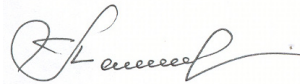


На правах рукописи

ПАНОВА Римма Ивановна



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОПОННОГО
ОВОЩЕВОДСТВА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА
В БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЕ РАСТЕНИЙ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2015

Работа выполнена на кафедре физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Басарыгина Елена Михайловна

Официальные оппоненты: **Воробьев Николай Павлович**,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Электрификация
производства и быта» ФГБОУ ВПО
«Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова»

Самойленко Владимир Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Автоматика, электроника
и метрология» ФГБОУ ВПО
«Ставропольский государственный
аграрный университет»

Ведущая организация: ФГБНУ «Всероссийский научно-
исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства»

Защита состоится «10» июня 2015 г., в 11.30 часов на заседании диссертационного совета Д 220.069.01 на базе ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» <http://www.csaa.ru>.

Автореферат разослан «17» апреля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



Плаксин
Алексей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Гидропонное овощеводство, относящееся к растениеводству защищенного грунта, сопряжено со значительными затратами энергии. Снижение энергоемкости овощной продукции может быть достигнуто за счет совершенствования биологического метода защиты растений на основе энтомофагов. Для увеличения выхода и повышения качества биопродукта необходимо обеспечить активное взаимодействие звеньев трофической цепи «субстрат – кормовое растение – фитофаг – энтомофаг», для чего перспективным представляется использование методов и технических средств электротехнологии. Недостаточная изученность данного вопроса послужила основанием для постановки цели и задач исследования.

Исследования проводились в соответствии с разделом федеральной программы по научному обеспечению АПК Российской Федерации: шифр 01.02 – «Разработать перспективную систему технологий и машин для производства продукции растениеводства и животноводства на период до 2015 г.», а также планом НИР ЧГАА на 2010–2015 гг.

Цель исследования: повышение эффективности гидропонного овощеводства на основе использования ультразвуковых полей в биологической защите растений.

Задачи исследования

1. Определить влияние ультразвуковой обработки субстрата на отклик кормовых растений, используемых для разведения полезных насекомых, выход биопродукта и урожайность овощей.

2. Разработать установки для реализации энергосберегающей гидропонной технологии, предусматривающей применение ультразвука в биологической защите растений.

3. Разработать энергосберегающую технологию гидропонного овощеводства, включающую в себя использование ультразвука в биологической защите растений.

Объект исследования: использование ультразвука в биологической защите овощей, выращиваемых методом гидропоники.

Предмет исследования: закономерности изменения выхода биопродукта и урожайности овощей при различных режимах ультразвуковой обработки субстрата, используемого для выращивания проростков при разведении энтомофагов.

Анализ научно-технических публикаций позволил сформулировать рабочую **гипотезу**: УЗ-обработка субстрата, используемого для выращивания кормовых растений и разведения энтомофагов, позволит улучшить условия минерального питания растений, активировать процессы их роста и развития, что будет способствовать активному взаимодействию звеньев цепи «субстрат – кормовое растение – фитофаг – энтомофаг», увеличению выхода биопродукта и приведет к повышению урожайности овощей и снижению энергоемкости продукции.

Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:

- в работе впервые теоретически исследовано и апробировано на практике использование ультразвука в биологической защите растений в условиях гидропонного овощеводства (на примере светокультуры огурца). Предложено осуществлять ультразвуковую обработку органической части субстрата для обеспечения активного взаимодействия звеньев цепи «субстрат – кормовое растение – фитофаг – энтомофаг» и, соответственно, для повышения выхода качественного биопродукта и увеличения урожайности огурца;
- разработаны оценочные показатели результативности технологических процессов, в том числе процесса ультразвуковой обработки субстрата; установлена взаимосвязь между продолжительностью УЗ-обработки и электрофизическими и спектрально-оптическими характеристиками системы «субстрат – раствор»;
- получены математические модели, описывающие отклик кормовых растений и биопродукта на УЗ-обработку субстрата; разработана методика оценки эффективности использования ультразвука в биологической защите растений.

Практическая ценность работы и реализация ее результатов. На основе результатов диссертации предложены и опробованы технические средства, необходимые для реализации разработанной технологии гидропонного овощеводства, включающей в себя использование ультразвука в биологической защите растений. Установленные взаимосвязи и полученные математические модели могут использоваться при проектировании установок для разведения энтомофагов и их применения в гидропонном овощеводстве.

Результаты, полученные в диссертационной работе, позволяют дать практические рекомендации по применению ультразвука в биоло-

гической защите растений в условиях гидропонного растениеводства. Новизна технических решений подтверждена четырьмя патентами РФ.

