

рассматриваемых сечениях будут иметь различное значение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснов, И.Н. Определение коэффициента жесткости сосковой резины доильных аппаратов / И.Н. Краснов, С.Г. Красниченко // Эксплуатация и ремонт сельскохозяйственной техники, 1976. – № 3. – С. 126.
2. Передня, В.И. Технологии и оборудование для доения коров и первичной обработки молока: пособие / В.И. Передня, В.А. Шаршунов, А.В. Китун; под ред. В.А. Шаршунова. – Минск: Минсанта, 2016. – 975 с.

3. Шнейдер, В.Е. Краткий курс высшей математики: учеб. пособие для вузов / В.Е. Шнейдер, А.И. Слуцкий, А.С. Шумов. – М.: Высшая школа, 1972. – 640 с.

4. Способ определения параметров и конфигурации конструктивных элементов станда для испытания доильных аппаратов: пат. 2138157 РФ, МПК А01J7/00 / С.А. Соловьев, В.А. Шахов, Е.М. Асманкин, А.М. Асманкин, В.Н. Алексеев; заявитель Оренбургский гос. аграрн. ун-т; заявл. 20.05.1997, опубл. 27.09.1999.

5. Трубников, В.В. Сравнительная оценка современных доильных аппаратов: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / В.В. Трубников; Оренб. гос. аграрн. ун-т. – Оренбург, 2011. – 150 л.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.03.2017

УДК 534.838.7: 631.56

АКТИВАЦИЯ ЖИДКИХ СРЕД И ПРЕДПОСЕВНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПОЛЕМ

В.С. Корко,

доцент каф. электротехнологий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Е.А. Городецкая,

доцент каф. электротехнологий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

И.Б. Дубодел,

доцент каф. электротехнологий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Т.А. Непарко,

доцент каф. эксплуатации машинно-тракторного парка БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Ю.К. Городецкий, Е.Т. Титова,

студенты БГАТУ

Представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований основных проявлений ультразвуковых колебаний при активации жидких сред и предпосевной обработке семян для повышения всхожести и энергии прорастания.

Ключевые слова: ультразвук, предпосевная стимуляция, семена, диэлектрическая сепарация, электрофизическое воздействие.

The results of analytical and experimental studies of the main manifestations of ultrasonic oscillations during the activation of liquid media and presowing seed treatment for increasing germination and germination energy are presented.

Keywords: ultrasound, presowing stimulation, seeds, dielectric separation, electrophysical effect.

Введение

Все реакции в живых организмах происходят только в жидких средах, являющихся важным компонентом биологических систем и играющих главную роль в формировании физико-химических свойств молекул веществ, растворенных в воде. Физиологическое действие таких растворов определяется их химическим составом и физическими параметрами, характеризующими жидкую среду с энергетической точки зрения как сложную структурированную систему, свойства которой наиболее выражены после перехода ее в неравновесное термодинамическое состояние путем активации.

Активацию воды и растворов проводят с помощью физических, химических или биологических методов. Из физических методов эффективны воздействия магнитным и акустическим полем, ультрафиолетовым и лазерным излучением, электролизом, вакуумированием и др. [1, 2]. Развитие и применение ультразвуковых (УЗ) технологий открывает перспективы в создании новых веществ и материалов, придании известным материалам и средам нужных технологических свойств и поэтому требует исследования процессов, происходящих под действием УЗ.

Абиотические факторы при посеве семян не всегда благоприятны для нормального развития зародыша,

особенно в начальный период. Поэтому значительное количество семян некоторых культур, жизнеспособных, но не обладающих высокой жизненной активностью, не могут прорасти. Полевая всхожесть семян часто составляет 60-70 %, поэтому перед посевом их необходимо специально готовить для повышения всхожести, энергии прорастания и продуктивности [3].

