



## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ

*Куцевол Олег Миколайович к.т.н.*  
*Kutsevol O.*

**Анотація:** запропоновано обґрунтування необхідності та важливості проведення детальних досліджень основних діелектричних параметрів зерна: відносної діелектричної проникності (модуля комплексної діелектричної проникності), елементів комплексної діелектричної проникності (дійсної та уявної складових), а також тангенса кута діелектричних втрат у вузьких проміжках радіочастотного діапазону (довгих і середніх радіохвиль).

**Ключові слова:** діелектрична проникність, зерно, тангенс кута діелектричних втрат, радіочастотний, вологість.

### *Постановка проблеми*

Вологість є однією з основних якісних характеристик зерна пшениці. Для її визначення у переважній більшості галузевих лабораторій використовується трудомісткий та енергозатратний термогравіметричний метод [1], що дає, на думку фахівців-практиків, близькі до об'єктивних результати, проте стандартний термогравіметричний метод контролю вологості передбачає на одне вимірювання близько 1,33 години, при цьому абсолютна похибка складає  $\pm 0,5\%$  при споживаній потужності 2 кВт.

Значно кращі техніко-економічні та метрологічні характеристики має діелектрометричний метод контролю вологості [2-5], який характеризується високою точністю, швидкодією, простотою реалізації та можливістю автоматизації. Проте, при побудові діелектричних вологомірів виникає проблема їх градування. Справа в тому, що аналітичне визначення основних діелектричних характеристик вологих капілярно-пористих та сипких матеріалів є вельми складним завданням.

Існуючі нині діелектрометричні засоби контролю вологості є, в основному, однопараметричними, рівняння градування яких знаходяться дослідним шляхом для конкретних матеріалів. Зміна діелектричних параметрів зерна пшениці, в залежності від частоти електричного поля та вологості, досліджена недостатньо, що значною мірою впливає на точність та вірогідність діелектрометричних засобів контролю вологості.

У зв'язку із цим виникла потреба заповнити дану прогалину та отримати детальну інформацію про поведінку основних діелектричних параметрів зерна на різних проміжках довгохвильового та середньохвильового радіочастотного діапазонів.

### *Аналіз останніх досліджень та публікацій*

Питанням дослідження діелектричних параметрів капілярно-пористих та сипких матеріалів присвячували свої праці в останні десятиріччя Дубров М. С. [6], Кричевський Є. С. [7] та ін. Подальший розвиток даних досліджень відображено в працях [8-10].

В цих роботах досліджувалась зміна діелектричних параметрів в діапазоні частот, на підставі цього були запропоновані нові різновиди методу високочастотної діелектрометрії, що дозволило значно покращити метрологічні характеристики вологомірів. Проте, для подальшого розвитку діелектровологометрії та створення багатопараметричних методів контролю необхідна деталізація цих досліджень у діапазоні радіочастот.

### *Постановка завдання*

Основною метою проведеного дослідження є деталізація значень основних діелектричних параметрів зерна в досить вузьких межах радіочастотного діапазону.

### *Вирішення завдання*

1. Дослідна установка (рис.1) включає в себе такі складові: ЧЕ коаксіального типу  $Z_{ЧЕ}$ , генератори гармонічних коливань  $G1 - G3-118$ ,  $G2 - G4-102$ , зразковий конденсатор  $C_3$ , вольтметр ВЗ-48 та два комутаційних елементи  $K1$  і  $K2$ .

В основі досліджень покладено методику [11], яка базується на матеріалах патенту [12].

Як відомо, відносна діелектрична проникність, в цілому є комплексною величиною

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'',$$

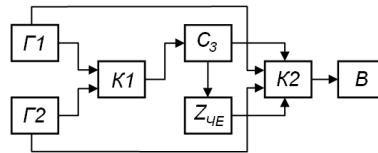


Рис. 1. Структурна схема дослідної установки

Дійсна складова комплексної діелектричної проникності характеризує збільшення ємності чутливого елемента за рахунок вологи досліджуваного матеріалу, а уявна – вказує на збільшення ємності за рахунок діелектричних втрат.