На основе диссертационных исследований разработаны и приняты к внедрению: технология гидропонного возделывания огурца, включающая в себя использование ультразвука в биологической защите растений (в ООО Агрокомплекс «Чурилово» (г. Челябинск), ООО «Росинка» (г. Челябинск), в группе компаний «Агропром – МДТ» (г. Москва), ООО Компания «АЯКС-Агро» (г. Омск)); методика оценки эффективности использования ультразвука в биологической защите растений (в Министерстве сельского хозяйства Челябинской области (г. Челябинск), ООО Компания «АЯКС-Агро» (г. Омск)). Результаты теоретических и экспериментальных исследований, изложенные в диссертационной работе, используются в учебном процессе Челябинской государственной агроинженерной академии.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались и получили одобрение на ежегодных научно-технических конференциях ФГБОУ ВПО ЧГАА (2012–2015 гг.), Форуме «Органическое сельское хозяйство в Российском агропромышленном комплексе» (Республика Крым, г. Симферополь, 2014 г.); XI специализированной выставке «Защищенный грунт России» (г. Москва, ВВЦ, 2014 г.); 16-й Российской агропромышленной выставке «Золотая осень» (г. Москва, ВВЦ, 2014 г., диплом, бронзовая медаль); XXI областной агропромышленной выставке «Агро-2014» (г. Челябинск, диплом, золотая медаль), Международной конференции «Современные технологии выращивания овощей в защищенном грунте» Ассоциации «Теплицы России» и группы компаний «Агропром – МДТ» (г. Екатеринбург, 2014 г.), семинаре «Сорта, гибриды, технологии в современном тепличном производстве» ООО «НИИ овощеводства защищенного грунта» и ООО «ПрофСемГавриш» (г. Москва, 2014 г.), Международной выставке «Зеленые технологии» (GreenTech, Амстердам, 2014 г.), Международной выставке «Технологии выращивания» (Growtech Eurasia, Турция, 2013 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 13 научных работ, в том числе 4 патента РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, библиографии из 130 наименований и 14 приложений. Содержание работы изложено на 137 страницах, текст содержит 32 рисунка и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена актуальность темы, поставлена цель и определены задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, представлена общая характеристика работы.

В **первой главе** «*Состояние вопроса и задачи исследований*» представлен анализ публикаций. Гидропоника открывает широкие перспективы для интенсификации овощеводства защищенного грунта. Преимуществами гидропонных технологий, в частности малобъемных, являются сокращение затрат на подготовку и завоз грунтов; уменьшение объема корнеобитаемой среды и т.д.

В условиях гидропоники полноценное развитие растений и, следовательно, высокий урожай достигаются при поддержании требуемого микроклимата. Это приводит, с одной стороны, к возрастанию энергоемкости производства продукции, а с другой – создает благоприятные условия для массового размножения вредителей, от которых без эффективных мер защиты может теряться до 90% урожая.

Наиболее прогрессивный метод защиты растений – биологический. Использование способов и средств электротехнологии в биометодике способствует увеличению количества и качества биопродукта; сокращению сроков разведения; снижению трудоемкости. Анализ публикаций показал, что методы и технические средства электротехнологии в биологической защите растений применяются для непосредственного (сбор, заражение и т.д.) и опосредованного (создание условий для жизнедеятельности и размножения) воздействия на насекомых.

Однако вопрос полностью не изучен: в частности, отсутствуют сведения о применении ультразвуковой обработки субстрата для обеспечения активного взаимодействия звеньев цепи «субстрат – кормовое растение – фитофаг – энтомофаг».

Вышеизложенное послужило основанием для постановки цели и задач исследования; позволило сформулировать рабочую гипотезу.

Во **второй главе** «*Теоретическое обоснование условий эффективного использования ультразвука в гидропонном овощеводстве*» изложен следующий материал. Повышение эффективности гидропонного овощеводства предлагается достичь за счет использования

ультразвука для совершенствования биологической защиты растений на основе энтомофага *Aphidius colemani*.

Для выращивания газонов из кормовых растений и последующего разведения на них *A. colemani* предложен субстрат, состоящий из торфо-опилочной смеси и минеральной ваты. Минераловатная основа предложенного субстрата позволяет не только автоматизировать орошение кормовых растений, но и использовать единую систему капельного полива для мобильных газонов с *A. colemani* и защищаемых растений (огурца). Обработка торфо-опилочной смеси в ультразвуковом поле предусмотрена для активирования процессов роста кормовых растений за счет получения более однородной корнеобитаемой среды; ускорения экстракции гуминовых веществ; сокращения численности микроорганизмов (в том числе болезнетворных).

Достижимое в результате ультразвуковой обработки органической составляющей субстрата улучшение условий минерального питания приведет к активному взаимодействию звеньев цепи «субстрат – кормовое растение – фитофаг – энтомофаг»; увеличению выхода качественного биопродукта и, соответственно, повышению урожайности и снижению энергоемкости овощной продукции (рисунок 1).



Рисунок 1 – Использование ультразвука в биологической защите растений

Распространение ультразвуковых колебаний порождает физические эффекты, использование которых в различных технологиях

создает реальные предпосылки интенсификации технологических процессов и улучшения качества конечного продукта.

К числу основных факторов, определяющих влияние ультразвука на технологические процессы (диспергирование, гомогенизация, экстракция и т.д.), протекающие в жидкостях, относится кавитация. Как известно, за меру интенсивности кавитации принимается эрозионная активность единичной полости K и параметр газосодержания δ [3]:

$$K = \frac{W_p}{W_c} = x\psi ; \quad (1)$$

$$\delta = \frac{P_n}{P_{cp}},$$

где x – величина, зависящая от максимального R_{max} и минимального R_{min} радиуса полости, продолжительности фазы захлопывания Δt_{min} и частоты колебаний f ;

ψ – величина, зависящая от гидростатического P_0 и звукового P_A давлений, продолжительности фазы расширения Δt_{max} и циклической частоты ω ;

P_n – давление парогазовой смеси в полости при $R = R_{max}$;

P_{cp} – среднее внешнее давление, действующее на стенку в фазе сжатия.

