МЕХАНИЗАЦИЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 631.531:621.365.5

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ СЕМЯН СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКЕ

С. В. КУРЗЕНКОВ, ЦЗЮНЬЯНЬ ЛУ (LYU JUNYAN)

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: sergkrz@yandex.by

(Поступила в редакцию 18.06.2026)

В статье рассмотрена задача теоретического обоснования рациональной толщины слоя семян сельскохозяйственных культур при непрерывной конвейерной микроволновой предпосевной обработке. Показано, что выбор толщины транспортируемого слоя является одним из определяющих факторов, влияющих на равномерность распределения электромагнитной энергии, эффективность её использования и производительность технологической установки. Разработана математическая модель распространения микроволновой энергии в слое семян, основанная на использовании комплексной диэлектрической проницаемости, коэффициента затухания электромагнитной волны и глубины проникновения энергии по мощности. Предложен безразмерный критерий относительной толщины слоя, позволяющий оценивать равномерность распределения поглощаемой мощности независимо от диэлектрических свойств конкретной сельскохозяйственной культуры. Получены аналитические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между толщиной слоя, глубиной проникновения микроволновой энергии, относительной производительностью установки и качеством обработки. Математически обосновано предельное значение относительной толщины слоя, при котором в наиболее удалённой зоне сохраняется не менее 50 % поглощаемой мощности. На основе разработанной модели предложена инженерная методика определения рациональной толщины слоя при проектировании непрерывных микроволновых установок и выполнено моделирование процесса для семян сои в среде Mathcad. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании промышленного оборудования для микроволновой предпосевной обработки семян различных сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: *микроволновая предпосевная обработка, семена сои и пшеницы, глубина проникновения микроволновой энергии.*

This article examines the theoretical justification of the optimal seed layer thickness for agricultural crops using continuous microwave pre-sowing treatment. It is shown that the choice of transported layer thickness is one of the determining factors affecting the uniformity of electromagnetic energy distribution, its efficiency, and the performance of the processing unit. A mathematical model of microwave energy propagation in the seed layer is developed, based on the use of complex permittivity, electromagnetic wave attenuation coefficient, and energy penetration depth. A dimensionless criterion for the relative layer thickness is proposed, allowing one to evaluate the uniformity of absorbed power distribution regardless of the dielectric properties of a specific agricultural crop. Analytical relationships are obtained establishing the relationship between the layer thickness, microwave energy penetration depth, relative system performance, and treatment quality. A mathematically substantiated limit for the relative layer thickness, at which at least 50% of the absorbed power is retained in the outermost zone, is determined. Based on the developed model, an engineering methodology for determining the optimal layer thickness in the design of continuous microwave systems is proposed, and the process is simulated for soybean seeds in Mathcad. The obtained results can be used in the design of industrial equipment for microwave pre-sowing treatment of seeds of various agricultural crops.

Key words*: microwave pre-sowing treatment, soybean and wheat seeds, microwave energy penetration depth.*

Введение

Повышение качества семенного материала является одним из ключевых направлений совершенствования современных технологий растениеводства, поскольку энергия прорастания, лабораторная и полевая всхожесть семян в значительной степени определяют урожайность сельскохозяйственных культур и их устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды. Наряду с селекционными и химическими методами всё большее распространение получают физические технологии предпосевной обработки, позволяющие стимулировать физиологические процессы в семенах и снижать степень их микробиологической заражённости без применения химических протравителей или при существенном уменьшении их расхода.

Одним из наиболее перспективных физических методов является микроволновая обработка, основанная на объёмном преобразовании энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты в тепловую энергию непосредственно внутри биологического материала [1–7]. По сравнению с традиционными способами нагрева микроволновое воздействие обеспечивает высокую скорость подвода энергии, сокращение продолжительности технологического процесса и возможность одновременного обеззараживания семян и стимуляции их физиологической активности. Современные исследования показывают, что эффективность микроволновой обработки определяется не только температурным режимом, но и особенностями распределения электромагнитной энергии в объёме материала, которое зависит от его диэлектрических свойств, влажности, температуры и геометрических параметров обрабатываемого слоя [8–14].

В последние годы значительное внимание уделяется исследованию диэлектрических свойств семян и зерна, моделированию процессов распространения электромагнитного поля, разработке методов микроволнового обеззараживания и оптимизации режимов обработки. Вместе с тем большинство опубликованных работ посвящено выбору мощности излучения, продолжительности воздействия, температурных режимов и оценке биологической эффективности технологии. Значительно меньше исследований посвящено инженерным вопросам проектирования непрерывных микроволновых установок, определяющим возможность их промышленного применения.