Основными такими приемами являются: закаливание, замачивание, влаго- и воздушно-тепловая обработка, стратификация, обработка микробиологическими препаратами и др. [2, 3]. Применение стимуляторов дает хорошие результаты у семян, находящихся в неглубоком покое. Сложнее обстоит дело с твердосемянными культурами. Положительный эффект от обработки различными стимуляторами получают не у всех видов семян и не со всеми веществами. Комбинированные обработки производятся путем последовательного намачивания в разных растворах и только тогда, когда концентрация компонентов различается на порядок и более [3]. Затем семена необходимо подсушить.

Целью настоящей работы является исследование основных проявлений УЗ колебаний при активации жидких сред и предпосевной обработке семян для повышения всхожести и энергии прорастания.

Основная часть

Структурная схема УЗ технологического аппарата включает в себя электронный генератор с устройствами контроля, управления и согласования, колебательную систему (преобразователь, концентратор и излучатель) и технологическую среду.

Практическое применение УЗ технологий развивается в двух основных направлениях:

- применение волн малой интенсивности (до 10 кВт/м²) для контроля, измерений, исследований внутренней структуры материалов и изделий;
- применение высокоэнергетических колебаний – волн высокой интенсивности для активного воздействия на вещества, изменения их структуры и свойств, изменения скорости химических реакций [4...6].

При прохождении УЗ в жидкостях, а также биологических объектах, частицы среды совершают интенсивные колебательные движения с большими ускорениями. При этом на расстояниях, равных половине длины звуковой волны, в облучаемой среде могут возникать значительные разности давлений и сопутствующие механические, термические и физико-химические явления, в частности акустическая кавитация, интенсивное перемешивание, диспергирование, переменное движение частиц, интенсификация химических реакций, массообменных процессов и т.п. [1, 4, 5]. Воздействие УЗ с частотой 20...100 кГц характеризуется разделением молекул и ионов с различной массой, искажением формы волны, появлением переменного электрического поля, капиллярно-акустическим и тепловым эффектами, активацией диффузии.

Ультразвуковая кавитация – эффективное средство концентрации энергии акустической волны низкой

плотности в высокую ее плотность, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. В момент схлопывания пузырьков давление и температура газа достигают значительных величин (по некоторым данным – 100 МПа и 1000 °С), в результате чего в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве.

Для плоской синусоидальной бегущей волны интенсивность ультразвука, Вт/м² определяется уравнением [2]:

$$I = \frac{Pv}{2} = \frac{v^2 \rho c}{2}, \quad (1)$$

где P – амплитуда звукового давления, Па;
 v – амплитуда колебательной скорости частиц, м/с;
 ρ – плотность среды, кг/м³;
 c – скорость распространения ультразвука в данной среде (для воды $c = 1430$ м/с).

Процесс возникновения кавитационных пузырьков является цепной реакцией, т.е. за время в несколько десятков периодов УЗ колебаний кавитация развивается в стабильную область. Интенсивность и характер проявления эффектов зависят от частоты и интенсивности колебаний, а также от свойств самих сред. В частности, в воде при частоте 20 кГц кавитация возникает при интенсивности от $1 \cdot 10^4$ до $(3 \dots 10^4)$ Вт/м², а при частоте 500 кГц – более $200 \cdot 10^4$ Вт/м² [1, 2, 4].

Приращение свободной энтальпии кавитационных пузырьков равно [4]:

$$\Delta H = -H \Delta T + V \Delta P + \mu \Delta p, \quad (2)$$

где H и V – энтальпия и объем подсистемы;
 ΔT и ΔP – приращения температуры и давления;
 μ – химический потенциал пара в единице объема;
 Δp – относительное изменение давления.

В процессе расширения кавитационного пузырька можно считать, что $\Delta T = \Delta P = 0$. Тогда свободная энтальпия всех кавитационных полостей в единичном объеме

$$H = \mu \int_{I_n}^I V_i \frac{dN(I)}{dt} = \mu K \quad (3)$$

является линейной функцией кавитации.

