

УДК 631.53.027:57.043

UDC 631.53.027:57.043

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕМЯН СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ БОКОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА

DETERMINATION OF DIELECTRIC PARAMETERS OF SEEDS OF AGRICULTURAL CROPS WITH THE EFFECTS OF LATERAL ELECTRIC FIELD OF MEASURING CAPACITOR

Козырев Антон Евгеньевич
аспирант кафедры физики

Kozyrev Anton Evgenyevich
postgraduate student

Хайновский Владимир Иванович
к.ф.-м.н., доцент

Khainovskiy Vladimir Ivanovich
Cand.Phys.-Math.Sci., associate professor

Копылова Оксана Сергеевна
к.ф.-м.н., доцент

Kopylova Oksana Sergeevna
Cand.Phys.-Math.Sci., associate professor

Никитин Петр Владимирович
к.т.н., доцент
ФГБОУ ВПО Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

Nikitin Petr Vladimirovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
FGBOU VPO Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

В работе представлена методика экспериментального определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь смеси семена с.-х. культур – воздух посредством измерения электрической емкости ячейки плоского конденсатора, плотно заполненного семенами в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц

In the article, the technique of experimental determination of dielectric permeability and a tangent of an angle of dielectric losses of mixed seeds of agro cultures – air by means of measurement of the electric capacity of the cell of a flat condenser which has been densely filled with seeds in a range of frequencies of 1 kHz – 1 MHz is presented

Ключевые слова: СЕМЕНА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Keywords: SEEDS, ELECTRIC CAPACITORS, ELECTRIC CAPACITANCE, DIELECTRIC CONSTANT

Предпосевная обработка семян с.-х. культур электромагнитными полями (НЧ, КВЧ, импульсными высоковольтными) с целью улучшения их посевных качеств является одним из экологически чистых методов повышения урожайности культур [1,2,3]. Для объяснения экспериментальных результатов указанной обработки необходимо знание диэлектрических свойств семян, например, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь и их изменений под влиянием внешних воздействий [4,5]. Отличия в диэлектрических параметрах семян с.-х. культур до и после их обработки электромагнитными полями и связь этих отличий с посевными качествами

семян могли бы стать экспресс - методом оценки воздействий указанных предпосевных обработок на посевные качества семян.

Целью настоящей работы является отработка методики экспериментального определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь смеси семена с.-х. культур – воздух посредством измерения электрической емкости ячейки плоского конденсатора, плотно заполненного семенами в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц. При этом учитывается боковое электрическое поле «выпучивания», возникающее на краях электродов плоского измерительного конденсатора. Диэлектрическая проницаемость смеси определялась по классической формуле:

$$\varepsilon_{см} = C_{см}/C, \quad (1)$$

где $C_{см}$ и C – соответственно электрические емкости заполненного семенами и пустого (с воздухом) измерительного конденсатора.

Ячейка измерительного конденсатора представляла собой плоский конденсатор с площадями параллельных верхнего и нижнего электродов, равными $S = 50 \times 50$ мм² и расстоянием между ними - 15 мм, так что его расчетная электрическая емкость равна $C_0 = 1,5$ пФ. С боков объем ячейки конденсатора ограничен деревянными стенками. Известно, что на краю электродов конденсатора проявляются краевые эффекты электрического поля, например, эффект «выпучивания» поля вне края конденсатора на достаточно большое расстояние [6]. Оценим количественно влияние указанных краевых эффектов на измеряемую электрическую емкость плоского конденсатора. Детальный анализ распределения бокового электрического поля в пространстве конденсатора можно выполнить математическими расчетами методом конформного отображения в теории функций комплексного переменного [7]. При этом получаем обратное отображение полосы комплексного потенциала $0 < \text{Im}w < V$ на верхнюю половину комплексной плоскости Z конденсатора в виде соотношения:

$$Z = (d/2\pi) * (\omega + \ln\omega), \quad (3)$$

$$\omega = \exp(i(\pi w/V)), \quad (4)$$

где V – величина напряжения, например, на верхнем электроде, а $(d/2)$ – половина толщины межэлектродного промежутка конденсатора.

