

3. Богуславский Ю.Я. О кавитационной области в сходящейся сферической звуковой волне / Ю.Я. Богуславский // Акустический журнал. – 1968. – Т. 14, вып. 3. – С. 463-465.
4. Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. (теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов) Ч. I. / И.М. Федоткин, И.С. Гулый – К.: Полиграфкнига, 1997. – 838 с.
5. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: Київський університет, 2007. – 245 с.
6. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. Монографія / Т.М. Вітенько – Тернопіль: Видавництво ТДТУ ім. І Пулюя, 2009. – 224 с.
7. Низькочастотні віброрезонансні кавітатори / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган, В.Л. Старчевський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 176 с. – ISBN 978-617-607-509-7.
8. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Д. Дейли, Ф. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 687 с.
9. Пешковский С.Л. Исследования кавитационной области / С.Л. Пешковский, А.Д. Яковлев // Акустический журнал. – 1976. – Т. 22, вып. 3. – С. 422-426.
10. Розенберг Л.Д. Кавитационная область // Мощные ультразвуковые поля / Л.Д. Розенберг; [под ред. Л.Д. Розенберга]. – М.: Наука, 1968. – Ч. 6. – С. 221 – 266.
11. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи / Е. Кикучи, пер с англ. И.П. Галяминой. – М.: Мир, 1972. – 424 с.
12. Хорошев Г.А. О захлопывании паровоздушных кавитационных полостей / Г.А. Хорошев // Акустический журнал. – 1963. – Т. 9, вып. 3. – С. 340-346.
13. Берник І.М. Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки / І.М. Берник, О.Ф. Луговський // Вібрації в техніці та технологіях. – 2014. – № 3 (75). – С. 121-126.
14. Долинский А.А. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий; НАН Украины, Институт технической теплофизики. - Киев: Наукова думка, 2008. - 381 с.: рис. - (Проект "Наукова книга"). - Библиогр.: с.350-378. - ISBN 978-966-00-0773-4.

УДК 577.3

ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ

**Бошкова И.Л., канд. техн. наук, доц., Волгушева Н.В. канд. техн. наук, доц.
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса**

Представлена методика расчета допустимого времени микроволновой обработки семян с целью их биостимуляции. На примере семян пшеницы твердой получено, что допустимая длительность обработки уменьшается с ростом влагосодержания и с увеличением начальной температуры зерна. Показано, что микроволновая обработка в режимах биостимуляции сопровождается одновременной дезинсекцией.

Method of calculation of permissible time of microwave treatment of seed is presented with the purpose of their bio-stimulation. On the example of seed of wheat is got, that possible duration of treatment diminishes with the increase of dryness and of settemperature of grain. It is shown, microwave treatment in the modes of bio-stimulation is accompanied by simultaneous fumigation.

Ключевые слова: биостимуляция, микроволновое поле, растительная клетка, семена зерновых, допустимое время, насекомые-вредители

Исследования влияния микроволнового электромагнитного поля на семена агрокультур доказали, что при определенных условиях микроволновой обработки наблюдается значительное усиление энергии всхожести и прорастания, повышение сопротивляемости к неблагоприятным факторам окружающей среды, и, в конечном счете, увеличению урожая [1,2]. Гипотеза возникновения эффекта биостимуляции рассмотрена в [3], согласно которой данный эффект связан с улучшением транслокации питательных веществ к зародышу вследствие повышения проницаемости растительной ткани. Для оценки расчетным путем длительности экспозиции в микроволновой камере составлена методика, основанная на представлении процессов преобразования микроволновой энергии во внутреннюю и на анализе ультраструктуры

