

А. И. ТЕРЕЩЕНКО, д-р техн. наук., Д. В. МАРКОВ

## О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОГО ПОЛЯ И ПОЛЯРИЗОВАННОСТИ ПРИ СВЧ-ОБЛУЧЕНИИ ЗЕРЕН СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

В последние десятилетия электрофизические методы обработки различных сельскохозяйственных культур прочно укрепились в современном народном хозяйстве [1]. Несмотря на очевидные экспериментальные достижения в упомянутой области (см., например, [2-4]), полного понимания химико-биологических процессов в исследуемых объектах пока нет. Как следствие – большинство экспериментальных исследований проводится вслепую.

В недавних работах [5,6] представлен ряд интересных экспериментальных результатов, связанных с воздействием СВЧ-излучения на зерна злаковых культур. К этому перечню можно добавить и ряд наших работ [7-11]. Исследования велись совместно с сотрудниками Института растениеводства им. акад. Юрьева (г. Харьков). Опыты показали, что предпосевная СВЧ-обработка зерен пшеницы приводит к интенсификации прорастания и повышению всхожести по сравнению с контролем. Отмечено, что СВЧ-облучение увеличивает влажность зерна. Кроме того, облучение свежубранного, в котором ферменты выполняют защитную функцию и препятствуют прорастанию в течение полугода, снимает эту защитную функцию.

Указанное выше увеличение влажности зерна, влияющее на всхожесть и энергию прорастания, является нетепловым эффектом, хотя и происходящим на фоне нагрева. Эти данные получены на основе опытов с двумя сортами пшеницы. Способ определения всхожести свежубранных семян запатентован [10]. Технические вопросы исследования воздействия СВЧ-излучения на биологические объекты и сравнительная оценка используемых для этого методов даны в [11]. В настоящее время ведутся крупномасштабные производственные испытания. Кроме того, исследуется воздействие СВЧ на семена ряда незерновых культур. Особенностью данных экспериментов было то, что характерная длина волны используемого излучения более чем на порядок превышала размеры семян. Это фактически означает, что семена при микроволновой обработке находятся в однородном внешнем поле, изменяющемся только по направлению. Неоднородность поля в этом случае связана с внутренней структурой зерна (т.е. зависимостью тензора диэлектрической проницаемости от координаты). Это, в частности, позволяет провести относительно простой анализ распределения поля внутри зерна и связать свойства структуры зерна с макроскопическим вектором поляризации. Такая информация в конкретной прикладной проблеме важна в первую очередь, так как дает возможность понять, какие именно макроскопические параметры влияют на химико-биологические процессы внутри зерна. Теоретическому изучению данной проблемы и посвящена настоящая работа.

Как известно, классические уравнения Максвелла в присутствии макроскопической неоднородности можно представить в форме, характерной для обычной теории рассеяния:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0 + \left( \text{grad div} \vec{r} + \vec{k}^2 \right) \int_{\Omega} \left[ \epsilon(\vec{r}') - 1 \right] \vec{E}(\vec{r}') \frac{e^{-ik|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r'. \quad (1)$$

Мы не выписываем здесь аналогичное уравнение для магнитного поля, поскольку при исследуемых условиях энергия магнитной компоненты явно недостаточна для какого-либо влияния на процессы внутри зерна. В уравнении (1)  $\vec{k}$  – волновой вектор;  $\vec{E}_0$  – внешнее поле в вакууме;  $\epsilon(\vec{r})$  – диэлектрическая проницаемость;  $\vec{r}$  – координата.

В принципе уравнение (1) дает однозначную связь между диэлектрической проницаемостью (внутренней структурой) объекта и эффективным полем внутри него. Реальное же применение формулы (1) проблематично даже при известной функции  $\epsilon(\vec{r})$ . Простейший метод итераций не дает гарантий быстрой сходимости решения. Возможность построения

адекватной теории возмущений также сомнительна. Однако в нашем конкретном случае малость объекта по сравнению с длиной волны внешнего поля позволяет получить замкнутую систему уравнений, включив еще одну макроскопическую величину, а именно – поляризованность  $\vec{P}(\vec{r}, t)$ .

Уравнение движения для вектора поляризации имеет вид [12,13]:

$$\frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} + \omega_0^2 \vec{P} = \frac{q^2 n}{\mu} \vec{E}_0(t) + \frac{q^2 n}{\mu} \left\{ \int_{\Omega} \text{rot rot} \left( \frac{\vec{P}(\vec{r}', t - \frac{1}{c} |\vec{r} - \vec{r}'|)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \right) g(\vec{r}, \vec{r}') d^3 \vec{r}' - 4\pi \vec{P}(\vec{r}, t) g(\vec{r}, \vec{r}') \right\}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – диссипативная константа,  $\omega_0$  – частота внешнего поля,  $q$  – возможные микроскопические заряды плотности  $n$ ,  $g(\vec{r}, \vec{r}')$  – корреляционная функция.

