ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТЕНИЙ ВЫРАЩИВАЕМЫХ В ГИДРОПОННЫХ СИСТЕМАХ

*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация*

*Лаборатория интеллектуальных роботизированных средств и климатического оборудования для закрытых экосистем*

***Аннотация***

*В обзоре представлены результаты научных исследований в 2021-2024 годах по применению активированной воды в гидропонных системах.*

*В обзоре рассмотрены исследования обладающие научной новизной по влиянию активированной воды на продуктивность, синергетический эффект терморегуляции фотосинтеза.*

*Рассмотрен результат разработки датчиков, основанных на прямом контроле сокодвижения и ксилемного потока с возможностью их применения в процессоре цифрового управления продукционными процессами.*

*Выявлен механизме воздействия применения активированной воды на продуктивность растений через рост концентрации ионов Н⁺.*

*Установлено, что использование активированной воды при приготовлении питательных растворов, требуемая концентрация минералов может быть получена при использовании меньшего количества удобрений, что приведет к его экономии в среднем до 25%.*

*Получен вывод об увеличении интенсивности выноса макроэлементов NPK, то есть об их более эффективном усвоении растениями, при использовании в питательных растворах активированной воды.*

*Показано, что при некотором значении параметра активации rH₂ = 31 концентрация синтеза глюкозы имеет наибольшее увеличение Сg = 3,51%. При этом Сg и rH₂ имеют довольно тесную связь, коэффициент корреляции между которыми, равен 0,73.*

*Экспериментально подтверждена эффективность применения азотистых удобрений, синтезированных на установке в составе электрохимического активатора и электродугового плазмотрона. При этом концентрация азота в удобрении составила 10 мг/л, а концентрация глюкозы при фотосинтезе взросла на 21%, что привело к росту зеленой массы.*

*Экспериментально установлено что два процесса: химической реакции фотосинтеза и испарительного терморегулирования этой реакции, синергетический характер – они дополняют друг друга, поддерживая совместное действие, направленное на формирование растениеводческого продукта. Чем больше расход влаги, вызванный испарительным охлаждением, тем больше питательного раствора проходит через растение и тем эффективней проходит реакция фотосинтеза, что ведет к росту площади испарения. Так сырая масса листьев вырастает на 25%, сухая на18%, их количество увеличивается на 24%, а суммарная площадь на 2,4%.*

***Введение***

В обзоре представлены результаты научных исследований в 2021-2024 годах по применению активированной водывгидропонных системах.

Гидропоника – это технология (бессубстратный метод) выращивания растений, при котором питательные вещества в виде растворов могут искусственно эффективно поступать в культуры в их минеральной форме. Этот метод имеет много преимуществ, включая снижение проблем с вредителями, постоянное снабжение корней питательными веществами и высокую продуктивность. Растворы, приготовленные на основе активированной воды – новое направление гидропонной технологии, которое на сегодняшний день недостаточно изучено.

Например, объясняется механизм воздействия свойств активированной воды на фотосинтетические процессы в растительных системах, что обуславливает эффективность ее применения в растениеводстве, однако исследования влияния характеристик активированной воды на эффективность продукционных процессов не проводились. Аналогичное положение можно видеть и в трудах других исследователей. Отмечается что активированная вода влияет на показатели роста сельскохозяйственных культур, а именно на высоту, характеристики корневой система (риса и пшеницы), однако в этих работах отсутствуют информация о виде используемой активированной воды, её параметрах и характеристик [1]. Между тем, вопрос применения активированной воды с характеристиками наиболее оптимальными для эффективного протекания продукционных процессов, остаётся открытым.

***Технические средства повышение продуктивности растений***

Измерение величины транспирации важно для обеспечения эффективной продуктивности растительных систем, что достигается самоорганизующимся процессом испарительного охлаждения (СПИО) и его применением для управления ростом этих систем. Этот процесс лежит в основе терморегулирующей функции упомянутых систем, что в свою очередь приводит к максимальной скорости химической реакции фотосинтеза и создает условия наибольшего обеспечения минерального питания в растительные системы.

Существующий способ основан на инфракрасном измерении температуры листьев и сопутствующие ему транспирационные явления. Однако, следует учитывать такие факты, влияющие на точное измерение как температура окружающей среды, солнечный свет, количество осадков, скорость ветра.

В этой связи, необходимым условием оценки продукционных процессов с целью повышения продуктивности растений и дальнейшего применения её в алгоритме цифрового управления, является разработка новых компактных комбинированных датчиков, основанных на прямом контроле сокодвижения и ксилемного потока.

Оригинальная конструкция основана на измерении изменений температуры с помощью термопар, разделенных известным расстоянием, полученным путем обертывания нагревателя вокруг стебля растения.

Разрабатываемый датчик сокодвижения предназначен для определения скорости перемещения массы ксилемного потока в стебле овощной культуры, имеющего незначительный диаметр и легко подверженную деформации структуру.

Поэтому задача исследований состоит в том, чтобы вывести аналитическую зависимость скорости перемещения массы ксилемного потока от градиента температур на поверхности стебля, который измеряется датчиками и передаётся в систему цифрового управления продукционными процессами, основанными на терморегуляции. Для вывода зависимости была применена следующая методика.