растительных клеток. Естественную структуру растительной клетки можно рассматривать как замкнутый объем, а комбинация таких клеток образует более сложную систему, в которой клетки контактируют с межклеточным пространством, образующим общую систему капиллярных каналов. И клеточные стенки, и мембраны в целом радиопрозрачны. Основное содержимое клеток составляет вода и растворы веществ на ее основе. Около 5 % от массы мембран составляет вода в связанном состоянии. Клеточная стенка вместе с плазматической мембраной (плазмалеммой) образуют замкнутый полупроницаемый объем. Сама по себе клеточная стенка (как правило, композиции на основе целлюлозы) содержит в своей структуре достаточно хорошо проходимые каналы (плазмодесмы), которые сообщаются с межклеточным пространством или другими клетками. При среднем определяющем размере клетки $4 \cdot 10^{-5}$ м толщина клеточной стенки составляет $4 \cdot 10^{-7}$ м, диаметр каналов $10^{-7} \dots 10^{-8}$ м. Высокие прочностные свойства стенки определяются упорядоченностью молекулярных цепочек полимеров целлюлозы. Можно представить клетку как замкнутый объем, а система (ансамбль) клеток представляют собой структуру, которая объединяет множество замкнутых объемов. Основное сопротивление массопереносу из объема клетки за ее пределы (а, следовательно, и всему процессу экстракции) составляют плазматические мембраны (плазмалеммы), обладающие собственной устойчивой высокоупорядоченной структурой и функционально регулирующие массо- и энергообмен клетки с окружающей ее средой, размер (толщина) мембран растительных структур порядка 0,1 нм. Клеточная мембрана эластична, через нее осуществляется поступление питательных веществ и жидкости в клетку и вывод продуктов жизнедеятельности путем диффузии и осмоса.

На основании гипотезы определяющего влияния МВ поля на транспортные свойства растительной ткани, была создана методика, позволяющая оценить допустимое время воздействия МВ поля на обрабатываемый биологический материал. Представляется следующая схема протекания процессов в семенах при их МВ обработке. Вначале протекает квазиизобарный процесс в объеме растительной клетки. В то же время в замкнутых микрообъемах, содержащих молекулы воды, стремительно растет давление, что приводит к расширению микрофибрилл, вызывая увеличение проницаемости капиллярно-пористой структуры растительной ткани. При дальнейшем подводе МВ энергии, когда клетки уже не в состоянии увеличивать свой объем, начинается нарастание давления в цитоплазме, что в конечном счете приводит к нарушению целостности клеточных оболочек. Дальнейшее пребывание семян под действием МВ ЭМП приводит к перегреву, способного нарушить структуру белковых молекул, выносу жидкости и растворенных веществ под действием градиента температуры и давления за пределы зерна, карамелизации сахаров. Последние режимы являются недопустимыми.

В общем виде расчет предлагается проводить по следующему алгоритму.

1. Для каждой расчетной единицы определить максимально допустимый объем V_K - т.е. тот объем, который может быть достигнут при термическом расширении цитоплазмы.

2. Изменение температуры в процессе увеличения объема от V_0 до V_K определяется из соотношения: $\Delta t = \frac{V_K - V_0}{\beta V_0}$, где β - коэффициент температурного расширения воды с учетом влагосодержания расчетной единицы.

3. Определяется количество теплоты, поглощенной в этом процессе:

$$Q = Mc_p \Delta t + P \Delta V, \text{ Дж} \quad (1)$$

Для дальнейших расчетов с целью повышения точности рекомендуется пользоваться зависимостью, которая позволяет определить количество теплоты, затраченное на нагрев всего объема зерна массой M до расчетной температуры:

$$Q = M \cdot c \cdot \Delta t, \text{ Дж} \quad (2)$$

4. Время, в течение которого это тепло было получено:

$$\tau = Q / (q \cdot V), \text{ с;} \quad (3)$$

где V - объем материала, $q = 0.556 \cdot 10^{-10} \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta \cdot E^2$, Вт/м³.

В течение этого времени рост давления не будет представлять опасности для организма, и, если температура не достигает критического значения, семена проходят стадию биостимуляции.