Вимірювана діелектрична проникність

$$\varepsilon = \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2}. \quad (1)$$

Досліджувались основні діелектричні параметри: модуль комплексної діелектричної проникності  $\varepsilon$ , дійсна  $\varepsilon'$  та уявна  $\varepsilon''$  складові діелектричної проникності, а також тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg}\delta$ . Діапазон частот 0,1 кГц...10 МГц був розділений на п'ять піддіапазонів: перший – 0,1...0,9 кГц, другий – 2...10 кГц, третій – 20...100 кГц, четвертий – 0,2...1 МГц, п'ятий – 2...10 МГц.

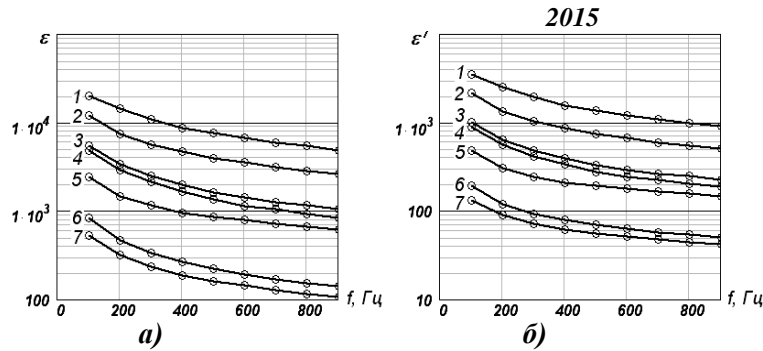
2. Дослідження діелектричних параметрів зерна пшениці.

2.1. Частотний діапазон 0,1...0,9 кГц.