Из теоретических предпосылок выбрана зависимость между скоростью (расходом) ксилемного потока и градиентом поверхностных температур на стебле при условии нагрева его в одной точке Н2. Затем экспериментально была определена эта зависимость на двух культурах, после чего теоретическое и экспериментальные зависимости сравнивались, чтобы подтвердить теоретический вывод экспериментальным. Для сравнения строили графики этих зависимостей.

При наличии сокопотока, его скорость определяется посредством регистрации разности скорости движения теплового фронта от нагревателя Н1 (с термопарой Т1) к термопаре Т2. При этом нагретая область потока перемещается к верхнему датчику Т2, теряя теплоту и снижая свою температуру. То есть, по мере увеличения расхода ксилемного потока потеря теплоты уменьшится температура датчика Т2 увеличится, а разница температур датчика Т1 и датчика Т2 снизится. Такой закономерности будет соответствовать соотношение расхода теплоносителя q (г/с) в системе от разности температур Т1 – Т2 вида [2]:

(1)  
где *с* - удельная теплоемкость раствора солей в воде (сока), принимаемая равной *3,6 кДж/ (г оС);* *Δt* - разность температур (*°С*), теплоносителя на входе в систему и на выходе из нее; *Q* - тепловая мощность системы, Вт.

Для сравнения строили график теоретической кривой по (1), для чего задавались значения тепловой мощности нагревателя Н1 равной 0,54 Вт (для исключения повреждения стебля опасным перегревом) и ряд разностей температур 0,5…4 оС. Была проверена работа датчика на экспериментальном стенде в составе исследуемых растений томаты сорта «Алиса» и «Камея», помещенных в разное время в герметичный бокс с почвой, куда капиллярным способом подавалась вода из резервуара.

По мере перемещения теплоносителя (ксилемного потока) от нагревателя к удаленному датчику, его температура, в результате охлаждения, будет уменьшаться. И чем выше скорость потока, тем температурный фронт по достижению удаленного датчика будет остывать меньше, а его температура будет выше, чем при меньшей скорости потока, то есть разность температур будет иметь меньшую величину.

Полученная зависимость хорошо согласуется с гиперболической функцией *𝑞 = 0,15 / Δt*, полученной расчетным способом для растений упомянутых сортов, что подтверждает возможность её применения в процессоре цифрового управления продукционными процессами в растительных системах этих сортов.

***Влияние активированной воды на продуктивность растений***

Установлено, что наиболее полно свойства активированной воды (АВ) характеризует индекс rН2 [3], имеющий расчетный характер, который вычисляется по предварительно измеренным рН и ОВП.

Гидропонные системы применяются для выращивания растений, которые помещены в безсубстратную среду с минеральным питательным раствором. Вопрос применения для приготовления таких растворов на основе активированной воды – недостаточно изучен, хотя в популярных и научных изданиях имеется множество констатирующих упоминаний о положительном влиянии активированной воды на продуктивность растений. И первое, что остаются малоизученным, это вопрос о механизме такого воздействия, какие факторы применения активированной воды приводят к положительному влиянию на продуктивность растений. Результаты исследований по решению этого вопроса изложены в [4]. Поскольку продукционные процессы в растениях, так или иначе, связаны с фотосинтезом, то прежде всего, необходимо рассмотреть, что же происходит в растении при фотосинтезе.

В светозависимой фазе фотон света, попадая на хлорофилл, возбуждает его, происходит выделение электронов и скопление их на наружной мембране хлоропласта. После того, как хлорофилл потерял все свои электроны, квант света продолжает воздействовать на воду, вызывая фотолиз Н₂О: Н₂О → Н⁺+ ОНˉ.

Положительно заряженные протоны водорода накапливаются на внутренней мембране хлоропласта. Получается с одной стороны отрицательно заряженные электроны, с другой – положительно заряженные протоны водорода, а между ними – мембрана.

Гидроксильные ионы идут на производство кислорода и воды: 4ОНˉ→ О₂ + 2Н₂О. Когда количество протонов водорода и электронов достигает максимума, запускается АТФ-синтаза.

АТФ-синтаза выталкивает протоны водорода в строму, где их подхватывает специальный переносчик протонов водорода в реакциях углеводов – никотин-амид-динуклеотид-фосфат (НАДФ). Прохождение положительных ионов (протонов) водорода через АТФ-синтазу сопровождается синтезом молекул АТФ из АДФ, присоединением одного фосфата, называемым фотофосфорилированием, образуя НАДФН⁺. На этом светозависимая фаза фотосинтеза заканчивается, а НАДФН⁺ и АТФ переходят в темновую фазу, где в строме хлоропласта при помощи НАДФН⁺ и АТФ восстанавливается поглощенный растением СО₂, и происходит дальнейшее его участие в синтезе глюкозы.

Чтобы получилась одна молекула глюкозы, проходят целых шесть реакций и на ее построение тратится шесть молекул СО₂, восемнадцать молекул АТФ, двенадцать НАДФН⁺ и двадцать четыре протона водорода Н⁺.