Далее клеточные стенки (оболочки) не в состоянии увеличивать свой объем. Внутри объекта при дальнейшем подводе энергии МВ поля начинает резко расти давление. В целом же теплота идет на увеличение температуры тела и изменение давления согласно первому закону термодинамики:

$$Q = \Delta H - V \Delta P, \text{ Дж} \quad (4)$$

Связь температуры и давления можно задать только приближенно, т.к. уравнения состояния таких сложных смесей как цитоплазма не существует. В первом приближении расчет рекомендуется проводить, приняв свойства цитоплазмы равными свойствам воды.

Пользуясь этими зависимостями, были проведены расчеты, целью которых было определение температуры и давления в конце процесса обработки в зависимости от влагосодержания и времени воздействия. При расчете давления предполагалось, что оболочки тела жестко фиксированы клеточными стенками, т.е. случай, наиболее характерный для спор и склеротий. Расчет носит оценочный характер, однако позволяет предсказать реакцию биологического объекта на МВ-поле.

Объем растительной клетки зародыша зерна по данным [4] ориентировочно составлял $V_0 = 3,35 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$. Максимально допустимый объем клетки, оценка которого проведена по данным [4], составляет $V_K = 3,366 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$. Тогда изменение температуры:

$$\Delta t = \frac{V_K - V_0}{\beta \cdot \bar{V}} = \frac{0,016 \cdot 10^{-14}}{2,86 \cdot 10^{-4} \cdot 3,358 \cdot 10^{-14}} = 16,7^\circ\text{C},$$
 и при начальной температуре $t = 20^\circ\text{C}$ конечная температура составит $t_K = 36,7^\circ\text{C}$.

Теплоемкость зерна пшеницы определяется по зависимости:

$$c = 0,01[c_0(100 - w) + c_g \cdot w] \quad (5)$$

где w - влажность зерна, c_0 - теплоемкость сухого материала.

Для пшеницы с влажностью $w = 14\%$:

$$c = 0,01[1470(100 - 14) + 4200 \cdot 14] = 1852 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

При массе загрузки 1 кг теплота нагрева:

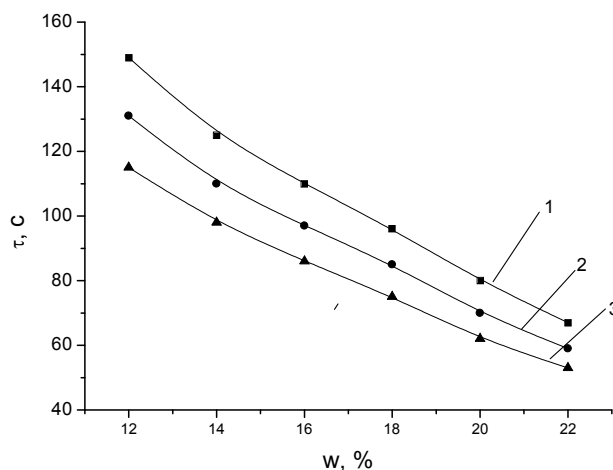
$$Q = M \cdot c \cdot \Delta t = 1 \cdot 1852 \cdot 26,2 = 48522 \text{ Дж}$$

Время, в течение которого это тепло было получено (мощность источника микроволнового поля – 1 кВт, объем загрузки камеры – $1,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$):

$$\tau = Q / (q \cdot \bar{V}) = 48522 / (489587 \cdot 1,15 \cdot 10^{-3}) = 86 \text{ с};$$

Аналогично рассчитываются данные для других значений. Ниже приведены результаты расчетов, полученные для описанных выше исходных данных при разных влагосодержаниях.

На рис. 1 представлены результаты расчета граничной кривой по времени обработки семян пшеницы в микроволновой камере при выходной мощности магнетрона 1 кВт в зависимости от влажности.



1 – начальная температура 10°C , 2 – начальная температура 15°C , 3 – начальная температура 20°C
Выходная мощность магнетрона – 1 кВт.