По принципу симметрии соотношения (3) и (4) реализует отображения всей полосы $-V < \text{Im}w < V$ на полную область конденсатора.

Представим Z и ω в соотношении (3) в виде:

$$Z = x+iy \text{ и } \omega = \rho * \exp(i\psi), \quad (5)$$

где i – «мнимая» единица, ρ – модуль и ψ – аргумент комплексного представления. Подставляя (4) и (5) в (3) и отделяя действительные и мнимые части, получаем необходимые уравнения для координат x и y :

$$x = (d/2\pi) * (\rho \cos\psi + \ln\rho), \quad y = (d/2\pi) * (\rho \sin\psi + \psi). \quad (6)$$

С другой стороны комплексный потенциал w электрического поля записывается в виде:

$$w = \text{Re}w + i\text{Im}w = u + iv, \quad (7)$$

$$\text{где } u = \text{Re}w = (V/\pi)\ln\rho \text{ и } v = \text{Im}w = (V/\pi)\psi \quad (8)$$

соответственно силовая и потенциальная части функции w электрического поля. Полагая в (8) и (6) $\psi = \text{const}$, получаем параметрические уравнения эквипотенциальных линий распределения электрического поля конденсатора. Соответственно, полагая $\rho = \text{const}$ из (8) и (6), имеем параметрические уравнения распределения силовых линий. На рисунке 1а представлен график силовых и эквипотенциальных линий, построенных по уравнениям (6) и в предположении $d = 15$ мм; $V = \pm 0,5$ В (соответственно на верхнем и нижнем электродах конденсатора). График рис. 1б построен на основе соотношения для напряженности электрического поля вдоль силовой линии [7]:

$$E = \left| \frac{dw}{ds} \right| = \frac{dv}{ds} = \left(\frac{2V}{d} \right) \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + 2\rho \cos\psi + 1}} \quad (9)$$

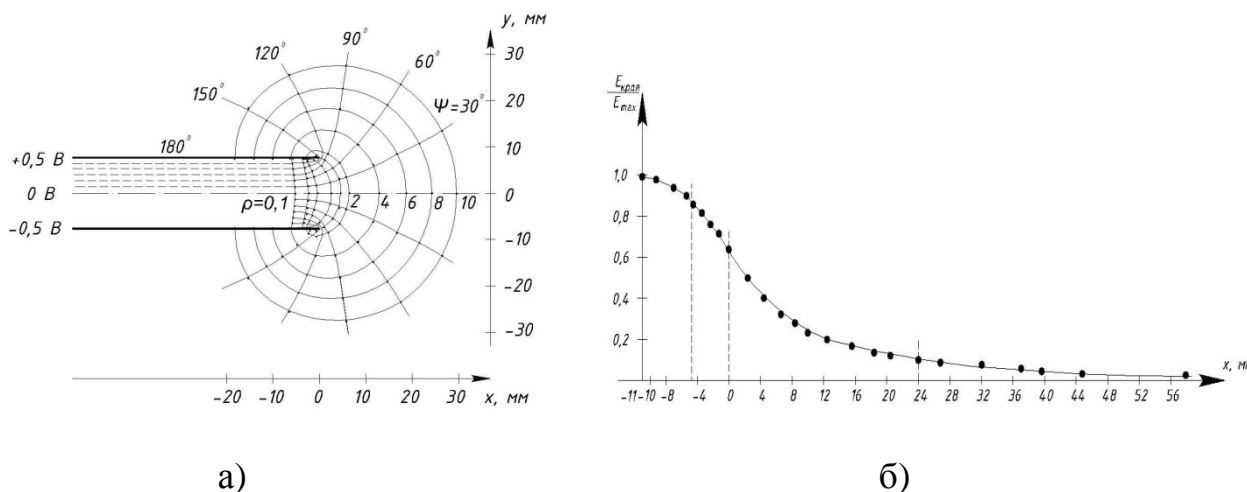


Рисунок 1 – а) распределение эквипотенциальных ($\psi = \text{const}$) и силовых ($\rho = \text{const}$) линий электрического поля «выпучивания» на краю конденсатора (заполненного воздухом); б) зависимость величины электрического поля от расстояния до краев электродов конденсатора по оси его симметрии (для $y = 0$).