То есть, протоны водорода Н⁺ вносят в процесс синтеза глюкозы весомый вклад. Была выдвинута гипотеза о росте концентрации ионов Н⁺ при фотолизе воды в различных её активированных состояниях в сравнении с неактивированной, обычной водой (ОВ).

Результаты экспериментов подтвердили выдвинутую гипотезу. То есть увеличение концентрации ионов Н⁺ происходит при активации воды. Так Сoʜ- в католите в среднем увеличена по сравнению с концентрацией ионов в неактивированной воды в 3.76·10³ раз, а Сʜ₊ в, анолите в среднем, при том же сравнении, в 3.13·10⁵ раз, что и приводит применение активированной воды к положительному влиянию на продуктивность растений.

Далее были проведены эксперименты на различных культурах о правомерности гипотезы роста синтеза глюкозы. Результаты экспериментов подтвердили выдвинутую гипотезу. Рост синтеза глюкозы при питании растений активированной водой для культур капусты японской сорта «Мизуна, гороха овощного сорта «Зима» и огурца сорта «Все путем» составил соответственно 26.7%, 39.7% и 33.3% для анолита и 24.1%, 7.9% и 25.0% для католита. При этом для растений гороха овощного «Зима» отмечено увеличение интенсивности роста в анолите на 12.5% за двое суток.

Гидропонные системы имеют безсубстратную среду выращивания с минеральным питательным раствором. Поэтому приготовлению питательных растворов на основе активированной воды уделено ряд исследований, которыми являются изучение влияния свойств активированной воды на характеристики NPK минеральных питательных растворов растительных систем.

Прежде всего выявлено влияние на растворимость NPK удобрений при использовании активированной воды.

Установлено, что использование активированной воды при приготовлении питательных растворов требуемая концентрация минералов может быть получена при использовании меньшего количества удобрений, что приведет к его экономии. Поэтому численно определили возможную экономию.

В результате выявлено влияние на растворимость удобрений NPK при использовании активированной воды. Так при некотором значении rH2 = 23 величины концентраций имеют максимальные значения.

Численно определена возможная экономия удобрений, для рекомендаций по приготовлению питательных растворов с учетом численных результатов настоящих исследований. Получены результаты замеров снижения концентрации минералов до необходимой величины, получаемой в растворе с ОВ – использование меньшего количества удобрений, в растворе на основе АВ, что приводит к его экономии от 20 до 28 % в зависимости от степени активации воды раствора. В среднем экономия составит 25% [5].

Подготовка питательных растворов базируется на соблюдении требований одного из основных законов земледелия — закона возврата элементов питания в среду выращивания, что предполагает их компенсацию за счет применения минеральных и органических удобрений.

Поэтому важно экспериментально определить динамику выноса макроэлементов из питательного раствора, приготовленного на основе активированной воды, с целью выявления эффективности использования активированной воды для приготовления питательных растворов [6].

Анализ динамики выноса макроэлементов из питательных растворов, позволил сделать вывод о периодичности пополнения макроэлементов в питательные растворы, то есть о соблюдении основного закона земледелия— закона возврата элементов питания в среду выращивания. Такая периодичность составила 1…2 суток.

Методом линейной регрессии определили аналитические выражения уравнений регрессии корреляционных полей временных рядов изменений концентраций макроэлементов NPK для вариантов ОВ и АВ. Относительное увеличение результативного признака в зависимости от химического элемента, различно: так для азота – 2,76, для фосфора – 4,07, для калия – 3,96, что позволяет сделать вывод об увеличении интенсивности выноса макроэлементов NPK, то есть об их более эффективном усвоении растениями, при использовании в питательных раствора.

Дальнейшие исследования были посвящены результативности применения активированной воды для повышения продукционных процессов в растениях, выращиваемых в гидропонных системах.

Гидропонная система основана, как упомянуто выше, на технике (методе) выращивания растений, при которой питательные вещества в виде растворов могут искусственно эффективно поступать в культуры в их минеральной форме. Растворы, приготовленные на основе активированной воды – новое направление гидропонной техники выращивания, которое на сегодняшний день недостаточно изучено.

Например, исследования влияния характеристик активированной воды на эффективность продукционных процессов не проводились. В работах отсутствуют информация о виде используемой активированной воды, её параметров и характеристики [7]. Между тем, вопрос применения активированной воды с характеристиками наиболее оптимальными для эффективного протекания продукционных процессов, остаётся открытым.

Цель рассматриваемых экспериментальных исследований – выявить характер функциональной связи между параметрами активированной воды и эффективностью синтеза глюкозы овощных культур на примере лука-севка.

В качестве объекта исследований были выбраны следующие параметры и закономерности: активированной воды в виде индекса rH₂ для различных рН и характер зависимости концентрации синтезированной глюкозы Сg от величин параметров АВ в виде индексов rH₂.

В качестве предмета исследований были использованы всходы лука-севка сорта «Кармен».

В эксперименте использовали луковицы лука в количестве 7 образцов-луковиц для полива питательным раствором на основе неактивированной обычной воды (контрольные образцы) и 7 образцов-луковиц для полива питательным раствором на основе активированной воды.