Рис. 1 – Допустимое время микроволновой обработки семян пшеницы в зависимости от влажности

Начальная температура материала оказывает существенное влияние на значение допустимого времени обработки, что связано с зависимостью от температуры диэлектрических характеристик и коэффици-

ента объемного (температурного) расширения. При расчете предполагалось, что начальная температура зерна и температура окружающей среды одинаковы.

При расчете учитывалось изменение диэлектрических характеристик в зависимости от влагосодержания. Для пшеницы твердых сортов эти значения, используемые в работе, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Диэлектрические характеристики зерна пшеницы твердой при различном влагосодержании ($t=+22\text{ }^{\circ}\text{C}$)

№ п/п	Влагосодержание u , %	ε'	$\lg \delta$	ε''
1	13,0	7,81	0,23	1,80
2	14,0	8,57	0,24	2,06
3	16,1	9,04	0,26	2,35
4	17,2	9,34	0,27	2,52
5	19,2	9,86	0,28	2,76
6	22,0	10,8	0,30	3,24
7	24,3	13,7	0,28	3,84
8	25,4	15,6	0,27	4,12
9	27,5	17,3	0,28	4,84

Расчеты удовлетворительно коррелируются с результатами, полученными при лабораторных и полевых испытаниях семян [5].

Часто обрабатываемые семена содержат насекомых-вредителей и фитопатогены, влияние на которых микроволнового излучения будет различно. Для расчета повышения температуры каждый из биообъектов должен рассматриваться отдельно. Особенности этих объектов, учитываемые при проведении расчетов, приведены в табл. 2. Насекомые-вредители, влажность которых существенно выше, за время, в течение которого семена находятся в безопасной для своей жизнедеятельности области, нагреются до недопустимо высокой температуры.

Таблица 2 – Биологические объекты, подвергающиеся воздействию микроволнового поля

Биологический объект		
Фитопатогены	Семена	Насекомые-вредители
Спора, окруженная жесткой оболочкой гифа	Растительная клетка, окруженная клеточной стенкой	Насекомое как целое без учета его внутренней структуры

Температура насекомых-вредителей, достигаемая за заданный промежуток времени, определяется формулой:

$$t_n = q \cdot V_n \cdot \tau / (m_n \cdot c_n) + t_0 \quad (6)$$

где $m_n = 3,02 \cdot 10^{-6}$ кг (ориентировочный вес амбарного долгоносика). Электрофизические свойства насекомых при влагосодержании $W = 60\%$: $\varepsilon' = 48$, $\lg \delta = 0.33$; $W = 80\%$: $\varepsilon' = 64$, $\lg \delta = 0.25$. Из-за высокого влагосодержания термические эффекты развиваются очень быстро. Так, в течение 85 с (длительность выдержки семян с влажностью 12 %), и принимая $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура насекомых достигнет следующего значения:

$$t_n = 522600 \cdot 6,86 \cdot 10^{-9} \cdot 115 / (3,02 \cdot 10^{-6} \cdot 3200) + 20 = 63\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Результаты расчетов конечных температур, достигаемых при обработке семенного материала при длительности нахождения в МВ поле, определенной по изложенной выше методике, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Влияние начальной температуры зернового материала на конечную температуру амбарного долгоносика

Начальная температура, $^{\circ}\text{C}$	Длительность обработки, с	Конечная температура, $^{\circ}\text{C}$		
		Амбарный долгоносик <i>Sitophilus granarius</i> .	Рисовый долгоносик <i>Sitophilus oryzae</i> L.	Зерновой шашель <i>Rh. dominica</i> F.
10	149	66	72	63
15	131	65	71	62
20	115	63	69	59

Из анализа результатов видно, что, когда в зерне при влажности 12% проходят стимулирующие процессы, одновременно осуществляется дезинсекция.