Указанные критерии кавитации не позволяют оценить конечный результат технологического процесса и соответствующие затраты энергии, в связи с чем возникла необходимость в разработке оценочных показателей, позволяющих опередить изменения характеристик конечного продукта и связанные с ними затраты энергии. В результате УЗ-обработки гидропонных субстратов происходит изменение электрофизических и спектрально-оптических характеристик системы «субстрат – раствор» (конечного продукта), что влияет на условия минерального питания растений. Предлагаемые оценочные показатели позволяют определить относительное изменение характеристик конечного продукта:

а) показатель мутности:

$$P_m = \frac{D_{Ma} - D_{Mb}}{D_{Mb}} ; \quad (2)$$

б) показатель цветности:

$$P_{ц} = \frac{D_{ца} - D_{цб}}{D_{цб}}; \quad (3)$$

в) показатель экстракции:

$$P_{эк} = \frac{D_a^{700} - D_b^{700}}{D_b^{700}}; \quad (4)$$

г) показатель кислотности:

$$P_{к} = \frac{P_{pHa} - P_{pHb}}{P_{pHb}}; \quad (5)$$

д) показатель электропроводности:

$$P_{эл} = \frac{P_{Eca} - P_{Ecb}}{P_{Ecb}}, \quad (6)$$

где $D_{ма}$, $D_{мб}$; $D_{ца}$, $D_{цб}$; D_a^{700} , D_b^{700} ; P_{pHa} , P_{pHb} ; P_{Eca} , P_{Ecb} – мутность; цветность; оптическая плотность (длина волны $\lambda = 700$ нм); кислотность и электропроводность системы «субстрат – раствор» в опытном и контрольном вариантах соответственно.

Определение удельных показателей позволяет оценить абсолютное и относительное изменение характеристик, приходящееся на единицу затраченной энергии (МДж/м²):

а) удельный показатель мутности – абсолютный $p_{ма}$ и относительный $p_{мо}$:

$$p_{ма} = \frac{D_{ма} - D_{мб}}{\Delta W}, \quad p_{мо} = \frac{P_{м}}{\Delta W}; \quad (7)$$

б) удельный показатель цветности – абсолютный $p_{ца}$ и относительный $p_{цо}$:

$$p_{ца} = \frac{D_{ца} - D_{цб}}{\Delta W}, \quad p_{цо} = \frac{P_{ц}}{\Delta W}; \quad (8)$$

в) удельный показатель экстракции – абсолютный $p_{эка}$ и относительный $p_{эко}$:

$$p_{эка} = \frac{D_a^{700} - D_b^{700}}{\Delta W}, \quad p_{эко} = \frac{P_{эк}}{\Delta W}; \quad (9)$$

г) удельный показатель кислотности – абсолютный $p_{ка}$ и относительный $p_{ко}$:

$$p_{ка} = \frac{P_{pHa} - P_{pHb}}{\Delta W}, \quad p_{ко} = \frac{P_k}{\Delta W}; \quad (10)$$

д) удельный показатель электропроводности – абсолютный $p_{эла}$ и относительный $p_{эло}$:

$$p_{эла} = \frac{P_{Eca} - P_{Ecb}}{\Delta W}, \quad p_{эло} = \frac{P_{эл}}{\Delta W}, \quad (11)$$

где ΔW – энергия, затраченная на процесс ультразвуковой обработки субстрата, МДж/м².

Ультразвуковая обработка субстрата влияет на характеристики корнеобитаемой среды и, соответственно, на условия минерального питания кормовых растений, что сказывается на взаимодействии звеньев трофической цепи. В связи с этим предлагается ввести оценочные показатели, позволяющие определить изменение характеристик конечного продукта технологических процессов, связанных с процессом УЗ-обработки субстрата. Так, для технологического процесса выращивания кормовых растений оценочными показателями конечного продукта являлись относительные изменения (по сравнению с контролем) биомассы, высоты растений и энергоёмкости.

Для технологического процесса разведения энтомофагов оценочными показателями конечного продукта являются показатель выхода биопродукта и показатели качества биопродукта ($K_{аб}$), которые определяются по существующим методикам. Показатель выхода биопродукта и оценочные показатели разработанной технологии гидропонного овощеводства представлены в главе 3.

На протекание процесса ультразвуковой обработки субстрата наряду со свойствами среды большое влияние оказывают технологические параметры режима обработки (частота, интенсивность, продолжительность воздействия, температура), от которых зависят основные характеристики звукового поля (звуковое давление; колебательная скорость частиц; колебательное смещение частиц; плотность звуковой энергии и т.д.). Для определения физических характеристик процесса ультразвуковой обработки субстрата использовался известный теоретический материал (таблица 1) [3; 69; 111–113; 121].

Таблица 1 – Физические характеристики ультразвукового поля

№	Физическая величина	Условное обозначение	Ед. измерения	Расчетная формула
1	Скорость звука при температуре t	c	м/с	$c = c_0 + \alpha (t - t_0)$, где c_0 – скорость звука при температуре $t_0 = 25$ °С; α – температурный коэффициент
2	Звуковое давление (амплитудное значение)	P_A	Па	$P_A = \rho c v$, где ρ – плотность среды; v – амплитуда колебательной скорости
3	Колебательная скорость частиц (амплитудное значение)	v_0	м/с	$v_0 = \omega A$, где ω – циклическая частота; A – амплитуда колебательного смещения
4	Колебательное смещение (амплитудное значение)	A	м	$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}$, где I – интенсивность ультразвуковых колебаний
5	Избыточная плотность (амплитудное значение)	ρ_0	кг/м ³	$\rho_0 = \frac{P_A}{c}$
6	Колебательное ускорение (амплитудное значение)	a	м/с ²	$a_0 = \omega^2 A$
7	Длина волны	λ	м	$\lambda = \frac{c}{f}$, где f – частота колебаний
8	Модуль объемной упругости	K_y	Н/м ²	$K_y = c^2 \rho$
9	Удельный акустический импеданс	z	Н·с/м ³	$z = \rho c$
10	Эффективное звуковое давление	$P_{эф}$	Па	$P_{эф} = \sqrt{\frac{P_A^2}{2}} = \frac{P_A}{\sqrt{2}}$
11	Объемная плотность энергии	w	Дж/м ³	$w = \frac{I}{c} = \frac{\rho v_0^2}{2}$

При рассмотрении процессов кавитации в единичной полости на основании известного теоретического материала определяются следующие физические характеристики.