Строго говоря, уравнение (2) может быть получено лишь в приближении слабого взаимодействия между частицами объекта. Мы, однако, намеренно записали его с использованием эмпирической корреляционной функции  $g(\vec{r}, \vec{r}')$  вместо одночастичных функций распределения. После адекватной конкретизации корреляционной функции описание становится самосогласованным.

Из уравнения (2) видно, что реальное поле внутри объекта отличается от  $\vec{E}_0$  стандартным слагаемым  $4\pi \vec{P}(\vec{r}, t) g(\vec{r}, \vec{r}')$  и добавкой (первое слагаемое в фигурных скобках), связанной с эффектом Лоренца. Это слагаемое может быть существенно упрощено в нашем случае. В нулевом приближении по запаздыванию и по  $(\vec{r} - \vec{r}') \partial / \partial \vec{r}$  (в обоих случаях разложение ведется по  $r_0 / \lambda$ , где  $r_0$  – характерный размер объекта;  $\lambda$  – длина волны внешнего поля) имеем

$$\vec{P}\left(\vec{r}', t - \frac{1}{c} |\vec{r} - \vec{r}'|\right) \approx \vec{P}(\vec{r}, t). \quad (3)$$

Вводя обозначения  $\vec{n} = \vec{P} / |\vec{P}|$ ,  $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$ , преобразуем члены в фигурных скобках уравнения (2) к виду

$$|\vec{P}(\vec{r}, t)| \int g(\vec{R}) \text{rot} \vec{R} \text{rot} \vec{R} \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{R}|} \right) d^3 R - \vec{P}(\vec{r}, t) g(|\vec{r} - \vec{r}'|), \quad (4)$$

где мы учли, что  $g(\vec{r}, \vec{r}') \rightarrow g(|\vec{r} - \vec{r}'|)$ . Используя тождество  $\text{rot rot} \vec{A} = \text{grad div} \vec{A} - \Delta \vec{A}$  и соотношение

$$\frac{1}{4\pi} \Delta_{\vec{r}} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = -\delta(\vec{r} - \vec{r}'), \quad (5)$$

первое слагаемое в (4) запишем в виде

$$\vec{J} \equiv |\vec{P}(\vec{r}, t)| \int g(|\vec{R}|) \text{grad} \vec{R} \text{div} \vec{R} \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{R}|} \right) d^3 R. \quad (6)$$

После преобразований Фурье

$$\frac{1}{|\vec{R}|} = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \frac{4\pi}{k^2} e^{i\vec{k}\vec{R}} d^3 k, \quad g(|\vec{R}|) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int g(|\vec{k}|) e^{i\vec{k}\vec{R}} d^3 k \quad (7)$$

получим:

$$\vec{J} = -|\vec{P}(\vec{r}, t)| \frac{4\pi}{(2\pi)^3} \int \frac{\vec{k}(\vec{k}\vec{n})}{k^2} g(|\vec{k}|) d^3k = -\frac{4\pi}{3} \frac{1}{(2\pi)^3} \vec{P}(\vec{r}, t) \int g(|\vec{k}|) d^3k. \quad (8)$$

Но

$$\frac{1}{(2\pi)^3} \int g(|\vec{k}|) d^3k = g(\vec{R} = 0) \equiv g. \quad (9)$$

Следовательно, окончательный вариант имеет вид:

$$\vec{J} = -\frac{4\pi}{3} g(|\vec{r} - \vec{r}'|) \vec{P}(\vec{r}, t). \quad (10)$$

Обращаясь теперь к уравнению движения (2), видим, что реальное поле в объекте имеет вид

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(t) + \vec{J}(\vec{r}, t) - 4\pi \vec{P}(\vec{r}, t) g(|\vec{r} - \vec{r}'|) = \vec{E}_0(t) - \frac{16}{3} \pi \vec{P}(\vec{r}, t) g(|\vec{r} - \vec{r}'|). \quad (11)$$

Следует отметить, что в нашем подходе использовано лишь одно существенное предположение – о справедливости уравнения движения (2) для плотной системы микрочастиц зерна. Однако оказывается, что в финале нам даже нет необходимости знать детальный вид корреляционной функции  $g(\vec{r}, \vec{r}')$ , а только ее частное значение в нуле, то есть  $g(|\vec{r} - \vec{r}'|)$ . Естественно положить  $g(|\vec{r} - \vec{r}'|) = -1$ . Это отражает тот факт, что вероятность нахождения двух частиц в одной точке пространства равна нулю. В таком случае имеем:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(t) + \frac{16}{3} \pi \vec{P}(\vec{r}, t). \quad (12)$$