Из (9) следует, что на краях электродов конденсатора (при $x = 0$) напряженность электрического поля – $E_{\text{края}}$ составляет только 66,7% от ее максимально возможной величины - $E_{\text{макс}}$ и монотонно возрастает до $E_{\text{макс}}$ при $x = -11$ мм (т.е. в глубине конденсатора). В противоположном направлении ($x > 0$) поле «выпучивания» монотонно уменьшается до нуля. Указанное изменение электрического поля создает уменьшение электрической емкости измерительного конденсатора внутри него на величину $\Delta C_{\text{края}}$ и одновременно добавляет электрическую емкость $\Delta C_{\text{вып}}$, создаваемую боковым «выпучиванием» поля. Определим $\Delta C_{\text{края}}$ по формуле:

$$\Delta C_{\text{края}} = \frac{\epsilon_0 \cdot S_{\text{края}} \cdot (d_0 - d_{\text{кр}}^{\text{сп}})}{d_0 \cdot d_{\text{кр}}^{\text{сп}}}, \quad (10)$$

где $S_{\text{края}} = 4 \cdot (39 \cdot 11) \text{ мм}^2 = 1716 \text{ мм}^2$ – боковая площадь, соответствующая уменьшению поля на краю и внутри конденсатора; $d_0 = 15 \text{ мм}$ – расстояние между электродами конденсатора; $d_{\text{кр}}^{\text{cp}}$ – длина силовой линии, соответствующая средней координате $x_{\text{cp}} = 4,5 \text{ мм}$ для среднего поля на краю $E_{\text{кр}}^{\text{cp}} = \frac{1}{2} (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) \approx 0,82 E_{\text{max}}$. Т.к. $E_{\text{кр}}^{\text{cp}} = u / d_{\text{кр}}^{\text{cp}}$ и $E_{\text{max}} = u / d_0$, где u – напряжение на электродах конденсатора, то получаем, что $d_{\text{кр}}^{\text{cp}} = d_0 / 0,82 = 18,3 \text{ мм}$. Подставляя все эти величины в (9), получаем $\Delta C_{\text{края}} = 0,183 \text{ пф}$. Оценку электрической емкости, определяемой боковым электрическим полем «выпучивания» выполним по соотношению:

$$\Delta C_{\text{вып}} = \frac{\epsilon_0 \cdot S_{\text{вып}}}{d_{\text{вып}}^{\text{cp}}}, \quad (11)$$

Из рис. 1б следует, что средняя величина напряженности поля «выпучивания» равна $E_{\text{вып}}^{\text{cp}} \approx 0,125 \cdot E_{\text{max}}$ и соответствует $x_{\text{cp}} = 24 \text{ мм}$ ($\rho = 8$). Тогда из рис. 1а получаем оценку длины соответствующей силовой линии, равную $d_{\text{вып}}^{\text{cp}} \approx 120 \text{ мм}$. Оценку величины $S_{\text{вып}}$ получим, рассматривая модель электрической емкости $\Delta C_{\text{вып}}$ в виде плоского электрического конденсатора с развернутыми электродами, так что его электрическое поле оказывается снаружи, а не зажато между параллельными электродами как в классическом случае. Площадь электродов этого конденсатора - $S_{\text{вып}}$ определяется глубиной их перекрытия снаружи силовыми линиями поля на расстояние $\sim 28 \text{ мм}$ (при $\rho = 8$, рис. 1а). Это расстояние существенно меньше общей протяженности «выпучивания» поля от краев конденсатора наружу по оси его симметрии (для $y = 0$), достигающей $x \approx 240 \text{ мм}$ (при $E = 0,01 \cdot E_{\text{max}}$ и $\rho = 99$). Оценка дает $S_{\text{вып}} \approx 4 \cdot (50 + 28) \cdot 28 \approx 8740 \text{ мм}^2$ и из (11) получаем, что $\Delta C_{\text{вып}} \approx 0,65 \text{ пф}$. Электрическая емкость рассматриваемого пустого конденсатора с учетом краевых эффектов определяется балансом емкостей:

$$C_{\text{изм}}^{(0)} = C_0 + \Delta C_{\text{доп}}^{(0)} \approx 1,97 \text{ пф}, \quad (12)$$