Термодинамические характеристики [3; 54; 69; 111]:

1. Критический радиус пузырька:

$$R_{\text{кр}} = \frac{4\sigma}{3(0,7P_A + P_{\text{п}} + P_0)}, \quad (12)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости;

$0,7P_A$ – среднее за период звуковое давление;

$P_{\text{п}}$ – давление насыщенного пара;

P_0 – гидростатическое давление.

2. Резонансный радиус пузырька:

$$R_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}}, \quad (13)$$

где f – частота ультразвука;

γ – показатель адиабаты.

3. Максимальный радиус пузырька:

$$R_{\text{max}} = \frac{0,4}{f} \left(1 - \frac{P_0}{P_A}\right) \sqrt{\frac{P_A}{\rho}}. \quad (14)$$

4. Минимальный радиус пузырька:

$$R_{\text{min}} = \frac{1,2P_{\text{п}} \left(1 - \frac{P_0}{P_A}\right)}{f \sqrt{\rho P_A} \left[2,9 \frac{P_0}{P_A} - 3,4 \left(\frac{P_0}{P_A}\right)^2 + 0,6\right]}. \quad (15)$$

5. Продолжительность захлопывания кавитационной полости:

$$\Delta t_{\text{min}} = \frac{0,36}{f} \left(1 - \frac{P_0}{P_A}\right) \sqrt{\frac{1}{2,9 \frac{P_0}{P_A} - 3,4 \left(\frac{P_0}{P_A}\right)^2 + 0,6}}. \quad (16)$$

6. Продолжительность процесса расширения:

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{0,4}{f} \left(1,9 - \frac{P_0}{P_A}\right). \quad (17)$$

7. Радиус кавитационного пузырька, при котором скорость сжатия достигает максимального значения:

$$r_{\text{кр}} \approx 1,33R_{\text{min}}. \quad (18)$$

8. Максимальное давление газа в полости (при минимальном радиусе полости R_{min}), Па:

$$P_{\text{max}} = \frac{3}{2}v_{\text{max}}^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}\rho^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (19)$$

где v_{max} – максимальная скорость, достигаемая в стадии схлопывания.

9. Конечная температура при захлопывании полости:

$$T_{\text{max}} = T_1 \left(\frac{P_{\text{max}}}{P_n} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (20)$$

где T_1 – начальная температура при захлопывании полости.

10. Присоединенная масса жидкости:

$$\Delta m = \frac{4}{3}\pi R_{\text{max}}^3 \rho. \quad (21)$$

Характеристики, связанные с электрокинетическими явлениями, при определении которых учитывается расщепление кавитационных пузырьков.

11. Заряд осколочного пузырька, образующегося при расщеплении кавитационной полости:

$$Q = \frac{A_0}{B_0} [1 - \exp(-B_0 t)]; \quad (22)$$

$$A_0 = \frac{\pi \epsilon \epsilon_0 \xi r_{\text{ш}}}{\eta l} \left(\sigma + \frac{16}{3} \pi^2 f^2 A \rho \frac{R_0^3}{r_{\text{ш}}} \right); \quad (23)$$

$$B_0 = \frac{\pi r_{\text{ш}}^2}{\lambda_3 \epsilon_0 R_0^2}, \quad (24)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость;

ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ξ – электрокинетический потенциал;

$r_{\text{ш}}$ – радиус шейки;

l – длина шейки;

R_0 – радиус осколочного пузырька.

12. Поверхностная плотность заряда:

$$\sigma_{\text{эл}} = \frac{Q}{S}, \quad (25)$$

где S – площадь поверхности осколочного пузырька.

13. Нормальная составляющая напряженности электрического поля у заряженного слоя поверхности осколочного пузырька:

$$E_n = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r_{\text{ш}}^2}. \quad (26)$$

Под действием ультразвука в технологическом объеме обрабатываемой жидкости возникает кавитационная область. Степень развитости кавитации характеризуется индексом кавитации, который использовался для определения удельного акустического импеданса и эффективного звукового давления в кавитирующей жидкости [3; 54]:

$$\frac{\rho_k c_k}{\rho c} \approx \left(\frac{\beta_0}{K_k \beta_n} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (27)$$

где ρ_k , c_k и ρ , c – соответственно плотность и скорость звука в среде при наличии и отсутствии кавитации;

β_0 – сжимаемость жидкости;

β_n – сжимаемость парогазовой смеси в кавитационной полости.

В соответствии с рабочей гипотезой применение ультразвука позволит увеличить выход биопродукта и приведет к повышению урожайности овощей и снижению энергоемкости продукции. Проведенное сравнение элементов технологических схем гидропонного овощеводства позволило установить, что в предлагаемом варианте предусматривается ультразвуковая обработка субстрата; для выращивания кормовых растений и разведения энтомофага *A. colemani* используется субстрат, состоящий из минеральной ваты и торфопилочной смеси; выпуск энтомофагов осуществляется путем переноса в теплицы мобильных газонов.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» показано, что программой экспериментальных исслед-

дований предусматривалось подтверждение рабочей гипотезы, достижение намеченной цели и решение поставленных задач. Экспериментальные исследования проводились при выращивании огурца сорта «Демарраж». Поддержание требуемых параметров микроклимата в воздушной и корнеобитаемой среде растений осуществлялось с помощью соответствующих систем (системы управления микроклиматом и системы полива и дозирования удобрений) ООО НПФ «ФИТО».

