных элементов для растений и общий уровень концентрации солей. Диапазон pH колеблется от 0 до 14, где значения меньше 7 считаются кислыми, 7 – нейтральным, а выше 7 – щелочными. Оптимальный уровень реакции среды и концентрации солей определяется биологическими особенностями сельскохозяйственных культур. После подготовки маточный раствор может быть использован в составе поливных вод. При этом важно следить за дозировкой и частотой применения для обеспечения оптимального питания растений и рационального использования удобрений.

Цель настоящей работы – разработка решения для автоматизации процесса фертигации.

Методология и методы исследования (Methods)

Технологическая схема автоматизации процесса фертигации состоит из следующих компонентов:

- блоки подготовки смеси;
- емкости для хранения концентрированных удобрений;
- автоматика (клапан, датчики расхода, датчик ЕС, блок управления);
- емкость для маточного раствора;
- насосы.

Процесс фертигации будет состоять из четырех подпроцессов:

1. Настройка параметров. Настраиваются следующие параметры:

- количество подаваемого удобрения (грамм за один оборот шнека);
- количество воды для подготовки концентрированного раствора с удобрением;
- уровень pH;
- время подачи раствора растениям для орошения (полива);
- время старта подачи маточного раствора;
- время подачи раствора.

2. Подготовка концентрированных растворов удобрений.
3. Подготовка маточного раствора.
4. Подача маточного раствора в систему орошения.

Результаты (Results)

Подготовка концентрированных растворов удобрений (рис. 1). Подпроцесс начинается с подачи воды в емкость для смешивания, при этом вода проходит предварительную очистку. Объем воды регулируется автоматикой (клапаном и датчиком расхода). При достижении необходимого уровня воды клапан перекрывается. Расчет объема определяется с помощью датчика расхода. Процесс регулируется микроконтроллером.

После подготовки емкости с водой на следующем шаге в приемный бункер засыпается удобрение в сухом виде, далее с помощью шнека оно подается в емкость для смешивания. Для приготовления питательных растворов используют только водорастворимые формы удобрений, при этом соблюдается разделение несовместимых соединений в разных баках во избежание выпадения осадков и перехода элементов питания в недоступные растениям формы.

На сегодняшний день в составе растений и готовой продукции насчитывают порядка 70 химических элементов, роль многих из них еще не изучена, однако они формируют урожай и его потребительские качества. Питательные растворы заменяют растениям корневое питание, имитируя условия естественной среды, поэтому они многокомпонентные, содержащие более 10 минеральных и

органических веществ. В рецептурах питательных растворов учитывают только основные макро- и мезоэлементы (азот, фосфор, калий, кальций, магний, сера, железо) и наиболее изученные микроэлементы (цинк, медь, кобальт, марганец, молибден, бор).

Как правило, формируют 2–3 бака, маркируя их А, В, С (рис. 2). В баке А готовят смеси солей азотной кислоты (селитры), такие как нитрат калия, нитрат кальция, нитрат магния, нитрат аммония. В баке В обычно замешивают фосфорсодержащие соли и сульфаты, а в баке С готовят растворы хелатных форм микроэлементов или средств защиты растений. Иногда соединения микроэлементов добавляют в бак В в зависимости от технологии, сырья и принятых на предприятии рецептур питательных растворов.

Данные по расходу воды и количество подаваемого сухого удобрения задаются в настройках системы. Объем подаваемого удобрения регулируется количеством оборотов шнека, в настройках указывается количество необходимого удобрения в граммах, а далее система преобразует его в количество оборотов для правильной дозировки. Эта зависимость хранится в базе данных для каждого удобрения. После добавления воды и удобрения выполняется смешивание с помощью соответствующего устройства – смешивающего механизма. Важно тщательно подготовить концентрированный раствор, смешать воду и добавленное удобрение, которое должно полностью раствориться. Данный процесс необходим для формирования базового комплекса питания растений, состоящего из набора минеральных удобрений. Растворы готовятся в отдельных емкостях.



Рис. 1. Технологическая схема автоматизации процесса подготовки концентрата минерального удобрения (разработано авторами)

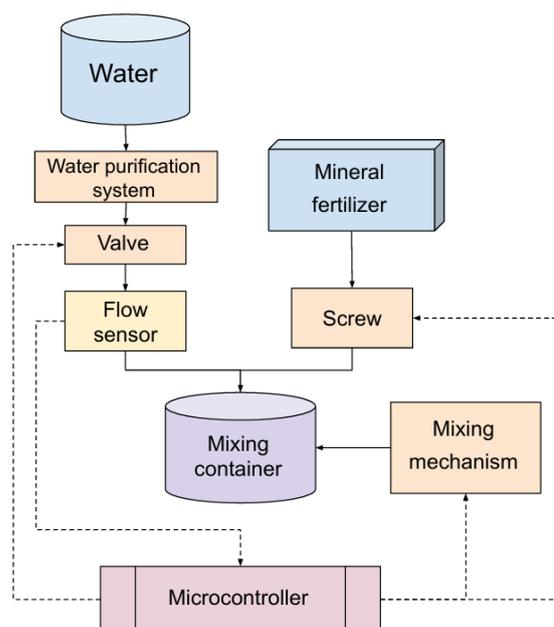


Fig. 1. Technological diagram for automating the process of preparing mineral fertilizer concentrate (developed by the authors)