Расчет, проведенный для спор, показал, что, вследствие их низкого влагосодержания, микроволновое поле в режимах биостимуляции не оказывает на них губительное действие. Поэтому обработка семян, зараженных черной головней, не приводила к одновременной дезинфекции. Склеротии, влагосодержание которых значительно выше, могут получать повреждающий эффект.

Выводы

Представленная методика расчета допустимого времени выдержки семян в микроволновом поле позволяет количественно оценить длительность предпосевной обработки семян с целью их биостимуляции. Результаты расчета подтверждают предположение, что микроволновая биостимуляция сопровождается одновременной дезинсекцией зараженного зерна.

Литература

1. Nelson S.O. Use of microwave and lower frequency RF energy for improving Alfalfa seeds germination/ S.O. Nelson // J. Of Microwave Power, 1976. -Vol.11.- No.3.-P 271-277.
2. Предпосевная обработка микроволновым полем здоровых и зараженных фитопатогенами семян озимой пшеницы как фактор повышения урожайности / [Л.Г. Калинин, В.П. Тучный, Е.А. Левченко и др.] // Ж-л Хранение и переработка зерна, 2001. - № 8. -С. 23-28.
3. Калинин Л.Г. Физическая модель отклика растительной ткани на воздействие микроволнового электромагнитного поля / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова // Биофизика, 2003. - Т.48, вып.1. - С.122-124.
4. Атлас ультраструктуры растительных клеток. / Под ред. Козубова Г.М. и Даниловой М.Ф. Петрозаводск.: изд-во АН СССР Карельский филиал, 1972. 296 с.
5. Использование микроволнового поля для повышения урожайности полевых культур и защиты семян от вредителей и болезней / [Л.Г. Калинин, В.П. Тучный, Е.А. Левченко и др.] // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. -Одесса, 2002. -Вып. 4.-С. 8-35.

УДК 631.365:633.85

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СОНЯШНИКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ

Бандура В.М., канд. техн. наук, професор, Зозуляк І. А., асистент, Зозуляк О.В., асистент
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

У статті були використані основні положення теорії подібності для тепломасообмінних процесів, динаміки руху віброзрізженого шару сипкої продукції, методи теплофізичного експерименту. Складене критеріальне рівняння в узагальнених змінних процесу сушіння насіння соняшнику дозволяє більш точно врахувати вібраційні ефекти при реалізації тепломасообмінних процесів, зокрема збільшення поверхні тепломасообміну, зменшення коефіцієнта внутрішнього тертя та відповідно сухої в'язкості технологічного середовища. Останні чинники створюють сприятливі умови для потенційного зменшення енерговитрат при транспортуванні та тепловій обробці сипкої продукції.

The article used the basic tenets of the theory of similarity for heat and mass transfer processes, driving dynamics vibrozridzhenoho layer of bulk products, methods of thermal experiment. Composite criterion equation in generalized variables sunflower seeds drying process can more accurately take into account the effects of vibration in the implementation of heat and mass transfer processes, including increased heat transfer surface, reducing internal friction coefficient under dry and viscosity technological environment. Last factors create favorable conditions for the potential reduction of power transportation and heat treatment of bulk products.

Ключові слова: сушарка, вібрація, константа, критерії подібності.

При вивченні різних фізичних явищ використовують два методи досліджень, які дозволяють одержати кількісні закономірності. В першому методі використовується експериментальне дослідження конкретних властивостей одиничного явища, в другому – виходять з теоретичного дослідження даної проблеми. Перевагою експериментального методу дослідження є достовірність одержаних результатів.

В контейнері сушарки (рис. 1) за рахунок вібраційних коливань створюється віброкиплячий шар. Тому можна вважати, що загальну гідродинамічну ситуацію в апараті (рух частинок) може характеризувати сумарна середня швидкість потоку та число, яке їй відповідає критерій Рейнольдса (Re).

Тому, запис числа Рейнольдса слід модифікувати, привівши його до характерних параметрів процесу сушіння в вібраційному полі.