Одним из важнейших конструктивно-технологических параметров непрерывных конвейерных установок является толщина транспортируемого слоя семян. С одной стороны, увеличение толщины слоя приводит к росту производительности оборудования, а с другой – сопровождается усилением затухания электромагнитной энергии по мере её распространения в материале, что вызывает неравномерность нагрева и снижение эффективности обработки нижних слоёв. Назначение толщины слоя исключительно по конструктивным или эмпирическим соображениям не обеспечивает рационального использования микроволновой энергии и не позволяет учитывать электрофизические особенности различных сельскохозяйственных культур.

Анализ современной научной литературы показывает отсутствие универсального инженерного подхода, позволяющего определять рациональную толщину слоя на основе фундаментальных закономерностей распространения электромагнитной энергии в диэлектрическом материале. Несмотря на широкое применение понятия глубины проникновения микроволновой энергии при расчётах процессов диэлектрического нагрева, этот параметр практически не используется в качестве критерия выбора конструктивных характеристик непрерывных микроволновых установок.

В связи с этим целью настоящей работы является теоретическое обоснование рациональной толщины слоя семян сельскохозяйственных культур при непрерывной конвейерной микроволновой предпосевной обработке на основе математического моделирования распространения электромагнитной энергии в эффективном неоднородном диэлектрике.

В предшествующих исследованиях авторов были обоснованы отдельные технологические параметры микроволновой обработки семян [15] (анализ физико-технических основ) и [16] (уточнение режимов для зерновых и бобовых). Систематизация известных подходов к обработке семенного материала представлена в работе [17]. В недавней работе [18] авторами были исследованы условия совмещения стимуляции и снижения обсемененности семян при СВЧ-обработке, что позволило уточнить технологические параметры для зерновых и бобовых культур. Однако вопрос выбора рациональной толщины слоя при непрерывной конвейерной обработке остаётся открытым.

Основная часть

Для достижения поставленной цели предложим конструктивную схему непрерывной микроволновой установки представлена на рис. 1. Ее особенностью является формирование равномерного слоя семян заданной толщины с последующей обработкой в рабочей камере электромагнитным полем сверхвысокой частоты. В отличие от установок периодического действия предложенная конструкция обеспечивает непрерывное транспортирование материала, что позволяет повысить производительность процесса и создать предпосылки для автоматизированного регулирования режимов обработки.

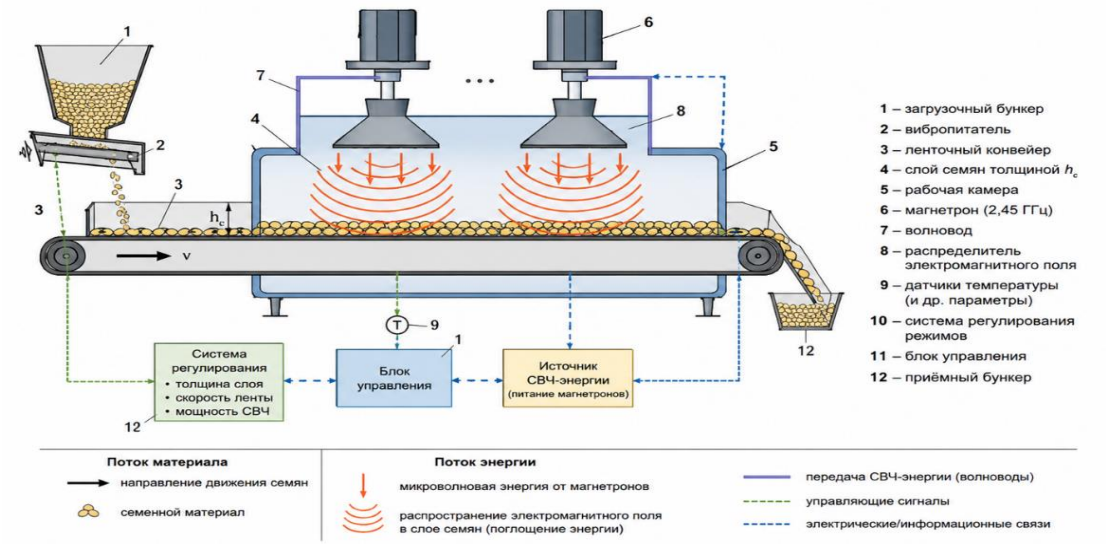


Рис. 1. Схема конвейерной микроволновой установки для предпосевной обработки семян

Семена из загрузочного бункера 1 поступают на вибропитатель 2, который обеспечивает их равномерную подачу на ленточный конвейер 3. За счёт изменения производительности вибропитателя и скорости движения конвейерной ленты формируется слой семян 4 требуемой толщины. Именно толщина слоя является основным конструктивно-технологическим параметром процесса, определяющим распределение электромагнитной энергии по высоте материала и эффективность её использования [8–14, 19].