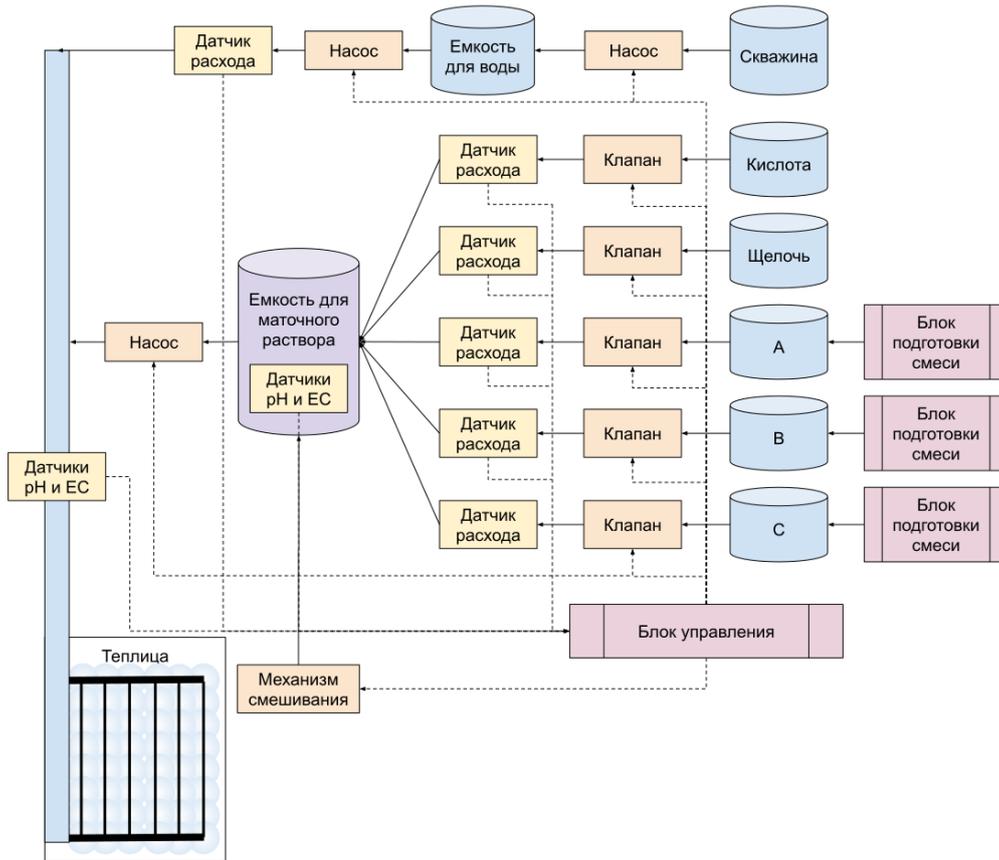


Рис. 2. Технологическая схема автоматизации процесса фертигации (разработано авторами)

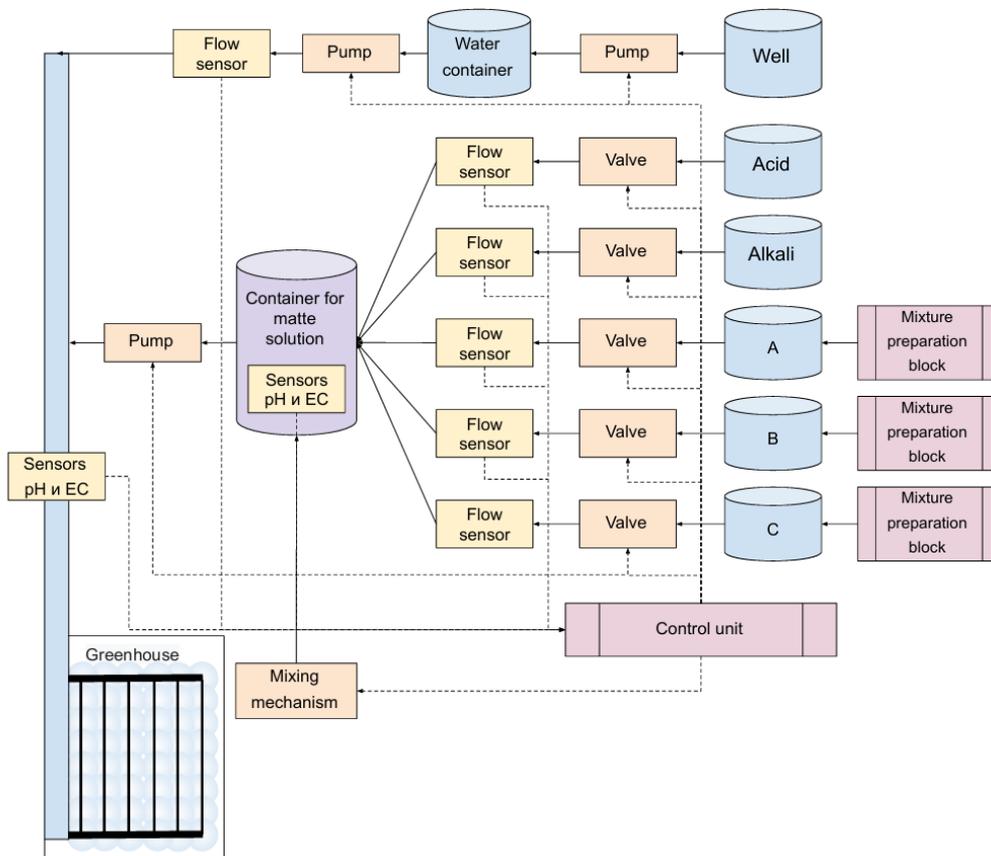


Fig. 2. Technological diagram of automation of the fertigation process (developed by the authors)

Подготовка маточного раствора. Маточный раствор готовится в зависимости от фазы вегетации растений из полученных концентратов в баках А, В, С. На первом этапе в емкость для маточного раствора подается вода для разбавления концентратов солей, и далее поочередно дозируются в нужном соотношении заранее приготовленные растворы удобрений. Маточный раствор должен быть достаточно разбавлен во избежание возникновения нежелательных химических реакций. Далее в емкости для маточного раствора проверяется уровень pH. Если pH отличается от заданного в настройках, то добавляется соответствующий регулятор – кислотный или щелочной. После добавления регулятора маточный раствор перемешивается, после снова проверяется уровень pH. Шаги повторяются, пока уровень pH не достигнет установленного значения.