Поскольку задачей исследований является изучение характера зависимости, то в качестве аргумента использовали три, из наиболее благоприятных для развития растений, значения rH₂ – 28, 29 и 31. Эти значения и будут параметрами активированной воды, применяемой для приготовления раствора полива. Контрольные образцы поливали обычной водой и делали замеры концентраций глюкозы два раза, для получения значений изменений синтезированной глюкозы при её синтезе в неизменных условиях. То есть сохранения одинаковых условий роста по температуре, освещенности, влажности, газового состава и других факторов, кроме параметров питательных растворов.

Характер изменения Сg при питании растворами на основе активированной воды в зависимости от её параметров таково, что при некотором значении параметра rH₂ = 31 концентрация синтеза глюкозы имеет наибольшее увеличение Сg = 3,51%. При этом Сg и параметр активации rH₂ имеют довольно тесную связь, о чем говорит достаточно высокий коэффициент корреляции между ними, равный 0,73.

АВ кроме функции прямого повышения продуктивности еще имеет технологическую функцию синтеза азотных удобрений.

Азот — важнейший питательный элемент всех растений. Формируя углеводы молекулы глюкозы, при соединении с нитратами почвы образуют аминокислоты, которые объединяясь, синтезируют белки.

Азот является важнейшей составной частью хлорофилла, без которого не может протекать процесс фотосинтеза, а, следовательно, не могут образовываться важнейшие для питания человека и животных органические вещества. Кроме того, имеет большое значение азота как элемента, входящего в состав ферментов - катализаторов жизненных процессов в растительных организмах [8].

Источниками азота для растений могут служить соли азотной и азотистой кислот (нитраты, нитриты), аммиачные формы азота, некоторые органические соединения азота – мочевина и аминокислоты. Для того, чтобы его превратить в аммиак в промышленности используется процесс, проходящий при температуре +1000°С, давлении в 10 атмосфер и в присутствии платинового катализатора. [9]

Однако, существует технология безреагентного и безотходного получения нитратов щелочных и щелочноземельных металлов в воде орошения сельскохозяйственных растений из растворенных в ней солей. Технология, в основе которой лежит электрохимический синтез азотистых удобрений, разработана отчественными учеными В.М. Бахиром, В.И. Прилуцким и другими [9].

Реализация процесса [9] возможна при использовании только двух известных видов специального оборудования: диафрагменного электрохимического реактора для обработки воды и плазмохимического генератора для обработки воздуха, соединенных между собой в технологическую схему непрерывного действия, на вход которой подают воду системы орошения, электроэнергию и воздух, а на выходе получают воду орошения, обогащенную нитратными удобрениями В электрическом дуговом разряде в воздухе при температуре 3000…3500°С протекает реакция образования оксида (II) азота из азота и кислорода:

Характерным свойством оксида азота (II) является ее способность соединяться с кислородом с образованием оксида азота (IV):

Через катодную камеру электроактиватора прокачивали природную пресную воду. После катодной электрохимической обработки вода поступала в смеситель, где перемешивалась с воздухом, прошедшим через дуговой разряд плазмохимического генератора (плазмотрона). Получали азотные удобрения.

Целью настоящих исследований является изучение влияния применения азотных, назовем их условно, «электрохимических удобрений» на фотосинтетические процессы в растительных системах.

В качествепредмета исследований используем всходы капусты китайской «Пак Чой».

Эксперимент проводили по следующей методике. Высевали семена капусты так, чтобы получить всходы в количестве 7 образцов для полива питательным раствором на основе неактивированной воды (контрольные образцы) и 7 образцов для полива питательным раствором с азотными удобрениями, полученными электрохимическим способом. Эффективность применяемых удобрений на фотосинтетические процессы контролировали, измеряя синтез глюкозы в растениях. Перед замером значений концентрации глюкозы растения получали питание в течение недели, начало эксперимента 21.04.2024. После чего замерили концентрацию глюкозы с помощью цифрового рефрактометра МА873 с тройным повторением каждого образца и рассчитали среднюю величину для случая неактивированной и воды с азотными электрохимическими азотными удобрениями – нитратом кальция.

Недельные всходы капусты китайской имели увеличение концентрации глюкозы на 21%, что сопровождалось также увеличением биомассы растений по сравнению с контролем.

Экспериментально подтверждена эффективность применение поливной воды с азотистыми удобрениями, синтезированными на экспериментальной установке в составе элетрохимического активатора поливной воды и электродугового плазмотрона для обработки атмосферного воздуха. При этом концентрация азота в удобрении составила 10 мг/л, а концентрация глюкозы при фотосинтезе взросла на 21%, что привело к росту зеленой массы.

***Синергетический эффект терморегуляции фотосинтеза***

Продуктивные процессы в растении носят биоэнергетический характер, заключающийся в получении растением энергии светового излучения (СИ). СИ имеет две составляющие: фотосинтезную составляющую СИ и сопровождающую, её тепловую составляющую СИ, то есть в формировании продуктивной массы растения и в способствующей ей терморегуляции, которая имеет самоорганизующийся характер и обеспечивает максимальную эффективность фотосинтеза. В свою очередь это влечет увеличение поверхности испарения и эффективности терморегуляции.