Сформированный слой непрерывно транспортируется через рабочую камеру 5, в верхней части которой установлены один или несколько магнетронов 6, генерирующих электромагнитное излучение промышленной частоты 2,45 ГГц [20]. Энергия от магнетронов через волноводы 7 поступает к распределителям электромагнитного поля 8, обеспечивающим максимально равномерное распределение мощности по ширине транспортируемого слоя. Такое конструктивное решение снижает локальные максимумы напряжённости электрического поля и способствует более равномерному поглощению энергии семенным материалом.

При прохождении слоя через рабочую камеру микроволновая энергия поглощается полярными компонентами биологического материала, главным образом связанной влагой, и преобразуется в тепловую энергию [21]. По мере распространения электромагнитной волны интенсивность поля экспоненциально уменьшается, вследствие чего распределение выделяемой мощности по толщине слоя определяется глубиной проникновения микроволновой энергии и диэлектрическими характеристиками обрабатываемой культуры. Поэтому выбор толщины слоя должен осуществляться не по конструктивным ограничениям оборудования, а на основании расчёта глубины проникновения электромагнитной энергии.

После завершения обработки семена выгружаются в приёмный бункер 12 и направляются на последующие технологические операции либо хранение. Непрерывный характер транспортирования обеспечивает стабильность режима обработки и возможность использования установки в составе поточных технологических линий [22].

Для обеспечения устойчивой работы установки применяется система воздушного охлаждения магнетронов и рабочей камеры, а контроль технологического процесса осуществляется средствами измерения температуры и микропроцессорным блоком управления. Система автоматически поддерживает заданные режимы работы, регулируя производительность вибропитателя, скорость движения конвейерной ленты и мощность микроволнового излучения, а при возникновении аварийных режимов обеспечивает безопасную остановку оборудования.

Предлагаемая конструктивная схема ориентирована на реализацию разработанной далее математической модели выбора рациональной толщины слоя семян. В отличие от существующих инженерных решений, в которых толщина слоя назначается эмпирически, в предлагаемой установке её значение определяется расчётным путём на основе глубины проникновения микроволновой энергии в эффективный неоднородный диэлектрик, что обеспечивает рациональное использование энергии излучения и требуемую равномерность обработки.

Разработка математической модели основана на последовательном переходе от электрофизических свойств семян к конструктивным и технологическим параметрам непрерывной микроволновой установки. В основу модели положено предположение, что распределение электромагнитной энергии в транспортируемом слое полностью определяется диэлектрическими характеристиками материала, через которые рассчитывается коэффициент затухания электромагнитной волны и глубина проникновения микроволновой энергии [8–14]. Последующее введение безразмерного критерия относительной толщины слоя позволяет перейти от электрофизического описания процесса к инженерной задаче выбора рациональных конструктивных параметров установки. Общая логика формирования математической модели представлена на рис. 2. Представленная схема отражает причинно-следственную связь между электрофизическими свойствами семян, закономерностями распространения электромагнитной энергии и конструктивными параметрами технологической установки. В отличие от традиционных инженерных методик, основанных на эмпирическом выборе толщины транспортируемого слоя, предлагаемый подход использует глубину проникновения микроволновой энергии как базовый расчетный параметр. Это обеспечивает возможность разработки универсальной методики проектирования непрерывных микроволновых установок для различных сельскохозяйственных культур после определения их диэлектрических характеристик.