Для оценки эффективности использования ультразвука в биологической защите растений была разработана методика, позволяющая определить изменение энергоёмкости производства биопродукта, производства овощей и числа основных технологических операций. В соответствии с данной методикой энергетическая эффективность выражалась показателем снижения энергоёмкости производства продукции:

$$\mathcal{E}_3 = \frac{E_a - E_b}{E_a}, \quad (28)$$

где E_a , E_b – энергоёмкость производства продукции (овощей и биопродукта) в контрольном и опытном вариантах соответственно.

Технологическая эффективность оценивалась показателем сокращения числа основных операций:

$$\mathcal{T}_3 = \frac{N_a - N_b}{N_a}, \quad (29)$$

где N_a , N_b – число основных технологических операций в контрольном и опытном вариантах производства продукции (овощей и биопродукта) соответственно.

Хозяйственная эффективность производства биопродукта характеризовалась с помощью показателя, зависящего от численности энтомофагов на одном мобильном газоне [101]:

$$\mathcal{P}_6 = \frac{K_a - K_b}{K_b}, \quad (30)$$

где K_a , K_b – количество энтомофагов на одном мобильном газоне в опытном и контрольном вариантах соответственно.

В четвертой главе *«Результаты экспериментального определения режимов ультразвуковой обработки гидропонного субстрата*

и параметров устройства для ее реализации» указано, что рассчитанные значения физических характеристик процесса ультразвуковой обработки могут использоваться для сравнения, выбора и разработки эффективных методов и технических средств подготовки гидропонных субстратов (таблицы 2, 3).

Анализ результатов (таблица 2) позволяет сделать вывод о том, что в обрабатываемом субстрате возникают нелинейные (вторичные эффекты) и, в частности, кавитация. Представленные результаты использовались при определении физических характеристик единичной кавитационной полости (таблица 3) и кавитационной области.

Таблица 2 – Физические характеристики процесса ультразвуковой обработки субстрата

№ п/п	Наименование физической характеристики	Условное обозначение	Ед. измерения	Значение
1	Акустическое число Маха	M	–	10^{-4}
2	Объемная плотность энергии	w	Дж/м ³	16,84
3	Эффективное звуковое давление	$P_{эф}$	МПа	0,19
4	Звуковое давление	P_A	МПа	0,27
5	Акустический импеданс (удельный)	z	кН·с/м ³	1632,95
6	Избыточная плотность	ρ_0	кг/м ³	0,12
7	Модуль объемной упругости	K_y	МН/м ²	2,42
8	Длина волны	λ	мм	67,42
9	Колебательное ускорение	a_0	км/с ²	22,91
10	Колебательная скорость	v_0	м/с	0,17
11	Колебательное смещение	A	мкм	1,20

Таблица 3 – Физические характеристики единичной кавитационной полости

№ п/п	Наименование физической характеристики	Условное обозначение	Ед. измерения	Значение
Термодинамические характеристики				
1	Звуковое давление	P_A	МПа	0,27
2	Отношение гидростатического и звукового давлений	P_0/P_A	–	0,37

Окончание таблицы 3

№ п/п	Наименование физической характеристики	Условное обозначение	Ед. измерения	Значение
3	Критический радиус пузырька	$R_{кр}$	мкм	1,10
4	Резонансный радиус пузырька	$R_{рез}$	мкм	77,00
5	Отношение минимального и максимального радиусов пузырька	R_{min}/R_{max}	–	0,034
6	Продолжительности фазы захлопывания	Δt_{min}	мкс	6,10
7	Продолжительности фазы расширения	Δt_{max}	мс	0,028
8	Время рэлеевского схлопывания пустого пузырька	τ_0	мкс	57,70
9	Радиус кавитационного пузырька, при котором скорость сжатия достигает максимального значения	$r_{кр}$	мкм	8,64
10	Максимальное давление в полости	P_{max}	МПа	325,93
11	Конечная температура при захлопывании полости	T_{max}	К	5713,50
12	Доля периода, приходящаяся на стадию захлопывания	d	–	0,14
13	Присоединенная масса жидкости	Δm	мкг	0,03
14	Радиус кавитационной полости	\bar{R}	мкм	100,40
Критерии интенсивности кавитации				
15	Эрозионная активность	x	–	186110,0
16	Параметр газосодержания	δ	–	0,01
Характеристики, связанные с электрокинетическими явлениями				
17	Заряд осколочного пузырька	Q	пкКл	0,86
18	Поверхностная плотность заряда	$\sigma_{эл}$	Кл/м ²	$1,70 \cdot 10^{-4}$
19	Нормальная составляющая напряженности электрического поля заряженного слоя поверхности осколочного пузырька	E_n	В/м	$1,50 \cdot 10^{10}$

Анализ полученных результатов (таблица 3) позволяет сделать следующие выводы: не происходит вырождение кавитационных

пузырьков, образующихся в процессе ультразвуковой обработки субстрата, в пульсирующие; физические характеристики кавитационной полости и критерии интенсивности кавитации имеют значения, близкие к апробированным в предшествующих исследованиях, что подтверждает высокую эрозионную активность кавитационных пузырьков; выполняется условие возникновения лавинной ионизации при пробеге кавитационного пузырька.