Технологически целесообразно реализовать данный процесс с применением автоматизированных систем (рис. 2).

Подача маточного раствора в систему орошения. Заранее подготовленный маточный раствор подается не сразу. Сначала запускается система орошения. Далее, по истечении заданного в настройках времени, подается маточный раствор. Время подачи берется из настроек системы. По завершении времени подачи полив продолжается, для того чтобы прочистить трубы и форсунки от остатков раствора. Если этот процесс пропустить, то появятся отложения, которые приведут в некорректной работе системы полива и выведут ее из строя. Из этого вытекают несколько проблем: 1) отсутствие полива негативно скажется на растениях; 2) замена форсунок и труб системы орошения – достаточно затратный и трудоемкий процесс.

Во избежание этих проблем предлагается установить следующие настройки системы орошения: 10 минут на весь полив, 3 минуты подается чистая вода для подготовки системы, далее 3 минуты в воду добавляется маточный раствор, 4 минуты чистая вода для промывки системы орошения и доставки питательных веществ до ризосферной зоны растения.

Поскольку система орошения работает на основе распыления над растением и часть элементов питания будет поглощаться через листовую поверхность, для предотвращения негативных реакций вследствие длительного взаимодействия раствора с листьями важно смыть остатки питательных растворов с внешней первичной покровной ткани растений и доставить их непосредственно в субстрат. Таким образом, подпроцесс промывки решает две задачи.

Весь процесс управляется микроконтроллером (рис. 3).

При проектировании аппаратно-программного комплекса акцент сделан на гибкость управления,

точность дозирования, надежность коммуникации, масштабируемость.

Основные компоненты блока подготовки смеси:

1. Основной контроллер для управления всеми устройствами блока подготовки смеси (Arduino Nano).

Обоснование выбора:

- достаточная вычислительная мощность для управления устройствами и обработки данных с датчиков;

- низкое энергопотребление;

- наличие цифровых и аналоговых портов для подключения датчиков и исполнительных устройств;

- поддержка протоколов UART, I²C, SPI;

- доступность и низкая стоимость.

2. Конвертер TTL в RS485 на базе MAX485 для связи между Arduino и удаленными устройствами.

Обоснование выбора:

- RS485 обеспечивает устойчивую передачу данных на большие расстояния (до 1200 м);

- поддерживает многоточечные сети (можно подключить несколько устройств);

- защищает от помех благодаря дифференциальной передаче сигналов;

- MAX485 – популярная и надежная микросхема.

3. Преобразователь напряжения, понижающий DC/DC, используется для преобразования 24В в 5В для питания Arduino Nano.

Обоснование выбора:

- Arduino Nano требует стабильного напряжения 5В;

- DC/DC-преобразователь эффективно понижает напряжение с минимальными потерями;

- защищает контроллер от перепадов напряжения.

4. Моторизованный шнек используется для точного дозирования сухого удобрения в емкость для смешивания.

Обоснование выбора:

- высокая точность дозирования (зависит от шага шнека и управления ШИМ);

- возможность работы с различными типами сыпучих материалов.

5. Механизм смешивания (верхнеприводная погружная мешалка) для равномерного смешивания воды и удобрений.

Обоснование выбора:

- обеспечивает быстрое и качественное перемешивание;

- простота установки и обслуживания;

- возможность регулировки скорости вращения.

6. Блок из MOSFET-модуля и электромагнитного промежуточного реле обеспечивают управление питанием электромагнитного клапана от логического сигнала Raspberry Pi.

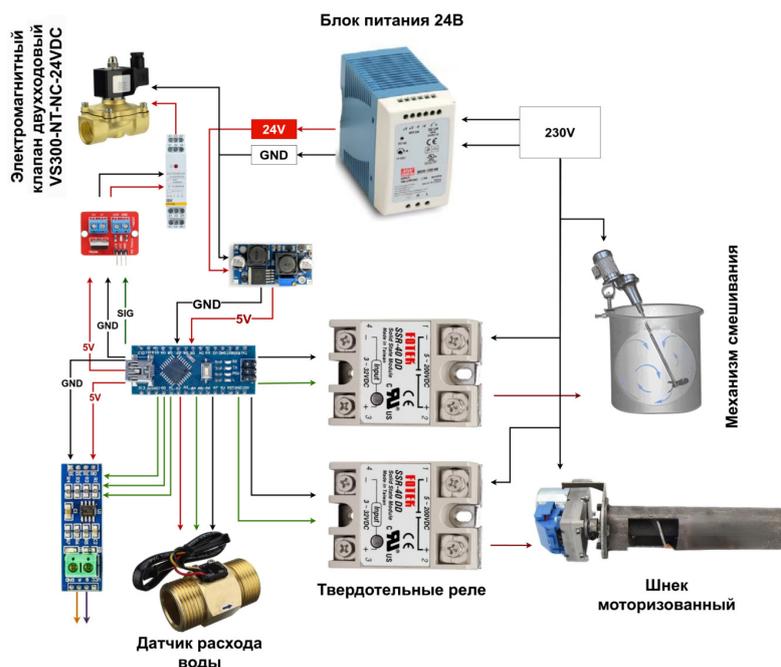


Рис. 3. Схема блока подготовки смеси (разработано авторами)