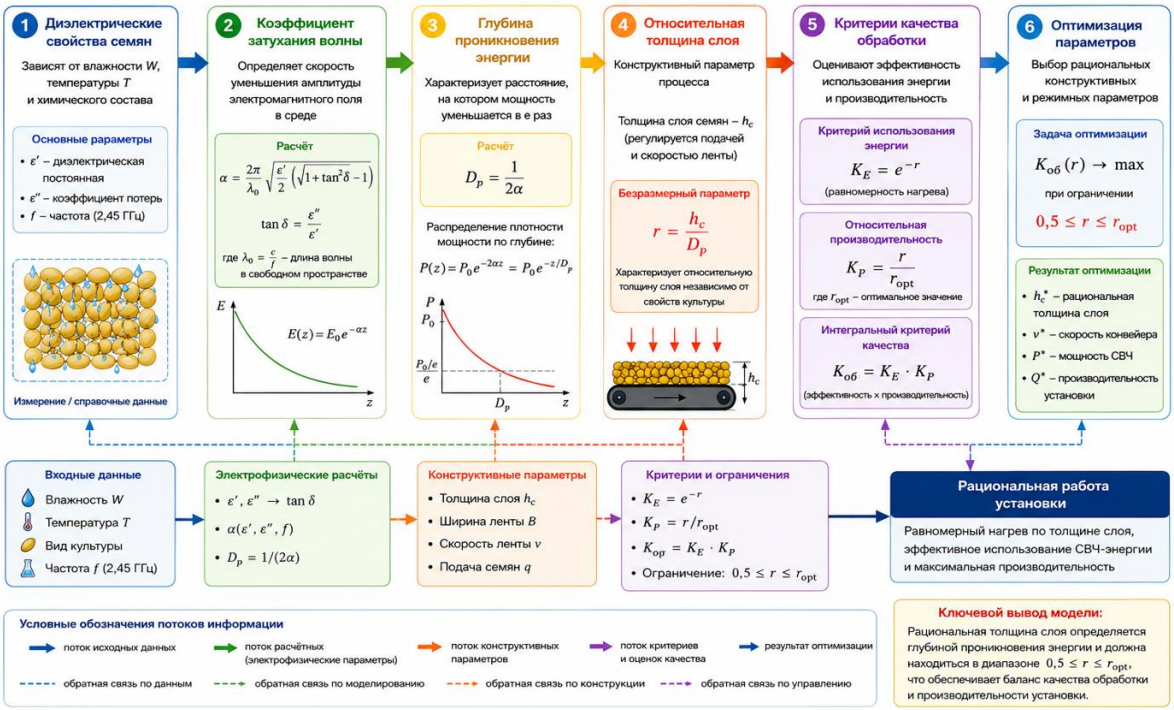


Рис. 2. Функционально-математическая схема формирования модели рациональной толщины слоя при непрерывной микроволновой обработке

В соответствии с принятой физической моделью слой семян рассматривается как среда с потерями, характеризуемая комплексной диэлектрической проницаемостью (1) и тангенсом угла диэлектрических потерь (2):

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot i, \tag{1}$$

$$\mathrm{tg}(\delta) = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \tag{2}$$

где ε_1 – диэлектрическая постоянная;

ε_2 – коэффициент диэлектрических потерь;

i – мнимая единица ($i^2 = -1$).

Диэлектрические характеристики определяются влажностью, температурой и химическим составом семян [23]. Для инженерных расчётов возможно использовать экспериментальные значения этих параметров для соответствующей культуры (табл. 1).

Таблица 1. **Априорная информация по диэлектрическим характеристикам сои и пшеницы [8–10]**

Культура	Влажность, %	ε_1	ε_2
Пшеница	12–14	4–4,8	0,3–0,5
Соя	10–12	6–6,5	0,6–0,7

При этом коэффициент затухания можно определить по формуле [13–15,19]:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{2}\left(\sqrt{1+\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}-1\right)} = \frac{2\pi f}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{2}\left(\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\,\delta}-1\right)} \qquad (3)$$

где λ_0 – длина волны излучения в вакууме, м; $c = 3 \cdot 10^8$ – скорость света, м/с; $f = 2{,}45 \cdot 10^9$ – микроволновая частота, Гц;

По мере распространения электромагнитной волны в диэлектрике плотность мощности уменьшается по экспоненциальному закону

$$P(z) = P(0) \cdot e^{-2\alpha z} \qquad (4)$$

где $P(0)$ – плотность мощности микроволнового поля на поверхности материала, Вт/ м^2;

z – линейная величина распространения микроволнового поля по толщине материала, м.

Глубиной проникновения микроволновой энергии будем считать расстояние, на котором плотность мощности уменьшается в e раз. Тогда

$$D_{\text{п}} = \frac{1}{2\alpha} = \frac{D_{\text{п}}^E}{2} = D_{\text{п}}^P = \frac{c}{4\pi f\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{2}\left(\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\,\delta}-1\right)}}, \qquad (5)$$

Именно глубина проникновения по мощности определяет толщину слоя, в пределах которой обеспечивается эффективное использование микроволновой энергии [11-14, 19].

Пусть dz – толщина элементарного слоя и при его обработки изменение мощности по толщине слоя пропорционально текущей мощности. Математически это можно формализовать дифференциальным уравнением первого порядка с разделяющимися переменными $\frac{\mathrm{d}P(z)}{\mathrm{d}z} = -k \cdot P(z),$ с начальным условием $P(0) = P_0.$ После разделения переменных и интегрирования частей дифференциального уравнения получим, что $\ln\left(\frac{P(z)}{P_0}\right) = -k \cdot z,$ или $\frac{P(z)}{P_0} = e^{-k \cdot z}.$ Откуда получим, что

$$P(z) = P_0 \cdot e^{-2kz}. \qquad (6)$$

Сравнив формулы (4) и (6), можно сделать вывод, что $k = 2\alpha = \frac{1}{D_{\text{п}}}$, а формулу (6) можно записать в виде:

$$P(h_{\text{с}}) = P_0 \cdot e^{-\frac{h_{\text{с}}}{D_{\text{п}}}}, \qquad (7)$$

где $h_{\text{с}}$ – величина формируемого слоя при конвейерной обработке, м.