Из сравнения с уравнением (1) получаем:

$$\vec{P}(\vec{r}) = \frac{3}{16\pi} \left( \text{grad div } \vec{r} + k^2 \right) \int_{\Omega} [\varepsilon(\vec{r}') - 1] \frac{\vec{E}(\vec{r}') e^{-ik|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r'. \quad (13)$$

Формула (13) дает нам явную аналитическую связь между такими макроскопическими характеристиками, как поляризованность, диэлектрическая проницаемость и эффективное поле внутри объекта.

В совокупности с уравнением (1) мы имеем систему уравнений, позволяющую удобно исследовать процессы, протекающие внутри объектов для данной конфигурации функции  $\varepsilon(\vec{r})$ . В частности, уравнения (1) и (13) существенно упрощают как использование численных методов, так и анализ предельных случаев.

Полученная система уравнений (1) и (13) дает возможность расчета, на основании которого могут быть найдены макроскопические характеристики исследуемого объекта и установлена связь между ними. Сопоставление полученных на основе такого расчета данных с результатами измерений (в том числе и радиометрическими методами) для зерен, подвергшихся СВЧ-облучению и контрольных образцов, позволит достаточно определенно представить себе процессы, происходящие в конкретном биологическом объекте при воздействии на него сверхвысокочастотного излучения. Это должно способствовать пониманию и объяснению обнаруженных интересных и важных практических результатов – улучшения всхожести, прорастания свежесобранных зерен и т. п.

**Список литературы:** *Бородин И.Ф., Шарнов Г.А., Горин А.Д.* Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве. – М. ВНИИТЭИагропром, 1987. 2. *Бородин И.Ф., Вендин С.В., Горин А.Д.* Изменение всхожести зерновых культур под влиянием СВЧ-обработки. докл. росс. акад. наук. 1993. № 2. С. 92 – 94. 3. *Батыгин Н.Ф., Ушакова С.И., Никонова Н.Д.* Комплексная оценка процесса воздействия электромагнитного поля высокой частоты на семена // Применение энергии высоких и сверхвысоких частот в технологических процессах сельскохозяйственного производства. Челябинск. 1983. С. 71 – 74. 4. *Блонская А.П., Дятченко Т.И.,* Влияние ЭМП СВЧ на посевные качества овощных культур // Использование СВЧ-энергии в сельскохозяйственном производстве. зерноград: ВНИТИМЭСХ, 1989. 172 с. 5. *Изаков Ф.Я., Полевик Н.Д., Жданов В.В.* / Нетрадиционные СВЧ технологии для экологически чистого земледелия // Микроволновые технологии в народном хозяйстве / Ред. Калинин Л.Г. Одесса: ОКФА, 1996. 6. Вивчення впливу мікрохвильового поля на посівні і урожайні якості насіння злакових, олійних і овочевих культур / Калинин Л.Г., Тучний В.П., Левченко Е.А., Кіндрук М.О. Вишневецький В.В. // Микроволновые технологии в народном хозяйстве / Одесса.2002 С. 66 – 72. 7. *Контарь А.А., Марков Д.В., Терещенко А. И.* О воздействии СВЧ-излучения на некоторые биологические объекты // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1999. Вып.111. С. 68 – 70. 8. Микроволновая обработка свежесобранных и покоящихся семян. Диндорого В.Г., Контарь А.А., Марков Д.В., Скляревский К.М., Терещенко А.И. // 6-я Междунар. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». Харьков.:2000. С. 262 – 263. 9. *Диндорого В.Г., Контарь О. Я., Марков Д. В., Скляревський К. М., Терещенко О.І.* Дослідження НВЧ-обробки озимої пшениці // Селекція та насінництво. Харків.: 2001. С. 210 – 215. 10. *Декларац. пат. на винахід № 37730А. О.Я Контарь, Д.В. Марков, В.Г. Диндорого, К.М. Скляревський,* «Спосіб визначення схожості насіння». 2001. Бюл. № 4. 11. *Марков Д.В., Терещенко А.И.* Электрофизические методы исследования некоторых биологических объектов после воздействия СВЧ-облучения // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 121. С. 181 – 184. 12. *Климонтович Ю.Л.* Вопросы статистической теории взаимодействия атомов с излучением // УФН. 1970. Т. 101. С. 578. 13. *Климонтович Ю.Л.* Кинетическая теория электромагнитных процессов. М.: Наука, 1980. 376 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 28.11.2002*