Проведенные расчеты показывают, что в кавитационной области происходит значительное изменение акустического импеданса z_k и, следовательно, звукового давления $P_{Ак}$. Значения $P_{Ак}$ и z_k уменьшаются по мере возрастания степени развитости кавитации (то есть индекса K_k). В среднем за период ($K_k = 0,1$) в кавитационной области звуковое давление и акустический импеданс уменьшаются в 30 раз.

Рассмотренные физические характеристики оказывают влияние на конечный результат технологического процесса ультразвуковой обработки субстрата. Под действием ультразвука происходит изменение электрофизических и спектрально-оптических характеристик системы «субстрат – раствор», что указывает на протекание процессов диспергирования, извлечения питательных элементов и экстракции гуминовых веществ (рисунки 2–4).

Выявленные закономерности позволяют определять электропроводность, кислотность, мутность и цветность корнеобитаемой среды кормовых растений при различной продолжительности ультразвуковой обработки субстрата.

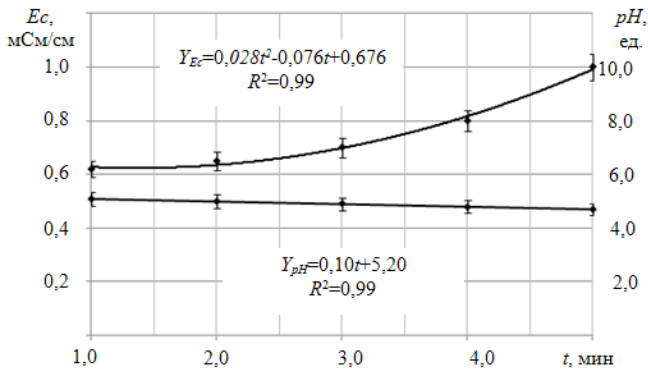


Рисунок 2 – Изменение электрофизических характеристик системы «субстрат – раствор» в результате ультразвуковой обработки

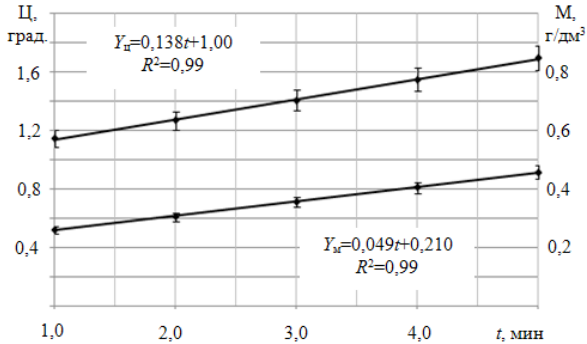


Рисунок 3 – Изменение спектрально-оптических характеристик системы «субстрат – раствор» в результате ультразвуковой обработки

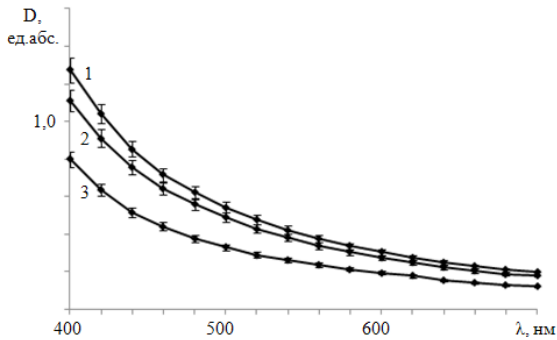


Рисунок 4 – Спектры системы «субстрат – раствор», полученной в результате УЗ-обработки продолжительностью 5 (1), 4 (2) и 3 (3) минуты

Анализ результатов расчета предложенных оценочных показателей позволил установить, что использование ультразвука способствует интенсификации подготовки субстрата и выращивания кормовых растений. При УЗ-обработке субстрата в течение 5 минут было достигнуто максимальное превышение контрольного уровня: на 118,2% по мутности; 63,5% – по цветности; 123,6% – по скорости экстракции; 10,1% – по кислотности и 66,7% – по электропроводности. Для данной продолжительности УЗ-обработки отмечено снижение общей численности микроорганизмов на 20,7% по сравнению с контролем, что указывает на улучшение условий для последующего разведения энтомофагов. Расчет удельных показателей позволил

установить, что изменения электрофизических и спектрально-оптических характеристик, приходящиеся на единицу затраченной энергии, незначительно различаются по вариантам. На 1 МДж подведенной энергии приходится (в среднем) изменение мутности на 0,033 мг/дм³ (15,7%); цветности – на 0,08 град. (7,8%); оптической плотности – на 0,12 ед. абс. (21,6%); кислотности – на 0,068 ед. рН (1,3%). Наибольшие затраты энергии связаны с изменением кислотности системы «субстрат – раствор», что учитывалось при разработке технологической схемы гидропонного овощеводства.