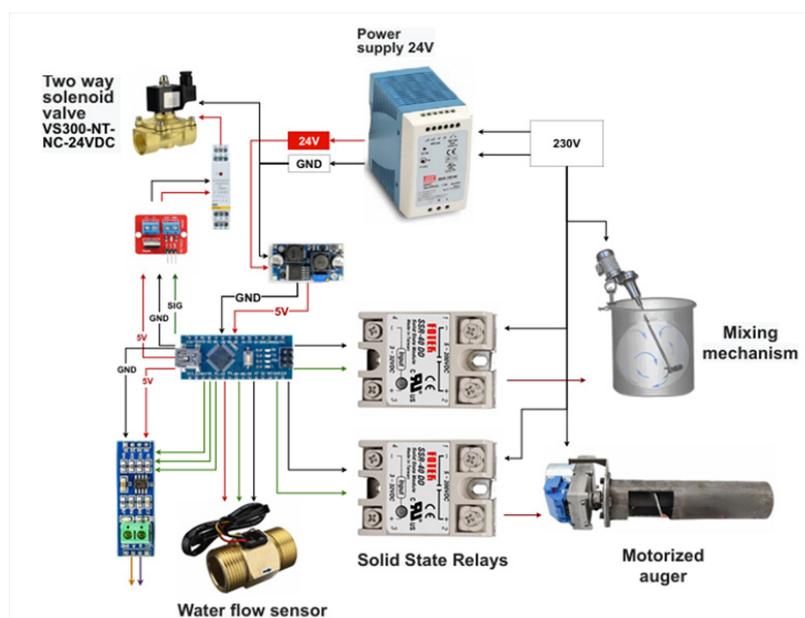


Fig. 3. Diagram of the mixture preparation unit (developed by the authors)

Обоснование выбора:

- MOSFET обеспечивает быстрое переключение высоких токов;
- реле обеспечивает гальваническую развязку между управляющей цепью (5В) и силовой (24В);
- защита контроллера от индуктивных нагрузок.

7. Электромагнитный клапан обеспечивает подачу воды к компонентам системы.

Обоснование выбора:

- быстрое срабатывание (мгновенное открытие/закрытие);
- надежность и долгий срок службы;
- совместимость с управлением через реле/MOSFET.

8. Твердотельное реле ЕКФ однофазное RTP-40-DA используется для управления шнеком и механизмом смешивания.

Обоснование выбора:

- высокая скорость переключения;
- долговечность (нет механического износа).

9. Многоструйный счетчик «Пульсар-М» с импульсным выходом обеспечивает контроль расхода воды.

Обоснование выбора:

- импульсный выход совместим с Arduino (подсчет импульсов для измерения объема);
- высокая точность ($\pm 1...2\%$);
- надежность и устойчивость к загрязнениям воды.

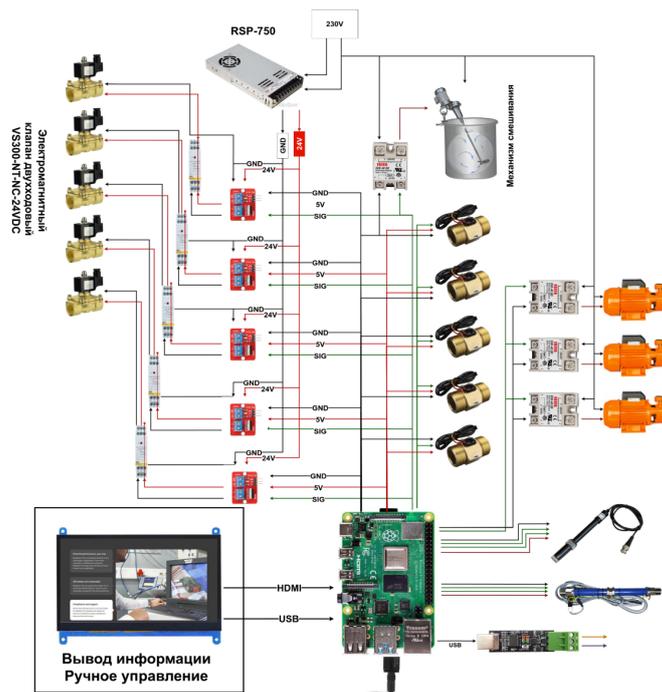


Рис. 4. Обобщенная схема комплекса (разработано авторами)

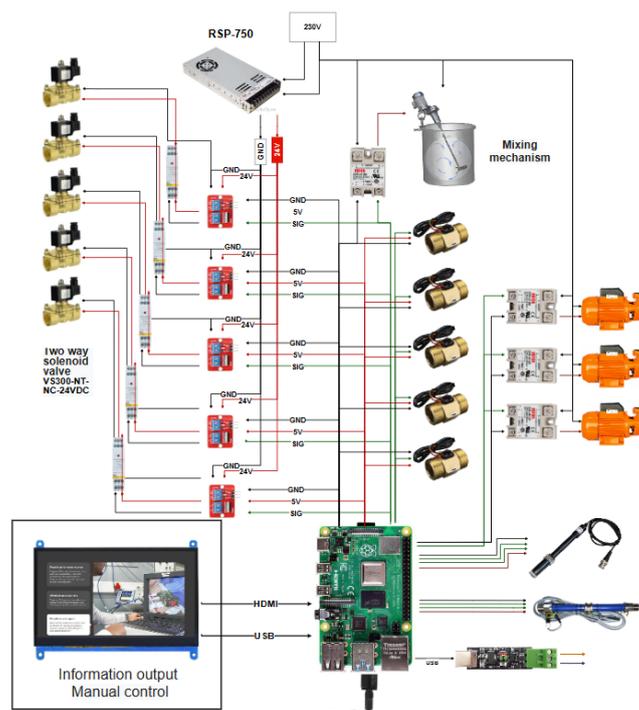


Fig. 4. Generalized diagram of the complex (developed by the authors)

10. Источник питания на 24В.