Основной задачей проектирования процесса конвейерной микроволновой обработки материала является выбор такой толщины слоя, при которой нижняя его часть получает достаточную плотность мощности для эффективной стимуляции и обеззараживания семян. Согласно формулы (7) распределение мощности определяется отношением $\frac{h_{\text{с}}}{D_{\text{п}}}$, которое можно воспринимать как параметр подобия изучаемого процесса, так как нормированное распределение мощности $\frac{P(h_{\text{с}})}{P_0}$ в слое полностью определяется этой безразмерной величиной, которую целесообразно обозначить

$$r = \frac{h_{\text{с}}}{D_{\text{п}}}. \qquad (8)$$

Назовем этот показатель r относительная глубина проникновения микроволнового излучения в слой семян. Он универсален тем, что является характеристикой распределения мощности в слое вне зависимости от вида культуры семян при микроволновой предпосевной их обработки и фиксированной

начальной мощности. При этом нормированное распределение мощности логично назвать критерием использования микроволновой энергии и обозначить:

$$K_E = \frac{P(h_c)}{P_0} = e^{-r}. \quad (9)$$

Согласно формуле (9), стремление K_E к 1 будет характеризовать условия рационального использования энергии при обработке, а стремление $K_н$ к 0 – нерациональное использования энергии и неравномерную обработку. Следовательно, выбор подходящего значения r имеет решающее значение для достижения баланса между эффективностью использования энергии и равномерностью микроволновой обработки. Исходя из зависимости (9), критерий K_E характеризует равномерность распространения микроволновой энергии по толщине слоя Данную зависимость на основании табл. 2 можно прокомментировать следующим образом.

Таблица 2. **Графическая зависимость величины поглощения от относительной толщины слоя**

r	K_E	Равномерность распространения микроволновой энергии по толщине слоя
0,5	0,61	Высокая
0,7	0,50	Хорошая
1,0	0,37	удовлетворительная
1,2	0,30	предельная
1,5	0,22	неудовлетворительная

Анализ информации, приведенной в табл. 2, показывает, что K_E экспоненциально уменьшается с увеличением относительной толщины слоя r. Это объясняется затуханием микроволновой энергии по мере её распространения в материале и соответствующим снижением плотности поглощаемой мощности в нижних слоях. При малых значениях относительной толщины ($r \leq 0,5$) наблюдается высокая равномерность обработки ($K_E \geq 0,61$), поскольку толщина слоя существенно меньше глубины проникновения микроволновой энергии, а распределение мощности по толщине слоя остаётся относительно однородным.

При увеличении относительной толщины до $r = 0,7$ K_E снижается до величины 0,50. Это означает, что в нижней части слоя сохраняется около 50 % мощности по сравнению с верхней частью. Несмотря на наличие градиента температуры, такой режим обеспечивает достаточно равномерный нагрев всего объёма семян и может рассматриваться как рациональный компромисс между производительностью процесса и качеством обработки. Дальнейшее увеличение относительной толщины слоя ($r \geq 1,0$) приводит к существенному ухудшению равномерности обработки слоя. Следовательно, область значений показателя r от 0,5 до 0,7 следует считать наиболее предпочтительной для предпосевной микроволновой обработки семян. При этом значение $h_с \approx 0,7\ D_п$ можно принять в качестве верхней границы рациональной толщины слоя, обеспечивающей эффективное использование энергии микроволнового поля при сохранении хорошей равномерности нагрева. Этому факту есть и строго математическое обоснование. Приняв во внимание в формуле (9) условие $K_E \geq 0,5$, решим это неравенство. В результате получим:

$$r \leq -\ln(0,5) = 0,693 \approx 0,7. \quad (10)$$

Таким образом, значение $r = 0,7$ является не эмпирически выбранным, а математически обоснованным предельным значением, при котором в наиболее удалённой зоне слоя сохраняется не менее 50 % поглощаемой мощности, что обеспечивает хорошую равномерность микроволновой обработки семян.

При проведении микроволновой поточной обработки семян важно найти баланс между качеством обработки и производительностью. Показателем производительности для нашего случая может является относительная производительность предлагаемого оборудования, которая определяется по формуле:

$$K_п = \frac{\rho \cdot B \cdot h_с \cdot v}{\rho \cdot B \cdot h_с^{опт} \cdot v} = \frac{h_с}{h_с^{опт}} = \frac{r \cdot D_п}{r^{опт} \cdot D_п} = \frac{r}{r^{опт}}, \quad (11)$$

где ρ – плотности обрабатываемых семян, кг/м^3; B – ширина конвейерной ленты, м; v – скорость конвейерной ленты, м/с; $h_с^{опт}$ – оптимальная толщина слоя для обработки семян конкретной сельскохозяйственной культуры, м; $r^{опт}$ – оптимальная относительная глубина проникновения микроволнового излучения в слой конкретной сельскохозяйственной культуры.