где $\Delta C_{\text{доп}}^{(0)} = (\Delta C_{\text{вып}} - \Delta C_{\text{края}}) \approx 0,47$ пф, а $C_0 \approx 1,5$ пф соответственно дополнительная и расчетная геометрическая емкости измерительного конденсатора. Из (12) получаем, что отношение $(\Delta C_{\text{доп}}^{(0)}) / (C_0) \approx 0,31$, т.е. достаточно велика. Необходимо также отметить, что величина электрической емкости - $\Delta C_{\text{доп}}^{(0)}$, определяемая краевыми эффектами поля в случае заполнения конденсатора средой (семенами) остается такой же, как и для пустого конденсатора. Используя соотношение (11) и то, что $C_0 = (\epsilon_0 * S) / d_0$ – электрическая емкость пустого конденсатора, получим, что:

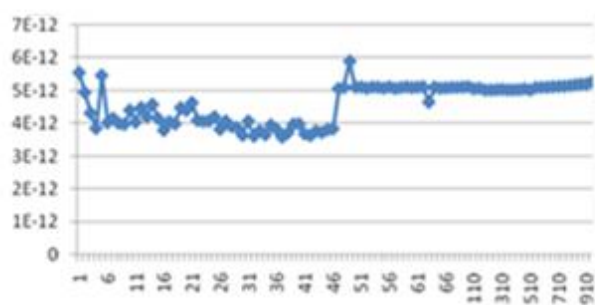
$$\frac{\Delta C_{\text{доп}}^{(0)}}{C^{(0)}} \approx \left(\frac{S_{\text{вып}}}{S_0} \right) \left(\frac{d_0}{d_{\text{вып}}^{\text{ср}}} \right) = 8 \cdot \left(\frac{x_{\text{ср}}}{a} \right) \left[1 + 2 \left(\frac{x_{\text{ср}}}{a} \right) \right] \left(\frac{E_{\text{вып}}^{\text{ср}}}{E_{\text{max}}} \right), \quad (13)$$

где a – длина катета электрода конденсатора, $S_0 = a^2$, $x_{\text{ср}} \approx 1,6d_0$ – координата, соответствующая «средней» величине электрического поля «выпучивания» - $E_{\text{вып}}^{\text{ср}}$, $S_{\text{вып}}$ – площадь электродов, перекрываемая полем «выпучивания». Полагая в (13) $\frac{E_{\text{вып}}^{\text{ср}}}{E_{\text{max}}} \approx 0,125$ и выбирая $\frac{\Delta C_{\text{доп}}^{(0)}}{C^{(0)}} \leq 0,05$ (т.е. меньше 5%) из (13) получаем, что должно выполняться условие:

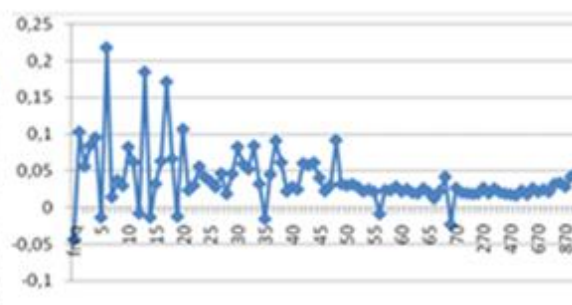
$$a \geq 34 * d_0 \quad (14)$$

Если положим $d_0 = 15$ мм, то из (14) следует, что $a \geq 51$ см и $S_0 = 51 * 51$ см², т.е. площадь каждого электрода конденсатора для устранения влияния краевых эффектов электрического поля на электрическую емкость измерительного конденсатора должна быть очень большой. Однако, анализ показывает, что устранять краевые эффекты поля в конденсаторе совершенно не нужно. При заполнении конденсатора диэлектриком он остается подключенным к источнику напряжения. Это означает, что напряжение между его электродами, а, следовательно, и напряженность поля в конденсаторе не изменяются, т.е. в обоих случаях одинаковы. При этом электрическое смещение внутри конденсатора увеличивается в ϵ раз.