Обоснование выбора:

- 24В – стандартное напряжение для промышленной автоматизации;
- достаточная мощность для питания всех компонентов;
- безопасность (низковольтное питание снижает риски поражения током).

Предлагается следующее аппаратное решение процесса автоматизации фертигации (общая схема блока управления представлена на рис. 4).

Основные компоненты аппаратного комплекса:

1. Одноплатный компьютер Raspberry Pi 4 Model B с 4 Гб памяти обеспечивает автоматическое управление системой.

Обоснование выбора:

- достаточная производительность для управления, обработки данных с датчиков и взаимодействия с периферией;
- поддержка языков программирования (Python, C++, Node-RED и других), что упрощает разработку ПО;

– наличие USB, Ethernet, Wi-Fi и Bluetooth для интеграции в локальную сеть и удаленного управления;

– возможность работы с графическим интерфейсом (сенсорный экран);

– низкое энергопотребление при высокой вычислительной мощности.

2. Сенсорный экран (10") предоставляет интерфейс для отображения текущих параметров работы системы, а также используется для ручного управления и настройки системы.

Обоснование выбора:

– удобный интерфейс для оператора;

– возможность отображения всех необходимых данных;

– сенсорное управление упрощает настройку и контроль системы;

– совместимость с Raspberry Pi (HDMI/USB-интерфейс).

3. Преобразователь USB в RS485 используется для обмена данными между системой управления и Arduino Nano.

4. Потенциометрический датчик контроля реакции среды раствора (рН).

Обоснование выбора:

– высокая точность ($\pm 0,1$ рН);

– совместимость с аналоговым или цифровым (I²C/RS485) интерфейсом;

– долговечность и стабильность измерений.

5. Кондуктометрический датчик контроля общей концентрации солей ЕС.

Обоснование выбора:

– позволяет контролировать уровень питательных веществ в растворе;

– точность (± 2 % от показаний);

– коррозионностойкие электроды для долгой работы в агрессивных средах;

– возможность калибровки под разные типы удобрений.

6. Механизм смешивания (верхнеприводная погружная мешалка).

7. Блок из MOSFET-модуля и электромагнитного промежуточного реле обеспечивает управление питанием электромагнитного клапана от логического сигнала Raspberry Pi.

8. Электромагнитный клапан обеспечивает подачу воды к компонентам системы.

9. Твердотельное реле EKF однофазное RTP-40-DA используется для управления насосами и механизмом смешивания.

10. Многоструйный счетчик «Пульсар-М» с импульсным выходом обеспечивает контроль расхода воды.

11. Источник питания на 24В.

Для корректной работы системы необходимо считывать множество параметров с различных устройств. Для реализации этого процесса возмож-

ны различные варианты передачи данных. Оборудование будет располагаться на относительно небольшом расстоянии. Наиболее предпочтительным и надежным вариантом предлагается использование проводной схемы подключения.

Для работы датчиков используется питание, которое обеспечивается кабельным соединением. Оборудование (рис. 3) смонтировано в герметичном шкафу, который расположен рядом с емкостью для подготовки маточного раствора. Оборудование, представленное на рис. 4, собрано в коммутационном шкафу, расположенном рядом с блоком управления запуска основного насоса. Между собой они соединены кабелем витая пара, который обеспечивает их стабильную связь. В шкафу, который расположен около основного насоса, установлены датчики рН и ЕС, они подключены проводным способом, так как от них требуются постоянная связь и стабильное подключение, что не может обеспечить беспроводная связь.

В целях оптимизации оборудование необходимо разместить компактно для рационального использования материалов и предотвращения потери сигналов.

Бизнес-логика процесса автоматизации будет исполнена с помощью языка программирования C++. Это позволит реализовать предлагаемую технологию.

Для взаимодействия с пользователем предлагается использовать веб-приложение, которое будет разработано авторами. Это один из наиболее современных и востребованных механизмов взаимодействия. С помощью веб-приложения пользователь системы сможет устанавливать настройки и отслеживать ход выполнения процесса фертигации.

Применение веб-технологий подразумевает использование клиент-серверной архитектуры. На стороне сервера будут реализованы алгоритмы выполнения процессов. На клиентской части отображение хода выполнения процессов. Посредством пользовательского интерфейса (клиентская часть), помимо отображения, будет организован сбор необходимых параметров для системы. Весь процесс взаимодействия предлагается организовать как облачный сервис. Данное предложение отличается удобством и доступностью. Оператору нет необходимости постоянно находиться в тепличном комплексе: настройка, мониторинг и корректировка системы доступна удаленно. При таком подходе немаловажной является информационная безопасность. Как правило, технология производства культур в конкретных условиях – результат длительного подбора параметров и рецептов, она становится коммерческой тайной предприятий и в ряде случаев результатом интеллектуальной деятельности с защитой патентом. Предлагается следующее решение: организация защищенной сети для предотвра-

щения несанкционированного доступа; механизм входа пользователей с применением двухфакторной авторизации.

Процесс фертигации сложный, так как обладает следующими признаками: большое количество взаимосвязанных элементов, которые взаимодействуют между собой; процесс декомпозирован и состоит из нескольких взаимосвязанных между собой подпроцессов (подсистем). При управлении сложными системами важно оперативно получать всю необходимую информацию для принятия управленческих решений. Веб-приложение позволит решить эту задачу.