Эти два процесса: химической реакции фотосинтеза и испарительного терморегулирования этой реакции, имеют кооперативный, синергетический характер – они дополняют и поддерживают совместное действие, направленное на формирование растениеводческого продукта.

Цифровое сельское хозяйство, и в частности сельхозпроизводство на основе замкнутых искусственных агроэкосистем (ЗИАЭС) отличается возможностью и необходимостью регулирования агроэкологических параметров. Такая необходимость влечет возможности обеспечить максимальную продуктивность растений. Одним из таких регулируемых параметров является температура окружающей среды. Однако вопрос «какая температура является наилучшей для конкретного растения» остается открытым, так как у каждого растения такое значение температуры разное [10,11].

Известно, что [12-16]:

- в соответствии с законом выживания растение старается обеспечить максимальную продуктивность создавая для этого определенные условия;

- скорость фотосинтеза напрямую влияет на продуктивность растения;

- скорость фотосинтеза зависит от температуры окружающей среды;

- есть некое оптимальное значение температуры окружающей среды, при которой обеспечивается максимальная скорость фотосинтеза;

- у каждого растения, по крайней мере у каждого вида растения, своя индивидуальная оптимальная температура, при которой скорость фотосинтеза максимальна;

- растение способно регулировать свою температуру для обеспечения ее оптимальности лишь одним способом – посредством испарительного охлаждения;

- растение использует максимум своих возможностей охлаждения для обеспечения оптимальной температуры, гарантирующей максимальную скорость фотосинтеза;

- испарительное охлаждение имеет предел охлаждающего воздействия в виду ограничения работы устьиц.

Проведенные исследования (будут описаны ниже) следует, что каждое растение имеет три фазы терморегуляционного процесса обусловленных температурой окружающей среды при её изменении с некого минимума до некого максимума. Первая фаза характеризуется низкими температурами окружающей среды, при этом реакция фотосинтеза протекает медленно, малопродуктивно, аппарат терморегуляции не работает. Третья фаза, наоборот характеризуется высокими температурами из-за нагрева СИ. При этом устьичный аппарат прекращает свою работу и реакция фотосинтеза вновь замедляется.

Однако нас интересует вторая фаза, где с помощью устьичного аппарата и терморегуляции обеспечивается такая температура вегетативных органов, что реакция фотосинтеза, независимо от высокой температуры окружающей среды, протекает с максимальной скоростью [17,18].

Охлаждающей способности достаточно, чтобы снизить температуру растения до оптимальной. При этом существует разница между температурой окружающей среды и температурой растения [19-20]. И чем выше окружающая температура, тем больше требуется охлаждающей жидкости для терморегуляции. В конце терморегулирования, когда устьичный аппарат прекращает функционирование, разница между температурой среды и температурой вегетативных органов достигает максимума. При этом и расход охлаждающей жидкости становится максимальным. Следует отметить, что это расход питательного раствора и он максимален.

Примем следующие рабочие гипотезы [21-22]:

* Наибольшая скорость фотосинтеза существует при наибольшем расходе испарительного охлаждения. При оптимальной температуре листа, чем больше расход влаги, вызванный испарительным охлаждением, тем больше питательного раствора проходит через растение.
* Расход влаги при испарительном охлаждении имеет прямую зависимость от разницы температур окружающего воздуха и температуры листа. Максимальный расход влаги имеет место при максимальной разнице температур.
* После достижения максимальной охладительной способности растение выходит на максимум испарительного охлаждения, показатели которого перестают расти. То есть отмечается выход на плато максимального терморегуляционного расхода. Разница температуры окружающего воздуха и температуры листа достигает своего максимума.

Наибольшая продуктивность (Rmax) обеспечивается при оптимальной температуре фотосинтеза и максимальном расходе: на границе фаз 2 и 3.

Таким образом, цель исследований на первом этапе – экспериментально показать наличия указанных фаз температуры листа при изменении температуры окружающего воздуха от минимальной величины до некоторого максимума, а также соответствие максимального расхода испарения максимуму разности температур листа и воздуха. На втором этапе исследований – экспериментально показать, что наибольшая продуктивность соответствует температурному режиму на границе 2 и 3 фаз.

В качестве объекта исследований выбрали терморегуляционные процессы в растениях. К ним отнесли температуру поверхности листа, разницу температур поверхности листа и окружающего воздуха и расход воды охлаждающего испарения.

В качестве предмета исследований выбрали два образца растений: салат сорта «Красный дуболистный» и томат сорта «Боец» (Буян).

Изменение массы воды в контейнере измеряли с помощью весов ML-A01 с точностью измерения 0,01 г. а температуру инфракрасным ИК термометром Кельвин ИКС 4-20/5. Данные регистрировались в цифовом формате [23] с пятиминутным интервалом и трехкратным повторением, в течении короткого периода времени, однако, чтобы исключить влияние роста растения на весовые данные, массу испаряемой воды определяли расчетным путем через величину разницы температуры воздуха и листа по известной формуле. приведенной в [24].