Он показывает, во сколько раз изменится производительность установки при изменении толщины слоя относительно рациональной. Действительно, если, например, в качестве рациональной относительной относительная глубина проникновения микроволнового излучения в слой взять значение $r^{опт} = 0,693$, то можем заметить, что при $r = 0,693$ относительная производительность будет состав-

лять $K_{\text{п}} = 1$ и этот режим по производительности можно считать наиболее рациональным. При r = 0,693 – $K_{\text{п}} = 0{,}72$, что свидетельствует о уменьшении производительности оборудования на 28 %. Увеличение r до 1 приводит к увеличению производительности на 44 %. Таким образом мы можем видеть, что увеличение толщины слоя действительно приводит к увеличению производительности, но при одновременном ухудшении качества обработки, так как согласно табл. 2 равномерность распространения микроволновой энергии по толщине слоя ухудшается. В связи с этим для контроля за балансом между качеством обработки семян и производительностью нами был предложен обобщенный показатель качества микроволновой предпосевной обработки семян $K_{\text{об}}$, который определяется как произведение показателя относительной производительности предлагаемого оборудования $K_{\text{п}}$ на критерием использования микроволновой энергии K_E:

$$K_{\text{об}} = K_{\text{п}} \cdot K_E = \frac{r}{r^{\text{опт}}} \cdot e^{-r}. \qquad (12)$$

Этот критерий имеет четкий физический смысл: он показывает, сколько эффективно обработанного материала установка производит в единицу времени с учетом затухания мощности по толщине слоя и характеризует: равномерность распределения энергии, использование микроволновой энергии, производительность установки. С учетом ввода обобщенного показателя качества микроволновой предпосевной обработки семян $K_{\text{об}}$ стоящая инженерная задача математически формализуется к следующей:

$$K_{\text{об}} \to \max; \quad K_E = e^{-r} \geq 0{,}5; \quad r \leq r^{\text{опт}}. \qquad (13)$$

Разработанная математическая модель (1–13) позволяет перейти от анализа физических закономерностей распространения микроволновой энергии к инженерному расчету конструктивно-технологических параметров непрерывной конвейерной установки активации и обеззараживания семян. Данная методика включает пять последовательных этапов: 1) определение исходных характеристик семян: W – влажности, T – температуры, ε_1, ε_2 – диэлектрических их характеристик. На этапе моделирования процесса допускается использование соответствующих справочных значений параметров (табл. 1); 2) расчет электрофизических параметров: формулы (2 – 3); 3) определение глубины проникновения – формула 5; 4) выбор рациональной относительной толщины слоя $r^{\text{опт}}$ под конкретно обрабатываемую культуру – экспериментальная часть; 5) определение рациональной толщины слоя $D_{\text{п}} = r^{\text{опт}} \cdot h_{\text{с}}$ и производительности конвейера $Q_{\text{к}} = \rho \cdot B \cdot h_{\text{с}}^{\text{опт}} \cdot v$; 6) проверка и расчет критериев рациональности.

Использование универсального безразмерного критерия относительной толщины слоя позволяет применять единый алгоритм проектирования для различных сельскохозяйственных культур после определения их диэлектрических характеристик.

Покажем элемент моделирования данной методики в среде MathCad рис. 3.

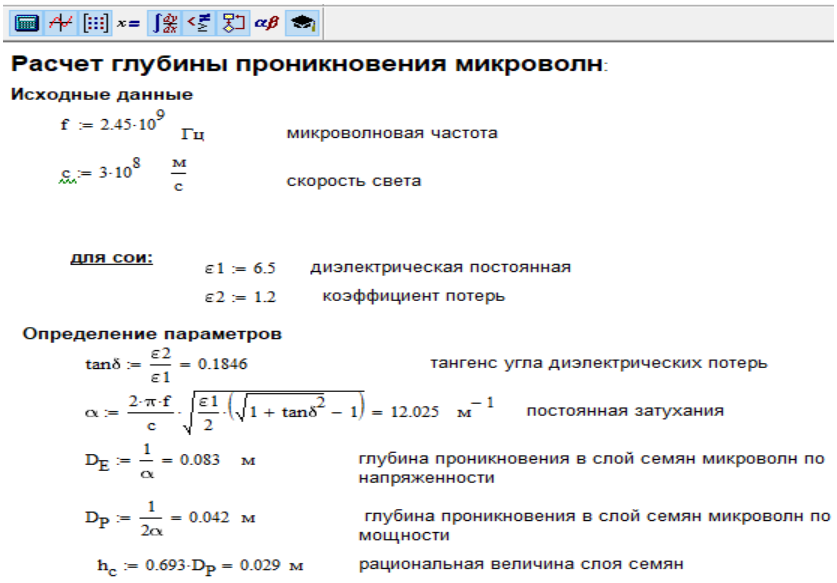


Рис. 3. Элемент моделирования предлагаемой методики в среде MathCad

С учетом предложенного моделирования анализ критериев рациональности можно представить в виде рис. 4.