Результаты многофакторного эксперимента, проведенного по методике активного планирования, позволили получить уравнения регрессии, значимые на уровне $p = 0,05$ и адекватно описывающие отклик кормовых растений и выход биопродукта на ультразвуковую обработку субстрата (для продолжительности УЗ-обработки 4...6 минут и интенсивности ультразвука 2,3...2,7 Вт/м²):

$$Y_1 = 5,6 - 0,3x_1^2 - 0,3x_2^2; \quad (31)$$

$$Y_2 = 3,4 - 0,2x_1^2 - 0,2x_2^2; \quad (32)$$

$$Y_3 = 1510 - 250x_1^2 - 260x_2^2, \quad (33)$$

где Y_1 , Y_2 , Y_3 – биомасса кормовых растений (на 1 мобильном газоне, г), высота кормовых растений, см, выход биопродукта, шт. имаго (с 1 мобильного газона) соответственно;

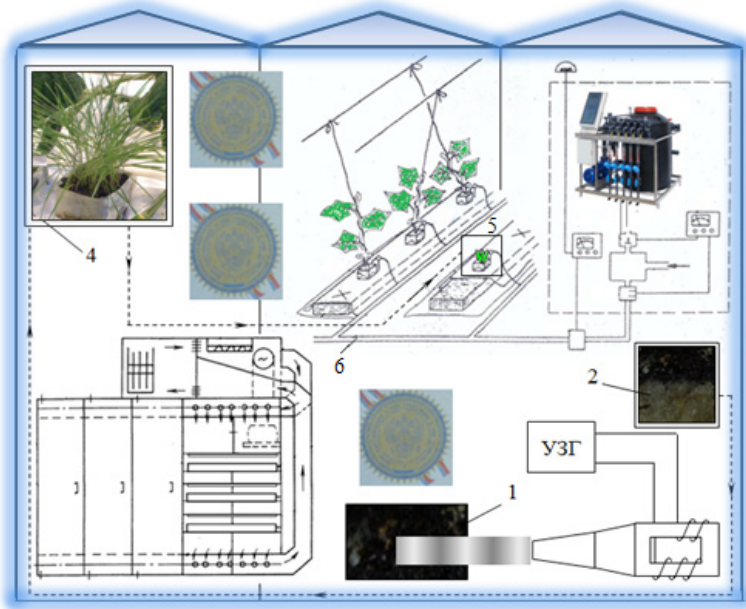
x_1 , x_2 – продолжительность и интенсивность ультразвуковой обработки субстрата соответственно.

Анализ выражений (31)–(33) позволил определить, что для достижения максимального отклика биообъектов следует осуществлять ультразвуковую обработку субстрата в следующем режиме: частота $f = 22$ кГц, интенсивность $I = 25$ кВт/м², продолжительность $t = 5$ мин. В этом случае превышение контрольного варианта, не предусматривающего УЗ-обработку гидропонного субстрата, составило по биомассе и длине кормовых растений – 11...13%; по выходу биопродукта – 40...50%.

Сравнение различных вариантов использования ультразвука в биологической защите растений показало, что ультразвуковая обработка гидропонного субстрата в указанном режиме способствует получению наибольшего выхода биопродукта и урожайности огур-

ца, что приводит к максимальному снижению энергоемкости получаемой продукции.

В пятой главе «Разработка энергосберегающей технологии гидропонного овощеводства, включающей в себя использование ультразвука в биологической защите растений» показан предложенный способ производства биопродукта, представлена энергосберегающая технология гидропонного овощеводства и технические средства, разработанные для ее реализации (рисунок 5).



- 1 – УЗ-обработка субстрата, предназначенного для выращивания кормовых растений и разведения *A. colemani*; 2 – органо-минеральный субстрат;
 3 – установка для разведения *A. colemani*; 4 – мобильный газон из кормовых растений с энтомофагом; 5 – размещение в гидропонных теплицах мобильных газонов из кормовых растений с *A. colemani*;
 6 – использование единой системы капельного орошения для полива защищаемых растений и мобильных газонов с энтомофагом

Рисунок 5 – Отличительные особенности энергосберегающей технологии гидропонного овощеводства

Отличительными особенностями разработанной технологии гидропонного овощеводства являются (рисунок 5): УЗ-обработка органической составляющей оригинального субстрата, используемого для выращивания кормовых растений и разведения энтомофага *A. colemani*; размещение в гидропонных теплицах мобильных газонов из кормовых растений с *A. colemani*; использование единой системы капельного орошения для полива защищаемых растений и мобильных газонов с энтомофагом.

Производственные испытания позволили установить, что использование ультразвука в биологической защите растений в соответствии с разработанной технологией способствует существенному увеличению выхода биопродукта и повышению урожайности огурца.

Экономическая и энергетическая оценка, выполненная с использованием предложенной методики, показала преимущества разработанной технологии гидропонного овощеводства. В опытном варианте наблюдалось увеличение урожайности на 11,3% и выход биопродукта на 50%, что сказалось на снижении энергоемкости производства растениеводческой продукции и энергоемкости производства биопродукта на 10,3% и 33,3% соответственно. Сокращение числа основных операций при получении биопродукта составило 51,7%, при выращивании огурца – 28,3%. Повышение урожайности огурца отразилось на экономической эффективности разработанной технологии: себестоимость продукции снизилась на 9,8%, производительность труда выросла на 13,5%. Годовой экономический эффект (в расчете на 1000 м²) составил 641,5 тыс. руб.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для повышения эффективности гидропонного овощеводства целесообразным представляется использование ультразвука в биологической защите растений. Ультразвуковая обработка субстрата, используемого для выращивания кормовых растений и разведения энтомофага *A. colemani*, позволит улучшить условия минерального питания растений, активировать процессы их роста и развития, что будет способствовать активному взаимодействию звеньев цепи «субстрат – кормовое растение – фитофаг – энтомофаг», увели-

чению выхода биопродукта и приведет к повышению урожайности овощей и снижению энергоемкости продукции.

2. Разработанные показатели результативности технологических процессов (в том числе процесса ультразвуковой обработки субстрата), позволяющие оценить изменения характеристик конечного продукта и связанные с ними затраты энергии, могут использоваться при обосновании и разработке эффективных методов и технических средств биологической защиты растений в условиях гидропонного овощеводства.