Во столько же раз увеличивается заряд на электродах конденсатора, и, следовательно, в ϵ раз увеличивается электрическая емкость конденсатора. Поэтому, при измерениях диэлектрической проницаемости пользуются строго соотношением (1) без учета рассмотренных краевых эффектов электрического поля. На рис. 2а, в качестве примера, приведена экспериментальная кривая зависимости электрической емкости пустого измерительного конденсатора от частоты переменного электрического поля в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц и амплитудой измерительного напряжения 1В. Из этого рисунка следует, что измеренная электрическая емкость пустого конденсатора равна 5,3 пф и, следовательно, на 3,8 пф превосходит расчетную геометрическую емкость конденсатора в 1,5 пф. Это объясняется вкладом «паразитных» электрических емкостей металлических винтов и соответствующих им втулок крепления верхней крышки (электрода) конденсатора. Рис. 2б отображает соответствующую зависимость для тангенса угла диэлектрических потерь пустого конденсатора. На рис.3 приведены подобные зависимости для измерительного конденсатора, плотно заполненного семенами сои сорта «Дуар». Указанные измерения выполнены автоматизировано с помощью измерителя иммитанса E7-25 с применением соответствующего программного обеспечения и передачей измеряемых данных на персональную ЭВМ.



а)



б)

Рисунок 2 – зависимости электрической емкости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) от частоты для пустой (заполненной воздухом) ячейки.

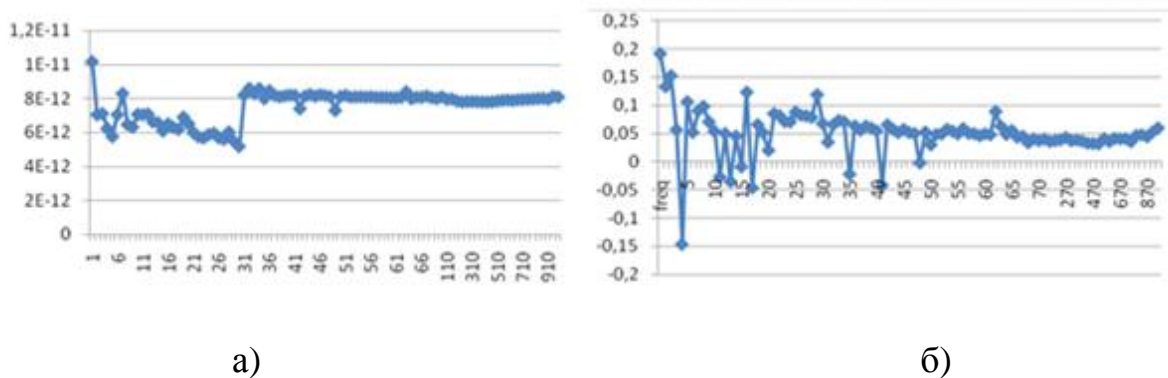


Рисунок 3 – зависимости электрической емкости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) от частоты для измерительной ячейки конденсатора, плотно заполненного семенами сои сорта «Дуар».

Из рис. 2 и 3 следует, что для частот, меньших 40÷50 кГц, величины измеряемых электрической емкости – $C_{см}$ и тангенса угла диэлектрических потерь – $tg\delta$ проявляют существенно немонотонный характер. Причем на некоторых частотах $tg\delta$ становится даже отрицательным, т.е. проявляются резонансы. Указанные эффекты, по-видимому, связаны с наличием электропроводности по переменному току в семенах и в веществе бокового деревянного ограждения, что, в свою очередь, определяется структурой и поведением связанной воды, заключенной в молекулах вещества, в переменном электрическом поле [8,9]. Следовательно, при определении величин $tg\delta$ необходимо учесть шунтирующее влияние электропроводности боковых деревянных стенок ($G_{бок}$) конденсатора. Поэтому истинные значения тангенса угла диэлектрических потерь определяются соотношениями:

$$tg\delta_{ист} = \frac{G_{ист}}{2\pi f C_{ист}^{(см)}}, \quad G_{ист} = G_{изм}^{(см)} - G_{бок} \quad (15)$$