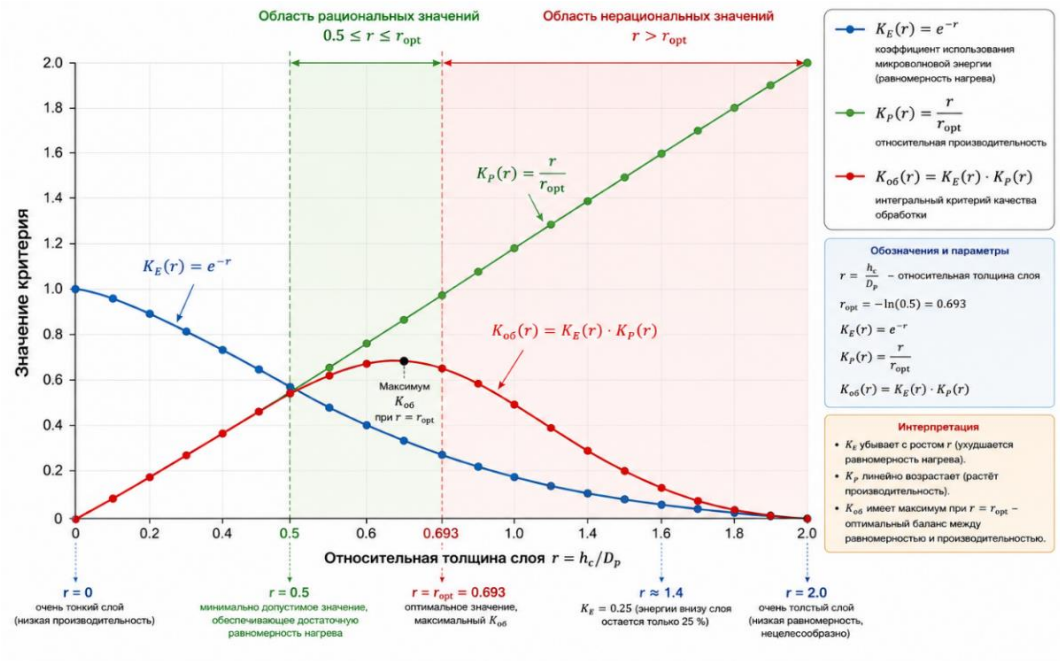


Рис. 4. Анализ зависимостей критериев эффективности микроволновой обработки от относительной толщины слоя

Заключение

В работе разработана математическая модель выбора рациональной толщины слоя семян сельскохозяйственных культур при непрерывной конвейерной микроволновой предпосевной обработке, основанная на закономерностях распространения электромагнитной энергии в эффективном неоднородном диэлектрике. В отличие от известных инженерных подходов, основанных преимущественно на экспериментальном подборе конструктивных параметров, предложенная модель позволяет определять толщину транспортируемого слоя расчётным путём на основе электрофизических характеристик обрабатываемого материала.

Получены аналитические зависимости, связывающие комплексную диэлектрическую проницаемость семян, коэффициент затухания электромагнитной волны, глубину проникновения микроволновой энергии, относительную толщину слоя, коэффициент использования микроволновой энергии K_E, относительную производительность установки K_P и интегральный критерий качества обработки $K_{об}$. Введение безразмерного критерия относительной толщины слоя позволило сформировать единый подход к инженерному расчёту конструктивных параметров непрерывных микроволновых установок независимо от вида сельскохозяйственной культуры.

Моделирование разработанной математической модели подтвердило наличие компромисса между равномерностью распределения электромагнитной энергии и производительностью установки. Установлено, что область рациональных значений относительной толщины слоя определяется диапазоном $0{,}5 \le r \le r_{опт}$, в пределах которого обеспечивается наиболее благоприятное сочетание эффективности использования микроволновой энергии и производительности технологического процесса. Применение интегрального критерия качества обработки $K_{об}$ позволило количественно оценить данный компромисс и сформулировать задачу оптимизации конструктивных и режимных параметров установки.

Разработанная инженерная методика обеспечивает последовательный переход от определения диэлектрических свойств семян к расчёту глубины проникновения микроволновой энергии, рациональной толщины транспортируемого слоя, скорости движения конвейера и производительности установки. Универсальность предложенного подхода позволяет использовать его при проектировании непрерывных микроволновых установок для обработки различных сельскохозяйственных культур после определения их электрофизических характеристик.