В качестве устройства для отслеживания состояния растений в течение вегетации рекомендуется использование стационарных или спектральных камер для оценки содержания хлорофилла в листьях, обеспеченности растений элементами питания для

оперативной корректировки питательных растворов. Снятые спектры также можно фиксировать и отслеживать с помощью приложения, по результатам анализа удаленно менять задачи дозирующих устройств для смешивания маточного раствора.

Для оперативности информирования пользователя о ходе выполнения процесса или сбоях предполагается подключить систему оповещения, которая будет отправлять сообщения через актуальные мессенджеры или по электронной почте. На текущий момент времени почти все пользуются мобильными устройствами, которые позволяют оперативно получать информацию об изменениях во внешней среде. Специалист, получив сообщение о сбоях, может оперативно внести корректировку в работу системы и при необходимости остановить процесс фертигации.



Рис. 5. Процесс фертигации в системе цифрового управления производственными процессами теплицы сельскохозяйственного предприятия (разработано авторами)

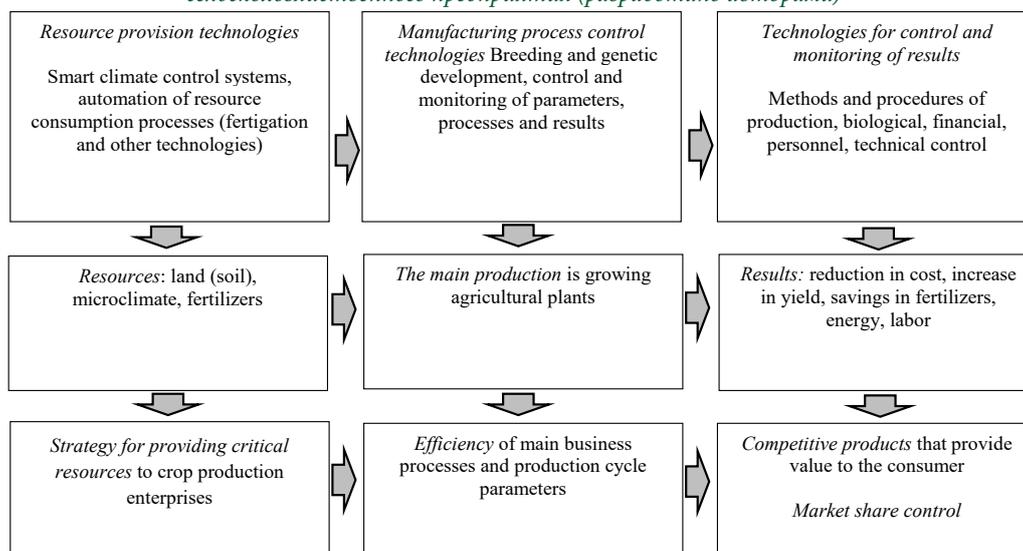


Fig. 5. Fertigation process in a digital control system for production processes in a greenhouse of an agricultural enterprise (developed by the authors)

Экономический эффект от автоматизации процесса фертигации теплицы на 100 м² для сельскохозяйственных предприятий

Затраты	Ручная фертигация	Автоматизация фертигации	Эффект	Сумма
Вода	6 м ³ воды / 10 м ² посевной площади	3 м ³ воды / 10 м ² посевной площади	3 м ³ воды / 10 м ² посевной площади	30 м ³ воды * 2,73 руб. * 10 поливов = 819 руб.
Удобрения	10 кг / 1 м ² посевной площади	5 кг / 1 м ² посевной площади	500 кг удобрений	500 * 200 = 10 000 руб.
Труд	3 рабочих, 1 инженер	1 рабочий, 1 специалист по обслуживанию комплекса	2 рабочих места, сокращение времен труда специалиста	50 000 руб.
Всего планируемый эффект за месяц				60 819 руб.

*Table 1
The economic effect of automating the fertigation process of a greenhouse of 100 m² for agricultural enterprises*

Costs	Manual fertigation	Automation of fertigation	Effect	Amount
Water	6 m ³ of water / 10 m ² of acreage	3 m ³ of water / 10 m ² of acreage	3 m ³ of water / 10 m ² of acreage	30 m ³ of water * 2.73 rubles * 10 irrigations = 819 rubles
Fertilizers	10 kg / 1 m ² of acreage	5 kg / 1 m ² of acreage	500 kg of fertilizers	500 * 200 = 10 000 rubles
Labor	3 workers, 1 engineer	1 worker, 1 complex maintenance specialist	2 workplaces, reduction of specialist labor time	50 000 rubles
The total planned effect for the month				60 819 rubles

Таким образом, представленная технология направлена на оптимизацию процессов выращивания сельскохозяйственных растений в условиях теплицы. Можно представить место процесса фертигации в системе цифрового управления производственными процессами (рис. 5). Его роль состоит в ресурсном обеспечении выращивания сельскохозяйственных растений, оптимизации их питания в соответствии с сортовыми особенностями и биологическим циклом получения готовой продукции.

Система фертигации в теплицах выполняет важные функции оптимизации расходования ресурсов, обеспечивает соблюдение оптимального дозирования, необходимого для выращивания растений с получением продукции соответствующей заданным нормативным параметрам.

Это способствует достижению трех ключевых целей сельскохозяйственных предприятий:

1. Снижение себестоимости продукции, ее контроль в условиях постоянного роста цен на удобрения, энергию и оплату труда специалистов. В текущих условиях данное направление является востребованным, поскольку улучшение рентабельности влияет на итоговые результаты деятельности сельскохозяйственных организаций.