Энергия УЗ поля, идущая на образование кавитационной области, затрачивается в течение всей фазы расширения кавитационного пузырька. Приняв это время равным периоду первичного УЗ T_0 , можно определить среднюю за период мощность, затраченную на образование всей кавитационной области

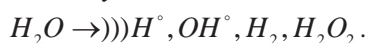
$$N_k = \frac{E_k}{T_0} = \eta \frac{E}{T_0} = N \eta, \quad (4)$$

где $\eta = \frac{E_k}{E}$ – коэффициент кавитационного использования акустической энергии;

E_k и E – соответственно, энергия, затраченная на создание кавитационной области, и полная энергия УЗ поля, Дж.

Таким образом, кавитационная область представляет собой своеобразный трансформатор мощности, в котором сравнительно медленно накапливаемая энергия освобождается в течение очень короткого времени, в результате чего мгновенная мощность во много раз превосходит среднюю, вводимую излучателем в кавитационную область. Энергии, выделяющейся в процессе захлопывания пузырька, достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной полости [5, 6].

Воздействие кавитации на водные растворы сводится к расщеплению молекул воды в кавитационных пузырьках. Независимо от природы растворенных веществ, воздействие УЗ энергии на воду приводит к изменению ее физико-химических свойств: увеличению pH, электропроводности воды, увеличению числа свободных ионов и активных радикалов, структуризации и активации молекул. Суммарная схема кавитационного расщепления молекул воды представляется в следующем виде:



Возникающие в системе активные частицы после перехода в раствор сольватируются и реагируют с растворенными веществами.

Таким образом, ультразвуковые колебания могут активировать жидкие среды и биологические системы, содержащие значительное количество жидкости, и применяться для осуществления ряда новых методов синтеза и ускорения происходящих в них медленных реакций.

Для экспериментальных исследований использовали УЗ установку УЗУ-0,25 с выходной мощностью – 250 Вт, рабочей частотой – 18 кГц.

В качестве объектов предпосевной УЗ обработки использовали семена подсолнечника (*Helianthus annuus*), кабачка-цуккини (*Cucurbita pepo* ssp. *pepo*) и хурмы (*Diospyros kaki* Thunb). Пробы с пятикратной повторностью, по 100 семян, помещенные в сеточки из капроновой нити, обрабатывали в УЗ ванне с водой при разных экспозициях (300, 600 и 900 с). Для проращивания образцы помещали в чашки Петри с увлажненной фильтровальной бумагой и выдерживали в термостатических условиях при температуре 21°C в соответствии с ГОСТ 30556-98. Проросшим считается семя с длиной ростка, равной половине длины семени.

Физические и энергетические параметры технологической УЗ установки рассчитывали по нижеприведенным формулам:

$$P_{ак} = \frac{mc(t_2 - t_1)}{\tau\eta}; \quad \eta_{ак} = \frac{P_{ак}}{P_2}; \quad W = \frac{mc(t_2 - t_1)}{V};$$

$$I = cW; \quad \cos \varphi = \frac{P_1}{UI_p}, \quad (5)$$

где $P_{ак}$ – акустическая мощность, Вт (без учета теплотеря в конструкциях установки);

m, c – соответственно масса, кг, и удельная теплоемкость воды в ванне, Дж/кг °С;

t_1, t_2 – начальная и конечная температура, °С;

τ – время обработки, с;

η – коэффициент полезного действия преобразователя;

$\eta_{ак}$ – акустический КПД;

P_2 – мощность генератора, Вт;

W – плотность энергии, Дж/м³;

V – объем воды в ванне, м³;

I – интенсивность УЗ, Дж/см²;

c – скорость распространения УЗ колебаний в воде, м/с;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности установки;

P_1 – мощность, потребляемая из сети, Вт;

U – питающее напряжение, В;

I_p – рабочий ток, А.