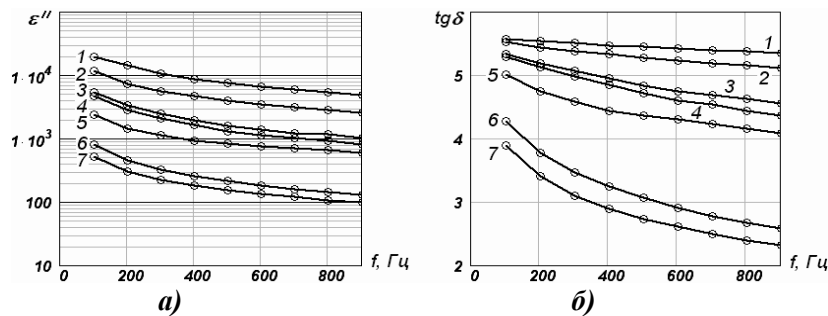
Таблиця 1

Діелектричні параметри пшениці у першому частотному діапазоні

Вологість $W, \%$	Діелектричний параметр	Частота $f, \text{кГц}$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
31,41	$\varepsilon$	19690	1426	10760	8603	7522	6665	5961	5398	4869
	$\varepsilon'$	3479	2533	1922	1547	1359	1209	1087	988,5	896,2
	$\varepsilon''$	19380	14040	10590	8462	7398	6554	5861	5307	4786
	$\operatorname{tg}\delta$	5,57	5,542	5,507	5,47	5,445	5,42	5,394	5,369	5,34
30,78	$\varepsilon$	12000	7319	5626	4707	3973	3520	3129	2851	2622
	$\varepsilon'$	2140	1324	1028	868,1	739,9	660,8	592,3	543,7	503,4
	$\varepsilon''$	11810	7198	5531	4626	3903	3458	3072	2799	2573
	$\operatorname{tg}\delta$	5,519	5,438	5,378	5,329	5,275	5,232	5,187	5,148	5,11
24,13	$\varepsilon$	5430	3340	2463	1961	1609	1405	1240	1173	1057
	$\varepsilon'$	1001	632,4	477,6	388,8	326,1	289,7	260,1	248,1	227,2
	$\varepsilon''$	5337	3279	2416	1922	1575	1375	1212	1147	1033
	$\operatorname{tg}\delta$	5,332	5,185	5,059	4,944	4,83	4,745	4,66	4,622	4,545
23,22	$\varepsilon$	4768	2888	2107	1648	1340	1144	1052	927,2	836,2
	$\varepsilon'$	884,9	553	414,8	333,3	278,3	243	226,3	203,7	187
	$\varepsilon''$	4685	2834	2066	1614	1311	1118	1027	904,6	815
	$\operatorname{tg}\delta$	5,294	5,125	4,979	4,842	4,71	4,6	4,539	4,441	3,357
19,14	$\varepsilon$	2432	1472	1149	937,5	852,8	782,5	720,9	663,8	610,4
	$\varepsilon'$	475,9	303,3	244,6	206,1	190,4	177,4	166	155,3	145,3
	$\varepsilon''$	2385	1440	1122	914,6	831,3	762,1	701,6	645,4	592,8
	$\operatorname{tg}\delta$	5,012	4,748	4,587	4,437	4,365	4,295	4,227	4,155	4,08
15,78	$\varepsilon$	836,6	466,2	335,4	266,5	223,5	191,9	168,8	152,4	139,8
	$\varepsilon'$	190,6	119,3	92,99	78,66	69,43	62,49	57,26	53,45	50,49
	$\varepsilon''$	814,6	450,7	322,3	254,4	212,4	181,5	158,8	142,7	130,4
	$\operatorname{tg}\delta$	4,273	3,779	3,466	3,237	3,059	2,904	2,774	2,669	2,582
13,32	$\varepsilon$	531	316,7	231,4	188,4	161,1	143	127,7	115,5	106,6
	$\varepsilon'$	132,3	89,23	71,19	61,72	55,48	51,25	47,57	44,57	42,35
	$\varepsilon''$	514,3	303,8	220,1	178	151,2	133,5	118,5	106,5	97,88
	$\operatorname{tg}\delta$	3,886	3,405	3,092	2,885	2,726	2,605	2,491	2,391	2,311



**Рис. 2.** Залежність  $\varepsilon(f)$  (а) та  $\varepsilon'(f)$  пшениці у першому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$



**Рис. 3.** Залежність  $\varepsilon''(f)$  (а) та  $\text{tg}\delta(f)$  (б) пшениці у першому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$

## 2.2. Частотний діапазон 2...10 кГц.

Таблиця 2

**Діелектричні параметри пшениці у другому частотному діапазоні**

Вологість $W, \%$	Діелектричний параметр	Частота $f, \text{кГц}$									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	
31,41	$\varepsilon$	2919	2241	1845	1546	1326	1157	1023	930,2	831,2	
	$\varepsilon'$	555,6	436,4	366,8	313,9	274,6	244,5	220,5	203,6	185,6	
	$\varepsilon''$	2866	2198	1808	1514	1297	1131	999,4	907,6	810,2	
	$\text{tg}\delta$	5,159	5,035	4,93	4,824	4,722	4,625	4,533	4,458	4,365	
30,78	$\varepsilon$	1695	1323	1100	922,7	790,2	687,7	616	550,6	492,9	
	$\varepsilon'$	340,3	274,1	234,2	202,2	178,1	159,2	145,9	133,6	122,7	
	$\varepsilon''$	1661	1294	1075	900,2	769,9	669	598,5	534,1	477,4	
	$\text{tg}\delta$	4,88	4,72	4,588	4,451	4,323	4,202	4,102	3,997	3,891	
24,13	$\varepsilon$	638,5	489,8	411,8	350,1	309,5	280,1	250,8	225,9	205,6	
	$\varepsilon'$	150,3	122,2	107,1	94,98	86,82	80,81	74,72	69,46	65,08	
	$\varepsilon''$	620,6	474,3	397,7	337	297,1	268,2	239,4	215	195	
	$\text{tg}\delta$	4,128	3,881	3,711	3,548	3,422	3,319	3,204	3,095	2,997	
23,22	$\varepsilon$	535,2	411,5	358,4	314,8	273	239,5	215,6	192,6	175,4	
	$\varepsilon'$	130,9	107,1	96,63	87,9	79,34	72,34	67,25	62,24	58,42	
	$\varepsilon''$	519	397,3	345,1	302,3	261,2	228,3	204,9	182,3	165,4	
	$\text{tg}\delta$	3,964	3,709	3,571	3,439	3,292	3,156	3,046	2,928	2,831	
19,14	$\varepsilon$	352,2	261,4	211,2	176	153,2	135,5	124,3	112,9	104,8	
	$\varepsilon'$	95,48	77	66,32	58,58	53,38	49,25	46,57	43,78	41,76	
	$\varepsilon''$	339	249,8	200,5	166	143,6	126,2	115,3	104,1	96,18	
	$\text{tg}\delta$	3,55	3,245	3,023	2,833	2,689	2,563	2,475	2,378	2,303	
15,78	$\varepsilon$	93,71	79,65	70,09	65,16	60,69	56,3	53,51	51,71	49,52	