2. Повышение прибыли и контроле доли рынка. Предприятия, которые могут поставлять на рынки продукцию, доступную по цене, становятся более

конкурентоспособными, могут обеспечивать основу лояльности постоянных клиентов и поддерживать потенциальный спрос.

3. Предотвращение загрязнения грунтовых вод, препятствование засолению и переуплотнения почв, снижение эмиссии парниковых газов.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

В данной работе предложено решение технологической задачи по подготовке маточного раствора и подаче его в систему орошения для доставки питательных веществ до прикорневой зоны растения. Применение аппаратно-программного комплекса по автоматизации процесса фертигации позволит более рационально использовать ресурсы, решить проблему образования отложений на форсунках поливной системы. Разработанная технология обеспечивает полное раскрытие преимуществ фертигации с возможностью регулирования состава питательных элементов в растворе в разные фазы вегетации.

Значимым эффектом является экономия ресурсов, включая удобрения и затраты на оплату труда, в результате которых снижается себестоимость и повышается урожайность (таблица 1).

В расчетах взяты средние цены на удобрения, которые будут корректироваться в зависимости от типов почвы и выращиваемых культур. Соответственно, если теплиц будет несколько, данный

эффект будет значительно выше. При этом оплата труда специалиста комплекса также повлияет на количество работающих и сокращение оплаты, так как датчики позволяют оценивать состояние почвы в нескольких теплицах, что сокращает и оптимизирует работу по мониторингу и контролю посевных площадей. Соответственно, внедрение технологии будет наиболее выгодным для крупных предприятий агробизнеса. Даже при наличии одной теплицы экономия ресурсов составит свыше 600 тыс. руб. ежегодно.

Предложенное решение ориентировано на сельскохозяйственные производственные кооперации, фермерские хозяйства и другие формы малого предпринимательства в АПК и имеет возможности потенциального масштабирования как в защищенном, так и в открытом грунте.

В качестве направления дальнейшего совершенствования аппаратно-программного комплекса авторы предлагают внедрение датчика для определения ионов кальция и дополнение его спектральной камерой, что позволит повысить точность контроля состава маточного раствора и оперативность принятия решений по корректировке питания.

Библиографический список

1. Шайдулин Р. Ф., Мелехин М. И., Иванова В. А. [и др.] Автоматизация системы полива и проветривания для сельскохозяйственных культур // Научный аспект. 2023. Т. 2, № 12. С. 174–186.
2. Марков А. Из-за засухи пермские аграрии потеряли до половины урожая [Электронный ресурс]. URL: <https://ura.news/news/1052668844> (дата обращения: 19.11.2024).
3. Распоряжение Губернатора Пермского края от 28.07.2023 № 206-р «О признании чрезвычайной ситуации на территории Пермского края в связи с опасными природными явлениями» [Электронный ресурс]. URL: <https://agro.permkrai.ru/dokumenty/297549> (дата обращения: 19.11.2024).
4. Шайтанов О. Л., Низамов Р. М., Захарова Е. И. Оценка влияния глобального потепления на климат Татарстана // Зернобобовые и крупяные культуры. 2021. № 4 (40). С. 102–112. DOI: 10.24412/2309-348X-2021-4-102-112.
5. Романенков В. А., Павлова В. Н., Беличенко М. В. Агротехнологические возможности управления климатическими рисками при возделывании зерновых культур // Агрохимия. 2022. № 12. С. 19–30. DOI: 10.31857/S0002188122120110.
6. Никитишен В. И., Демидов В. В. Почвенно-агрохимические и экологические основы повышения продуктивности агроценозов. Пушино: Отдел научно-технической информации Научного центра биологических исследований АН СССР, 1990. 135 с.
7. Медведев И. Ф., Сиренко Ф. В., Ефимова В. И., Деревягин С. С. Динамика развития корневой системы яровой пшеницы в условиях активного проявления засух и различной обеспеченности элементами питания растений // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 8. С. 6–10.
8. Киселева Т. С., Рзаева В. В. Запасы доступной влаги при возделывании нута в северной лесостепи Тюменской области // Аграрный вестник Урала. 2019. № 9 (188). С. 2–7. DOI: 10.32417/article_5dadfe3aea53.15283418.
9. Сазонова Т. А., Придача В. Б. Влияние почвенных условий среднетаежного сосняка лишайникового на рост и показатели минерального и водного режима сосны обыкновенной // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2020. № 11. С. 113–123. DOI: 10.17076/eb1316.
10. Ахаткулов Б. Куруқ ва юкори хароратли иқлим шароитларига мослашадиган ўсимликларнинг янги навларини яратиш ҳамда етиштириш истикболлари // Iqtisodiy Taraqqiyot va Tahlil. 2024. Jild 2, № 3. С. 216–221.
11. Блохин В. И., Никифорова И. Ю., Ганиева И. С. [и др.] Засухоустойчивость сортов ярового ячменя в условиях Предкамья Республики Татарстан // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3 (71). С. 4–11. DOI: 10.48012/1817-5457_2022_3_4-11.
12. Карпова О. В. Фертигация как инструмент интенсивной технологии // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: Материалы X Международной научно-практической конференции. Саратов, 2023. С. 49–52.
13. Калинин В. П., Глинушкин А. П., Соколов М. С. [и др.] Природоподобные технологии биогеосистемотехники // Агрохимия. 2020. № 2. С. 61–68. DOI: 10.31857/S0002188120020052.
14. Федосов А. Ю., Меньших А. М. Управление фертигацией овощных культур // Вестник Донского государственного аграрного университета. 2022. № 4 (46). С. 34–53.
15. Фесенко Э. О. Автоматизация как составляющий компонент ресурсосберегающих технологий в АПК // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие». Санкт-Петербург, 2020. С. 99–101.