Результаты рассматривлись по каждому виду растения.

Экспериментальные исследования терморегуляции двух образцов растений тотмата и салата подтвердили, что существует три фазы терморегуляции растения. На границе фазы 2 существует зона максимального расхода питательного раствора через растения при этом температура оптимальна, что соответствует максимуму скорости фотосинтеза.

Температура листа в фазе 2 имеет случайные отклонения от постоянной величины, что вызвано объективными причинами роста растения и эту случайность нужно подтвердить. Для этого провели статистическую обработку результатов измерений методом «Последовательных разностей».

Установлено, что процесс терморегуляции можно представить тремя фазами, причем область на границе 2 и 3 фазы характеризуется наибольшей скоростью фотосинтеза, поскольку температура в ней имеет оптимальную установившуюся величину, и наибольшую подачу питательных веществ в растение, поскольку масса испаряемой воды в ней достигает максимальной величины. То есть эта область для соответствующего значения температуры воздуха является наиболее продуктивной. Другими словам, эта температура, а точнее её диапазон, в котором устьица сохраняют свою работоспособность и способны охлаждать растение, дает возможность фотосинтетическому аппарату работать с наибольшей эффективность, а самому растению получать больше питательных веществ [25]. То есть создаются условия для повышения продуктивности.

Провели числовую проверку того, что продуктивность в рассматриваемой области будет иметь наибольшее значение. Проверку провели на образце томата, для чего воспользовались результатами проведенных исследований необходимых характеристик роста зеленой массы при воздействии на него различных температур воздуха.

Измерения характеристик процессов производились на регистраторе автоматически с трехкратным повторением с 3.04. по 19.04.2020 года. Измеренные данные архивировались в CD носителе, а затем обрабатывались на компьютере в среде «Exel». Измерения роста продуктивной массы проводились взвешиванием растения с крышкой после вычитания веса крышки, измеренного заранее. Массу растения измеряли отдельно, на более точных весах марки ML-A01 с пределом измерений 100 г и ценой деления 0,01г, два раза в сутки: утром и вечером. Измерения проводилась при различных температурах воздуха, после чего рассчитывалась средняя величина измеренного ряда роста продуктивности для каждого повтора значений температур воздуха. Далее проводим исследования для данной температуры воздуха.

Из всего рассчитанного ряда температур воздуха выбрали пять значений. Имеющих увеличение от 26 до 34 Со.

Далее находили тренд в виде полинома второго порядка, который имеет максимум. Его координаты 29,29 Со и 0,75 г прироста зеленой массы. Максимум прироста обеспечивается при температуре воздуха, соответствующей границе фаз 2 и 3. Из предыдущих исследований, нашли эту величину, она составила 29,36 Со, то есть отлична на 0,2%. Рабочие гипотезы полностью подтвердились.

Далее провели экспериментальные исследования по выявлению синергетического эффекта при взаимодействии двух процессов: химической реакции фотосинтеза и терморегулирования этой реакции, имеющих, предположительно, кооперативный, синергетический характер – они дополняют и поддерживают совместное действие, направленное на формирование растениеводческого продукта.

Разработан алгоритм работы программы поиска максимальной разницы температур (далее «Поиск температуры»). Таким образом, целью настоящих исследований является экспериментальная проверка работы программного обеспечения согласно разработанному алгоритму и наличия синергетического эффекта, обеспечиваемого этим алгоритмом.

В качестве исследуемого предмета исследований была использована культура салата «Азарт» в количестве 6 образцов. Эксперимент проводили с 31.05.2022 по 28.06.2022 с фиксацией биометрических показателей. В качестве показателей приняли следующие: масса листьев (сырая), масса листьев (сухая), общая площадь и количество листьев, высота растения.

Фиксировались также климатические повазатели: температура и влажность окружающей среды, температура листьев, температура контрольного объекта, разница температур листьев и контрольного объекта. Эти показатели измерялись каждые 5 минут и фиксировались в базе данных через интернет.

Средние значения показателей вычислялись по показателям каждого из шести образцов «алгоритм – контроль».

Стенд состоит из двух боксов для размещения в них исследуемых образцов, в одном из которых управление режимом осуществлялся по разработанному алгоритму (верхний бокс), а в другом по обычной схеме, поддерживающей табличные оптимальные факторы для данной культуры по температуре воздуха (нижний бокс). В каждом боксе размещался лоток с шестью кубиками из минваты, в которых были высажены растения. Уровень питательного раствора в лотках поддерживался автоматически с помощью насосов минерального питания [26].

Температура терморегуляции листьев измерялась тепловизорным методом с помощью специального сенсора. Температура нагрева окружающей среды (воздуха) измерялась на контрольном образце цвета аналогичного цвету листьев растения и дублировалась термодатчиком.

Кроме того, было проверено наличие нитратов в исследуемых образцах, поскольку алгоритм обеспечивает максимальную подачу питательных веществ, в том числе азотистых.

Световое излучение обеспечивалось светодиодным светильником полного спектра интенсивностью 500 микромоль на метр квадратный в секунду.