где $G_{изм}^{(см)}$ и $G_{бок} = 2,26 \cdot 10^{-6} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$, измеренные электрические проводимости для заполненной семенами и пустой ячейки конденсатора. В общем случае диэлектрическая проницаемость смеси с.-х. семена – воздух является комплексной величиной:

$$\epsilon_{ком}^{(см)} = \epsilon_{см} - i\tilde{\epsilon}_{см}, \quad \tilde{\epsilon}_{см} = \epsilon_{см} \text{tg}\delta_{ист}, \quad (16)$$

где $\epsilon_{см}$ и $\tilde{\epsilon}_{см}$ - действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости. В таблице 1 отражены экспериментальные данные измерений диэлектрических параметров для семян нескольких сельскохозяйственных культур: сои, гороха, пшеницы, просо, гречихи. Также указаны экспериментально установленные степень заполнения (p) семенами объема измерительного конденсатора и влажность семян [10,11].
Таблица 1. Экспериментальные диэлектрические параметры смесей семена с.-х. культур – воздух (частота измерения 1 МГц, влажность семян - 13 %).

Параметр/культура	Соя	Горох	Пшеница	Просо	Гречиха
p	0,65	0,65	0,61	0,66	0,64
$C_{изм}^{см}$, пф	8,49	10,27	10,18	12,08	11,74
$G_{изм}^{(см)} \cdot 10^6$	4,35	6,02	5,46	6,67	6,85
$G_{ист}^{(см)} \cdot 10^6$	2,09	3,76	3,20	4,41	4,59
$\text{tg}\delta_{изм}^{(см)}$	0,082	0,093	0,085	0,088	0,093
$\text{tg}\delta_{ист}^{(см)}$	0,039	0,058	0,050	0,058	0,062
$\epsilon_{см}$	1,69	2,08	2,03	2,35	2,28
$\epsilon_{см}^*$ смеси	0,066	0,116	0,100	0,136	0,141

Таким образом, в статье рассмотрены краевые эффекты электрического поля в методике определения диэлектрической проницаемости семян сельскохозяйственных культур посредством измерения электрической емкости конденсатора, что позволяет с большим пониманием применять указанную методику, а, следовательно, получать достоверные результаты измерений. В последующем рассмотренная методика будет применена для измерения диэлектрических параметров

семян с.-х. культур после их предпосевной обработки электромагнитными полями.

Список использованных источников

1. Дульский А.Н., Стародубцева Г.П., Хайновский В.И. «Предпосевная обработка семян моркови сорта «Витаминная-б» импульсным электрическим полем» / Вестник РАСХН. 2009. №6. С.59-60.
2. Хайновский В.И., Козырев А.Е. «Предпосевная обработка семян сои электромагнитным полем» / Материалы V международной научной конференции – научный потенциал XXI века, естественные и технические науки / СевКавГТУ, Ставрополь – 2011, т.1, с.181-185.
3. Хайновский В.И., Копылова О.С., Козырев А.Е. «Расчет доз воздействия импульсного электрического поля на семенной материал» / Аграрная Россия, 2012, №9, с.37-42.
4. Berbert P.A., Qneiroz D.M., Melo E.C. «Dielectric properties of Common Bean»// Biosystems Engineering (2002), vol. (83)4, pp. 449-462.
5. Horynski M.B. «Analysis of Correction between the Influence of Electrostatic Field and Pressure on the Dielectric Permittivity of Grain» // International Agrophysics, 2000, vol. 14, pp. 33-56.
6. Калашников С.Г. – Электричество. М. «Наука». 1970. С.63-64.
7. Фукс Б.А., Шабат Б.В. – Функции комплексного переменного и некоторые их приложения. М. «Наука». 1964.
8. Вода: структура, состояние, сольватация. Достижения последних лет. М. «Наука». 2003. 404 с.
9. Семихина А.П. «Определение магнитных и диэлектрических свойств связанной воды с помощью индуктивных L-ячеек/ Научное приборостроение. 2006. Т.16. №1. С.47-52.
10. Хайновский В.И., Козырев А.Е. «Оценка степени заполнения семенами объема измерительного конденсатора» / Техника в сельском хозяйстве – 2011, т.3, с.25.
11. Хайновский В.И., Козырев А.Е. «Оценка степени заполнения семенами измерительного объема» / Вестник АПК Ставрополя, 2011, вып.2, с.41-42.