Об авторах:

Матвей Сергеевич Оборин, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономического анализа и статистики, Пермский институт (филиал) Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова, Пермь, Россия; профессор кафедры мировой и региональной экономики, экономической теории, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия; профессор кафедры менеджмента, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, Пермь, Россия; ORCID 0000-0002-4281-8615, AuthorID 747778.

E-mail: recreachin@rambler.ru

Роман Фаритович Шайдулин, кандидат экономических наук, проректор по цифровой трансформации, доцент кафедры информационных систем и телекоммуникаций, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, Пермь, Россия;

ORCID 0009-0007-5307-204X, AuthorID 674257. *E-mail: roman@pgatu.ru*

Мария Георгиевна Субботина, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрохимии и почвоведения, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, Пермь, Россия; ORCID 0000-0001-6373-4413, AuthorID 690458,

E-mail: subbotina@mail.ru

References

1. Shaydulín R. F., Melekhin M. I., Ivanova V. A., et al. Automation of irrigation and ventilation systems for agricultural crops. *Scientific Aspect*. 2023; 2 (12) : 174–186. (In Russ.)

2. Markov A. Perm farmers lost up to half of their crops due to drought [Internet] [cited 2024 Nov 19]. Available from: <https://ura.news/news/1052668844>. (In Russ.)

3. Decree of the Governor of the Perm Territory dated 07/28/2023 No. 206-р “On the recognition of an emergency situation in the territory of the Perm Territory in connection with dangerous natural phenomena” [Internet] [cited 2024 Nov 19]. Available from: <https://agro.permkrai.ru/dokumenty/297549>. (In Russ.)

4. Shaytanov O. L., Nizamov R. M., Zakharova E. I. Assessment of the impact of global warming on the climate of Tatarstan. *Legumes and Cereals*. 2021; 4 (40): 102–112. DOI: 10.24412/2309-348X-2021-4-102-112. (In Russ.)

5. Romanenkov V. A., Pavlova V. N., Belichenko M. V. Agrotechnological possibilities of climate risk management in the cultivation of grain crops. *Agrochemistry*. 2022; 12: 19–30. DOI: 10.31857/S0002188122120110. (In Russ.)

6. Nikitishen V. I., Demidov V. V. *Soil-agrochemical and ecological foundations of increasing productivity of agroecosystems*. Pushchino: Department of Scientific and Technical Information of the Scientific Center for Biological Research of the USSR Academy of Sciences, 1990. 135 p. (In Russ.)

7. Medvedev I. F., Sirenko F. V., Efimova V. I., Derevyagin S. S. Dynamics of development of the root system of spring wheat in conditions of active manifestation of droughts and various availability of plant nutrients. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2013; 8: 6–10. (In Russ.)

8. Kiseleva T. S., Rzaeva V. V. Reserves of available moisture during chickpea cultivation in the northern forest-steppe of the Tyumen region. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2019; 9 (188): 2–7. DOI: 10.32417/article_5dadfe3aeaba53.15283418. (In Russ.)

9. Sazonova T. A., Pridacha V. B. The influence of soil conditions of the Middle taiga lichen pine on the growth and indicators of the mineral and water regime of the common pine. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020; 11: 113–123. DOI: 10.17076/eb1316. (In Russ.)

10. Akhatkulov B. Prospects for the creation and cultivation of new plant varieties adapted to dry and high-temperature climatic conditions. *Iqtisodiy Taraqqiyot va Tahlil*. 2024; 3: 216–221. (In Uzbek.)

11. Blokhin V. I., Nikiforova I. Yu., Ganieva I. S., et al. Drought tolerance of spring barley varieties in the conditions of the Amur region of the Republic of Tatarstan. *Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy*. 2022; 3 (71): 4–11. DOI: 10.48012/1817-5457_2022_3_4-11. (In Russ.)

12. Karpova O. V. Fertigation as an instrument of intensive technology. *Innovations in environmental management and protection in emergency situations: proceedings of the X International Scientific and Practical Conference*. Saratov, 2023. Pp. 49–52. (In Russ.)

13. Kalinichenko V. P., Glinushkin A. P., Sokolov M. S., et al. Nature-like technologies of biogeosystem engineering. *Agrochemistry*. 2020; 2: 61–68. DOI: 10.31857/S0002188120020052. (In Russ.)

14. Fedosov A. Yu., Menshikh A. M. Management of fertigation of vegetable crops. *Bulletin of the Don State Agrarian University*. 2022; 4 (46): 34–53. (In Russ.)

15. Fesenko E. O. Automation as an integral component of resource-saving technologies in agriculture. *Collection of selected articles based on the materials of scientific conferences of the State Research Institute "National Development"*. Saint Petersburg, 2020. Pp. 99–101. (In Russ.)

Authors' information:

Matvey S. Oborin, doctor of economic sciences, professor, professor of the department of economic analysis and statistics, Perm Institute (branch) Plekhanov Russian University of Economics, Perm, Russia; professor of the department of world and regional economics, economic theory, Perm State National Research University, Perm, Russia; professor of the department of management, Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov, Perm, Russia; ORCID 0000-0002-4281-8615, AuthorID 747778.

E-mail: recreachin@rambler.ru

Roman F. Shaydulín, candidate of economic sciences, vice-rector for digital transformation, associate professor of the department of information systems and telecommunications, Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov, Perm, Russia; ORCID 0009-0007-5307-204X, AuthorID 674257. *E-mail: roman@pgatu.ru*

Mariya G. Subbotina, candidate of agricultural sciences, associate professor of the department of agrochemistry and soil science, Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov, Perm, Russia; ORCID 0000-0001-6373-4413, AuthorID 690458. *E-mail: subbotina@mail.ru*