Продовження таблиці 2

	$\varepsilon'$	38,99	35,22	32,57	31,15	29,85	28,54	27,7	27,15	26,46
	$\varepsilon''$	85,21	71,44	62,07	57,23	52,84	48,53	45,78	44,01	41,85
	$\text{tg}\delta$	2,186	2,028	1,906	1,837	1,77	1,7	1,653	1,621	1,581
13,32	$\varepsilon$	71,78	60,28	52,09	47,49	43,71	40,93	39	37,68	36
	$\varepsilon'$	33,06	29,74	27,28	25,84	24,63	23,71	23,07	22,62	22,05
	$\varepsilon''$	63,71	52,43	44,38	39,84	36,12	33,36	31,45	30,14	28,46
	$\text{tg}\delta$	1,927	1,763	1,627	1,542	1,467	1,407	1,363	1,332	1,291

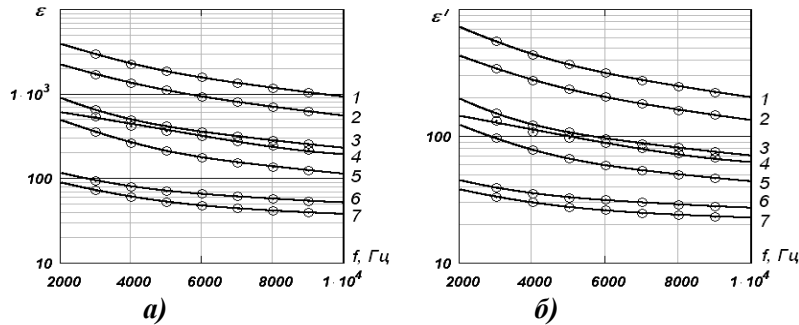


Рис. 4. Залежність  $\varepsilon(f)$  (а) та  $\varepsilon'(f)$  пшениці у другому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$

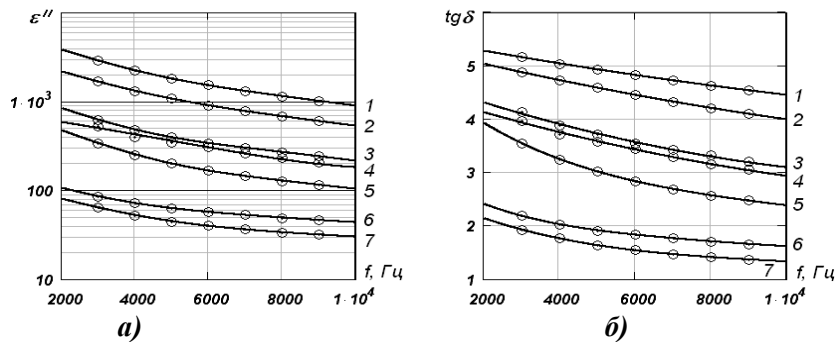


Рис. 5. Залежність  $\varepsilon''(f)$  (а) та  $\text{tg}\delta(f)$  (б) пшениці у другому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$

2.3. Частотний діапазон 20...100 кГц.