В результате исследований, с помощью кавитометра установлена существенная неравномерность уровня кавитации в воде во всех направлениях от излучателей и зависящая от наличия экранирующих предметов. Зона максимума кавитации наблюдается на расстоянии 0,02...0,03 м от излучателей, расположенных на дне ванны, и затем происходит ее ослабление практически по экспоненциальному закону с удалением от излучателей. Абсолютное значение уровня кавитации вблизи поверхности воды в 2,5...3 раза ниже максимума. При распространении УЗ колебаний возникает распределенное в пространстве поле звуковых давлений, имеющее три области: ближнее поле (0...0,04 м); область расстояний, сравнимых с размерами излучающей поверхности и длиной волны (0,04...0,08 м); дальнее поле (более 0,08...0,09 м). Это означает, что при УЗ обработке различных материалов в воде, их необходимо располагать в зоне с достаточным уровнем кавитации.

Сравнимость геометрических размеров излучающего рабочего элемента и объема технологической установки с длиной УЗ волны обуславливает ряд интерференционных явлений. Так, УЗ поле на расстояниях, сравнимых с длиной волны, характеризуется рядом максимумов и минимумов, расположенных на различных удалениях от излучателя.

В результате поглощения акустической энергии и кавитационных процессов возрастает энтальпия системы и происходит приращение температуры среды, т.е., в определенной степени, активация жидкости.

Количественные характеристики воздействующего фактора – УЗ колебаний на систему «жидкость-семена», рассчитанные по уравнениям (5), приведены в табл. 1.

Семена подсолнечника и кабачка, обработанные в УЗ поле с различной экспозицией, были поставлены на проращивание. Во всех опытных партиях наблюдается положительный эффект стимуляции всхожести семян: первые ростки подсолнечника и кабачка появились уже на 2-е сутки, более дружно – на 3-е сутки.

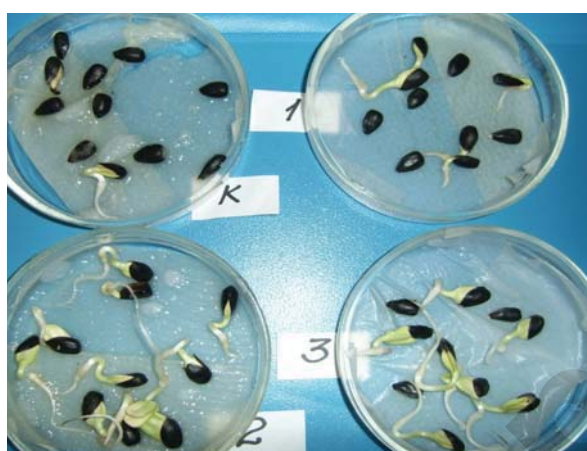
На рис. 1 представлены части семян в чашках Петри №№ 1, 2 и 3, которые были обработаны с выдержкой 300, 600 и 900 с, соответственно, и контрольные семена (К) после проращивания на 4-е сут-

Таблица 1. Физические и энергетические параметры технологической установки

Показатели	Длительность УЗ обработки, с		
	300	600	900
Акустическая мощность, $P_{ак}$, Вт	49,4	77,7	90,3
Плотность энергии, W , 10^3 Дж/м ³	8 000	24 872	43 793
Интенсивность УЗ, I , кВт/м ²	11 960	37 139	65 471
Акустический КПД, $\eta_{ак}$, о.е.	0,2	0,3	0,36
Коэффициент мощности, $\cos \varphi$, о.е.	0,68	0,74	0,72

ки. В контрольной партии семян подсолнечника и кабачка ростки начали появляться на 4-5-е сутки.

Анализ результатов эксперимента (рис. 1) показывает, что существенное влияние на интенсивность всхожести оказывает время воздействия УЗ поля,



а



б

Рисунок 1. Семена на 4-е сутки проращивания после УЗ обработки: а – подсолнечник; б – кабачок

причем, неоднозначное для исследуемых культур. В частности, для семян подсолнечника лучшими оказались образцы № 2 (все семена проросли и дали наибольший прирост корешков) и № 3 (большинство проросших семян дали прирост корешков). Для кабачка явно оказался лучшим режим обработки 600 с

(образец № 2), а в образцах № 1 и № 3 (300 и 900 с, соответственно) процесс прорастания только начался.