Контроль продуктивности осуществлялся путем замера прироста массы растения с помощью весов ML-A01 (точность измерения 0,01 г).

По измеренным данным получены результаты, иллюстрирующие соотношение показателей продуктивности растения с режимами, управляемыми по алгоритму и результаты без применения алгоритма (контроль).

Сравнение показателей продуктивности выявило наличие синергетического эффекта при управлении режимами продукционных процессов по алгоритму, обеспечивающему кооперативное взимодействие фотосинтеза и эффективного минерального питания.

Так сырая масса листьев выросла на 25%, сухая на18%, их количество выросло на 24%, а суммарная площадь на 2,4%.

Уровень нитратов ниже нормы на 21%.

***Выводы***

1. Проведенные научные исследования в вопросах повышения продуктивности овощеводческой продукции, выращиваемой в гидропонных системах, позволили получить результаты, обладающие научной новизной, а именно:

* получено аналитическое выражение расхода ксилемного потока, позволяющее применять его в цифровых технологиях для контроля транспирации, как фактора влияния на продуктивность;
* установлены и обоснованы факторы применения активированной воды, обеспечивающие рост продуктивности растений:

1. Увеличение концентрации ионов водорода Н⁺,участвующих в фотосинтезе и образовании углеводов, имеет место при активации воды.
2. Доказана правомерность гипотезы роста синтеза глюкозы при активации воды на различных культурах – для культур капусты японской сорта «Мизуна, гороха овощного сорта «Зима» и огурца сорта «Все путем» рост составил соответственно 26.7%, 39.7% и 33.3% для анолита и 24.1%, 7.9% и 25.0% для католита.
3. Выявлено значение параметра активации при котором концентрация синтеза глюкозы имеет наибольшую величину. Так для значения параметра rH2 = 31 концентрация синтеза глюкозы имеет наибольшее увеличение Сg = 3,51%. При этом Сg и параметр активации rH2 имеют высокий коэффициент корреляции между ними, равный 0,73.
4. Установлено, что применениее активированной воды при приготовлении питательных растворов требуемая концентрация минералов может быть получена при использовании меньшего количества удобрений, так что приводит к его экономии от 20 до 28 % в зависимости от степени активации воды раствора.
5. Доказано, что использование активированной воды при приготовлении питательных растворов приводит к увеличению интенсивности выноса макроэлементов NPK. Методом линейной регрессии определены аналитические выражения уравнений регрессии корреляционных полей временных рядов изменений концентраций макроэлементов NPK для вариантов обычной и активированной воды. Относительное увеличение результативного признака в зависимости от химического элемента такое: так для азота – 2,76, для фосфора – 4,07, для калия – 3,96, что говорит об их более эффективном усвоении растениями.

* Активированная вода кроме функции прямого повышения продуктивности имеет технологическую функцию синтеза азотных удобрений. Экспериментально подтверждена эффективность применение поливной воды с азотистыми удобрениями, синтезированными на экспериментальной установке в составе элетрохимического активатора и электродугового плазмотрона для обработки атмосферного воздуха. При этом концентрация азота в удобрении составила 10 мг/л, а концентрация глюкозы при фотосинтезе взросла на 21%, что привело к росту зеленой массы;
* экспериментально установлено, что терморегуляция растений имеет температурный интервал, в начале которого включается устьичный аппарат, охлаждая растение, а в конце устьица, по причине своего максимального раскрытия, прекращают свое охлаждающее действие и растение нагревается вслед за нагревом окружающей среды. В этот момент охлаждающий поток максимален, подавая в растение максимум питательного раствора.
* впервые фотосинтез и терморегуляция растений рассмотрены как два взаимосвязанных продуктивных процесса, обеспечивающих синергетический эффект. В результате кооперативного взаимодействия фотосинтеза и эффективного минерального питания, отмечается дополнительный рост продуктивности, заключающийся в увеличении сырой массы листьев на 25%, сухой на 18%, их количества на 24%, а суммарная площади на 2,4%. При этом уровень нитратов снизился на 21%.

***Литература***

1. X. Yang, J. Fan, J. Ge, Z. Luo Effect of Irrigation with Activated Water on Root Morphology of Hydroponic Rice and Wheat Seedlings. // Agronomy 12, **1068** (2022)
2. Расход теплоносителя в системе. Электронный ресурс [https://en.ppt-online.org/17274//](https://en.ppt-online.org/17274/) дата обращения 20.06.2022.
3. The importance of pH and rH₂ for the vital activity of microorganisms // Electronic resource //https: activestudy.info/znachenie-ph-i-rh2-dlya-zhiznedeyatelnosti-mikroorganizmov// дата обращения 11.10.2023
4. The effect of activated water on the photosynthetic processes of plants Alexander Grishin, Andrey Grishin, Vladimir Grishin and Inna Knyazeva International Scientific and Practical Conference “From Modernization to Rapid Development: Ensuring Competitiveness and Scientific Leadership of the Agro-Industrial Complex” (IDSISA 2024) BIO Web Conf. **Volume**108, 2024
5. А.П.Гришин, А.А.Гришин, В.А.Гришин, И.В.Князева Влияние параметров активированной воды на синтез глюкозы при фотосинтезе//«Агрономия -2024»: СБ. докл. Междунар. науч.-практ. Конф.  . М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева 19.11.24.
6. Питательные растворы для гидропоники на основе активированной воды Численно определена возможная экономия удобрений, для рекомендаций по приготовлению питательных растворов с учетом
7. Динамика выноса макроэлементов npk из питательного раствора на основе активированной воды для гидропонной овощной рассады