3. Выявленные закономерности изменения электрофизических и спектрально-оптических характеристик системы «субстрат – растительный материал», указывающие на протекание процессов диспергирования, извлечения питательных элементов и экстракции гуминовых веществ, позволяют определять электропроводность, кислотность, мутность и цветность корнеобитаемой среды кормовых растений при различной продолжительности ультразвуковой обработки субстрата.

4. Математические модели, полученные с помощью методики активного планирования эксперимента, позволили установить, что для достижения наибольшего отклика кормовых растений и выхода биопродукта следует осуществлять УЗ-обработку гидропонного субстрата в следующем режиме: частота $f = 22$ кГц, интенсивность $I = 25$ кВт/м², продолжительность $t = 5$ мин. В этом случае превышение контрольного варианта, не предусматривающего УЗ-обработку гидропонного субстрата, составило по биомассе и длине кормовых растений 11...13%; по выходу биопродукта – 40...50%.

5. Разработанная энергосберегающая технология гидропонного овощеводства предусматривает использование ультразвука в биологической защите растений.

Разработанные технические средства позволяют реализовать УЗ-обработку субстрата, используемого для выращивания кормовых растений и разведения полезных насекомых; размещение в гидропонных теплицах мобильных газонов из кормовых растений с *A. colemani*; использование единой системы капельного орошения для полива защищаемых растений и мобильных газонов с энтомофагом.

Разработанная методика позволяет оценивать эффективность использования ультразвука в биологической защите растений.

6. Производственные испытания позволили установить технико-экономическую эффективность представленных разработок.

В опытном варианте урожайность огурца увеличилась на 11,3%, выход качественного биопродукта возрос на 50%, что сказалось на снижении энергоемкости производства растениеводческой продукции и энергоемкости производства биопродукта на 10,3% и 33,3% соответственно. Годовой экономический эффект (в расчете на 1000 м²) составил 641,5 тыс. руб.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Басарыгина, Е. М. Использование ультразвука в биологической защите растений [Текст] / Е. М. Басарыгина, Р. И. Панова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. – № 4. – С. 30–32.
2. Басарыгина, Е. М. Оценка эффективности использования ультразвука в биологической защите растений [Текст] / Е. М. Басарыгина, Р. И. Панова, Т. А. Путилова // Техника в сельском хозяйстве. – 2014. – № 4. – С. 10–12.
3. Басарыгина, Е. М. Оценочные показатели процесса ультразвуковой обработки гидропонных субстратов [Текст] / Е. М. Басарыгина, Р. И. Панова, Т. А. Путилова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – № 1. – С. 6–7.
4. Басарыгина, Е. М. Энергосберегающая технология гидропонного овощеводства [Текст] / Е. М. Басарыгина, Р. И. Панова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. – № 5. – С. 13–16.

Публикации в других изданиях

5. Басарыгина, Е. М. Методы и технические средства электро-технологии в биологической защите растений [Текст] / Е. М. Басарыгина, Р. И. Панова // Материалы ЛП междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2014. – Ч. 4. – С. 26–31.
6. Басарыгина, Е. М. Экологизированная защита растений в гидропонном овощеводстве [Текст] / Е. М. Басарыгина, Т. А. Путилова, Р. И. Панова // Вестник ЧГАА. – 2014. – Т. 67/1. – С. 5–8.
7. Панова, Р. И. Влияние ультразвука на электрофизические параметры системы «субстрат – раствор» [Текст] / Р. И. Панова

// Материалы ЛШ междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2014. – Ч. 4. – С. 26–31.

8. Панова, Р. И. Использование ультразвука для повышения эффективности биометода [Текст] / Р. И. Панова, Е. М. Басарыгина // Вестник ЧГАА. 2014. – Т. 70. – С. 116–119.

9. Панова, Р. И. Установка для выращивания энтомофагов [Текст] / Р. И. Панова, П. М. Трушин, Т. Н. Горяинова // Материалы ЛШ междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2013. – Ч. 4. – С. 37–41.

Авторские свидетельства, патенты

10. Пат. 131572 Российская Федерация, МПК А01К67/00. Установка для выращивания насекомых [Текст] / Ю. Б. Четыркин, Е. М. Басарыгина, Т. А. Путилова, Р. И. Панова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ЧГАА. – № 2013107865/10 ; заявл. 21.02.2013 ; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24. – 3 с.

11. Пат. 142506 Российская Федерация, А01К67/00. Установка для массовой наработки полезных насекомых [Текст] / Е. М. Басарыгина, Т. А. Путилова, Р. И. Панова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ЧГАА. – № 2014109492 ; заявл. 12.03.2014 ; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 3 с.

12. Пат. 142510 Российская Федерация, МПК А23К1/100, А01G31/00. Установка для выращивания растений [Текст] / Е. М. Басарыгина, Т. А. Путилова, Р. И. Панова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ЧГАА. – № 2014109563 ; заявл. 12.03.2014 ; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 33. – 3 с.

13. Пат. 142515 Российская Федерация, МПК А01К67/00. Садок для насекомых [Текст] / Е. М. Басарыгина, Т. А. Путилова, Р. И. Панова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ЧГАА. – № 2014109562 ; заявл. 12.03.2014 ; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 2 с.

Подписано в печать 30.03.2015. Формат 60×84/16
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № КЗ-4.

Отпечатано в ИПЦ ФГБОУ ВПО ЧГАА
454080, г. Челябинск, ул. Энгельса, 83