В дальнейшем для оценки проростков приняли наиболее эффективный режим обработки семян в течение 600 с. На рис. 2 представлены образцы проростков семян подсолнечника и кабачка на 5-е сутки.

Как видно из рис. 2, в контрольных образцах семян подсолнечника и кабачка на 5-е сутки имеются только небольшие корешки, тогда как в опытных партиях кабачка видна развитая стержневая корневая система и проростки, что подтверждает высокую эффективность данного режима УЗ обработки.

Твердосемянные культуры с низкой водопроницаемостью оболочек характеризуются длительной и относительно низкой всхожестью и энергией прорастания. Эксперимент по предпосевной УЗ обработке се-



а



б

Рисунок 2. Проростки семян подсолнечника (а) и кабачка (б) на 5-е сутки после УЗ обработки в течение 600 с

мян хурмы (*Diospyros kaki* Thunb) показал, что первые корешки появляются на 15-16-е сутки, а у контрольных – на 2-3-е суток позже (рис. 3). В условиях высокой влажности и значительной длительности проращивания хурмы видны разросшиеся споры гриба *Penicillium* spp., в опытных образцах они отсутствуют.



а



б

Рисунок 3. Проростки семян хурмы на 21-е сутки:
а – контрольный образец; б – после УЗ обработки
с экспозицией 600 с

В процессе УЗ обработки семена очищаются, как от механических загрязнений, так и от бактериальных инфекций. Дополнительный бактерицидный и стерилизующий эффекты оказывают проявления ультразвука (кавитация, диспергирование, термические и физико-химические действия). Таким образом, УЗ обработка оказывает комплексное биологическое воздействие: активацию жизнедеятельности семян и подавление нежелательной микрофлоры.

Заключение

Анализ результатов экспериментов свидетельствует о том, что под действием ультразвука жидкие

среды активируются, происходит изменение их физико-химических свойств. Движущей силой активации является кавитационный процесс, в котором выделяется мгновенная энергия, достаточная для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул.

Кавитация является многофакторным явлением, связанным с параметрами ультразвуковых волн и особенностями их распространения в среде, сопровождаемого затуханием, отражением, рассеянием ультразвука, и свойствами обрабатываемых материалов.

Ультразвуковое поле и кавитационная область в ванне с водой являются неоднородными. Максимальный уровень кавитации находится в непосредственной близости, но не на поверхности излучателей, и далее ослабляется по мере удаления от них.

Наряду с тепловыми эффектами в ультразвуковом поле в биологических средах наблюдаются механические, электрические и физико-химические эффекты, сочетание которых обеспечивает уникальность ультразвука как активирующего и дезинфицирующего фактора. При предпосевной УЗ обработке происходит обеззараживание семян, выведение их из состояния покоя, возбуждение жизненных сил зародыша, ведущих к повышению всхожести и энергии прорастания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.]. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 416 с.
2. Корко, В.С. Электрофизические методы стимуляции растительных объектов: монография / В.С. Корко, Е.А. Городецкая. – Минск: БГАТУ, 2013. – 232 с.
3. Основы растениеводства: учеб. пособие / И.П.Козловская [и др.]; под ред. И.П. Козловской. – Минск: Беларусь, 2010. – 328 с
4. Флинн, Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика / Г. Флинн; под ред. У. Мезона. – Москва: Мир, 1967. – Т. 1. – Ч. Б. – С. 7 – 138.
5. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение, 2001. – 260 с.
6. Шияев, А.С. Физические основы применения ультразвука в медицине и экологии: учеб.-методич. пособие / А. С. Шияев, С. П. Кундас, А. С. Стукин; под общ. ред. С. П. Кундаса. – Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2009. – 110 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 27.03.2017