# Роль азота в питании растений. // Электронный ресурс // [https://studfile.net/preview/5612284/page:6///Дата обращения 11.04.2024](https://sciencing.com/what-is-glucose-used-for-in-a-plant-13428304.html%20/Дата%20обращения%2011.04.2024)

1. Бахир В. М. Электрохимическая активация: изобретения, техника, технология, Москва: 2014.
2. Michaletz S.T., Weiser M.D., Zhou J., Kaspari M., Helliker B.R., Enquist B.J. Plant Thermoregulation: Energetics, Trait-Environment Interactions, and Carbon Trends in Ecology& Evolution 2015. – No. 12. Vol. 30. pp. 715-724 doi.org/10.1016/j.tree.2015.09.006.
3. Karasev, Valery, Karaseva, Margarita & Mukhortov, Dmitriy (2020) “Diagnostics of the physiological state of coniferous trees by bioelectric and temperature indicators”, Lesovedenie, №2. pp. 162-174. DOI: 10.31857 / S0024114820010088Barekova, Anna, Barek, Viliam, Kovacova, Martina, Novotna, Beata & Kiss, Vladimir (2020), “Climate conditions impact on the sap flow into plants and their dendrometric changes”, Journal of ecological engineering, Vol. 21, № 6, pp. 224-228, DOI: 10.12911/22998993/124077.
4. Мудрик В.А., Свентицкий И.И. Биоэнергетические аспекты оценки влагообеспеченности растений. Пущино, Пущинский центр биологических исследований АН СССР, 1981.
5. Свентицкий И.И. Энергосбережение в АПК и энергетическая экстремальность самоорганизации. М.: ВИЭСХ, 2007.
6. Свентицкий И.И., Гришин А.П. К определению термина «энергоинформационный» // Вестник ГНУ ВИЭСХ. Энергетика и электротехнологии в сельском хозяйстве. 2009. № 1(4). С. 79-82.
7. Физиология растений и микробиология: Методические указания к летней полевой практике / Г.Г. Борисова, И.С. Киселева, Г.Ф. Некрасова, [и др.]. Екатеринбург, Издательство Уральского университета, 2006. 120 с.
8. Свешникова В.М. Изучение транспирации у растений в естественных условиях произрастания // Полевая геоботаника. М.-Л., 1959. Т.1, С.331-346.
9. A. Grishin, A. Grishin, I. Knyazeva and V. Grishin. Thermoregulation of plant systems as a factor of production processes // E3S Web Conf., 285 (2021) 02013.
10. Способ повышения продуктивности растениеводства А. П. Гришина и др. 2021 IOP Conf. Сер.: Окружающая среда Земли. Sci. 848 012
11. Venturin, Afonso Zucolotto, Guimaraes, Claudinei Martins, Sousa, Elias Fernande de, Filho, Jose Altino Machado, Rodrigues, Weverton Pereira, Serrazine, Icaro de Araujo, Bressan-Smith, Ricardo, Marciano, Claudio Roberto & Campostrini, Eliemar (2020) “Using a crop water stress index based on a sap flow method to estimate water status in conilon coffee plants” Agricultural water management, Vol. 241, № 106343, DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106343.
12. Kai X., Liang G., Hong Y. A naturally optimized mass transfer process: The stomatal transpiration of plant leaves // Journal of Plant Physiology. Vol. 234–235. 2019. p 138-144
13. Гришин А.А., Гришин А.П. Транспирация растений как диссипативный процесс с временной фрактальной структурой // Найновите научни постижения // Материали за 10-а международна научна практична конференция (17-25 март 2014 година, София). Том 27. Селско стопанство. Ветеринарна наука – С.: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2014, с. 44-51.
14. Гришин А.П. Энергетические потоки процесса транспирации у растений // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации государственной программы развития сельского хозяйства // Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции (15-16 сентября 2015 г., Москва). Часть 2. – М.: ФГБНУ ВИМ, 2015, с.
15. Andreev, Yuri, Makeeva, Tatiana, Pukhova, Ekaterina, Sevryugin, Vadim & Sherstnev, Grigory (2015) Technical means of digital information processing systems Moscow, Ivan Fedorov Moscow State University of Printing Arts, 74 p.
16. Гришин А.А., Гришин А.П. Транспирация растений как диссипативный процесс с временной фрактальной структурой // Найновите научни постижения // Материали за 10-а международна научна практична конференция (17-25 март 2014 година, София). Том 27. Селско стопанство. Ветеринарна наука – С.: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2014, с. 44-51.
17. Гришин А.П. Энергоинформационная технология орошения // Техника в сельском хозяйстве, № 2, 2010, с. 22-25.