Полученные результаты расширяют теоретические основы инженерного проектирования оборудования для микроволновой предпосевной обработки семян и могут служить основой для разработки интеллектуальных систем автоматического управления технологическим процессом. Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие модели с учётом зависимости диэлектрических характеристик от температуры и влажности, нестационарного характера нагрева, многослойного распределения электромагнитного поля, а также экспериментальная верификация модели на семенах различных сельскохозяйственных культур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang, G. Recent developments in applications of physical fields for microbial decontamination and enhancing nutritional properties of germinated edible seeds and sprouts: a review / G. Yang, J. Xu, Y. Xu [et al.] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2024. – Vol. 64, No. 33. – P. 12638–12669.
2. Liu, L. A review and perspective of environmental disinfection technology based on microwave irradiation / L. Liu, N. Wang, A. A. Laghari [et al.] // Current Pollution Reports. – 2023. – Vol. 9, No. 1. – P. 46–59.
3. Sirohi, R. Technologies for disinfection of food grains: advances and way forward / R. Sirohi, A. Tarafdar, V. K. Gaur [et al.] // Food Research International. – 2021. – Vol. 145. – Art. 110396.
4. Kumar, D. Disinfestation of stored grains using non-chemical technologies – a review / D. Kumar, A. Kalita // Trends in Food Science & Technology. – 2021. – Vol. 107. – P. 299–308.
5. Ling, B. Recent developments in applications of radio frequency heating for improving safety and quality of food grains and their products: a review / B. Ling, T. Cheng, S. Wang // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2020. – Vol. 60, No. 15. – P. 2622–2642.
6. Guan, X. Recent developments in pasteurising seeds and their products using radio frequency heating: a review / X. Guan, B. Lin, Y. Xu [et al.] // International Journal of Food Science & Technology. – 2022. – Vol. 57, No. 6. – P. 3223–3243.
7. Brodowska, M. Microwave treatments of cereals: effects on thermophysical and parenchymal-related properties / M. Brodowska [et al.] // Foods. – 2020. – Vol. 9. – Art. 949.
8. Nelson, S. O. Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications / S. O. Nelson. – New York: Springer, 2015. – 584 p.
9. Ryynänen, S. The electromagnetic properties of food materials: a review of the basic principles / S. Ryynänen // Journal of Food Engineering. – 1995. – Vol. 26. – P. 409–429.
10. Nelson, S. O. Frequency- and temperature-dependent permittivities of cereal grains / S. O. Nelson // Transactions of the ASAE. – 1981. – Vol. 24. – P. 120–128.
11. Metaxas, A. C. Industrial Microwave Heating / A. C. Metaxas, R. J. Meredith. – London: Peter Peregrinus Ltd., 1983. – 347 p.
12. Datta, A. K. Handbook of Microwave Technology for Food Applications / A. K. Datta, R. C. Anantheswaran. – New York: Marcel Dekker, 2001. – 656 p.
13. Pozar, D. M. Microwave Engineering. 4th ed. / D. M. Pozar. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. – 756 p.
14. Collin, R. E. Foundations for Microwave Engineering. 2nd ed. / R. E. Collin. – New York: Wiley-IEEE Press, 2001. – 928 p.
15. Лу, Цзюньянь. Перспективы применения микроволновой предпосевной обработки зернобобовых культур и анализ ее параметров / Цзюньянь Лу, С. В. Курзенков // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 4. – С. 96–100.
16. Курзенков, С. В. Исследование ключевых технологических параметров микроволновой активации семенного материала / С. В. Курзенков, Цзюньянь Лу // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2026. – Вып. 11, ч. 1. – С. 204–207.
17. Курзенков С. В., Лу Цзюньянь. Анализ физико-технических основ микроволновой активации семенного материала сельскохозяйственных культур // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 3. – С. 80–83.
18. Лу, Цзюньянь. Исследование условий совмещения стимуляции и снижения обсемененности семян при СВЧ обработке /Цзюньянь Лу, С. В. Курзенков// Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2026. – № 1. – С. 115–122.
19. Balanis, C. A. Advanced Engineering Electromagnetics / C. A. Balanis. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. – 1048 p.
20. Жуковский, В. Н. Основы микроволновой техники / В. Н. Жуковский. – М.: Радио и связь, 2004. – 416 с.
21. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
22. Горбатов, В. М. Процессы и аппараты пищевых производств / В. М. Горбатов. – М.: Колос С. 2007. – 703 с.
23. Стрекозов, Н. И. Электромагнитные процессы в диэлектриках / Н. И. Стрекозов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.