Таблиця 3

Діелектричні параметри пшениці у третьому частотному діапазоні

Вологість $W, \%$	Діелектричний параметр	Частота $f, \text{кГц}$								
		20	30	40	50	60	70	80	90	100
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
31,41	$\varepsilon$	497,3	338,3	259	211,3	184,3	162,8	142,8	129,5	118,9
	$\varepsilon'$	123,5	92,56	76,38	66,29	60,37	55,54	50,93	47,79	45,21
	$\varepsilon''$	481,7	325,4	247,4	200,7	174,1	153	133,4	120,4	109,9
	$\text{tg}\delta$	3,9	3,516	3,239	3,027	2,884	2,755	2,619	2,519	2,431
30,78	$\varepsilon$	306,6	224,6	175,8	148,1	131,6	116,1	105,5	96,52	90,54
	$\varepsilon'$	86,17	69,14	58,48	52,18	48,29	44,53	41,91	39,61	38,06
	$\varepsilon''$	294,3	213,7	165,8	138,6	122,4	107,2	96,86	88,02	82,16
	$\text{tg}\delta$	3,415	3,091	2,835	2,657	2,535	2,408	2,311	2,222	2,159
24,13	$\varepsilon$	127,6	104,2	87,45	76,14	68,63	62,69	58,96	55,42	53,28
	$\varepsilon'$	47,35	41,59	37,25	34,2	32,11	30,4	29,31	28,25	27,61
	$\varepsilon''$	118,5	95,58	79,12	68,02	60,66	54,82	51,15	47,67	45,57

Продовження таблиці 3

	$\text{tg}\delta$	2,503	2,298	2,124	1,989	1,89	1,803	1,745	1,687	1,651
23,22	$\varepsilon$	114,8	85,94	73,91	64,01	58,95	55,07	51,25	48,09	46,14
	$\varepsilon'$	44,22	36,85	33,59	30,79	29,31	28,15	26,98	26	25,38
	$\varepsilon''$	105,9	77,64	65,84	56,12	51,14	47,33	43,57	40,54	38,53
	$\text{tg}\delta$	2,395	2,107	1,96	1,823	1,745	1,682	1,615	1,556	1,518
19,14	$\varepsilon$	75,44	60,54	52,2	47,18	43,35	41,16	38,62	36,64	35,77
	$\varepsilon'$	34,02	29,78	27,28	25,72	24,49	23,77	22,92	22,25	21,95
	$\varepsilon''$	67,34	52,71	44,51	39,56	35,77	33,6	31,08	29,11	28,24
	$\text{tg}\delta$	1,98	1,77	1,632	1,538	1,461	1,414	1,356	1,308	1,286
15,78	$\varepsilon$	40,21	36,6	33,87	31,78	30,44	29,49	28,81	28,03	27,45
	$\varepsilon'$	23,46	22,24	21,3	20,56	20,08	19,73	19,48	19,2	18,98
	$\varepsilon''$	32,65	29,07	28,34	24,24	22,88	21,91	21,22	20,42	19,83
	$\text{tg}\delta$	1,392	1,307	1,237	1,179	1,14	1,111	1,089	1,064	1,045
13,32	$\varepsilon$	29,25	26,84	25,12	24,1	23,39	22,77	22,24	21,86	21,51
	$\varepsilon'$	19,65	18,76	18,11	17,73	17,45	17,22	17,01	16,86	16,73
	$\varepsilon''$	21,67	19,2	17,41	16,33	15,58	14,9	14,33	13,9	13,51
	$\text{tg}\delta$	1,103	1,023	0,961	0,921	0,892	0,866	0,842	0,824	0,808

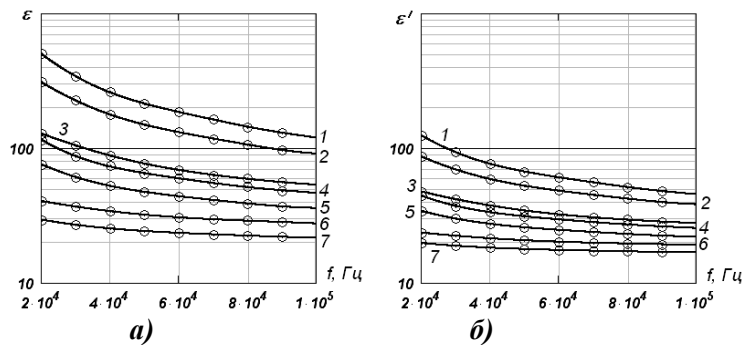


Рис. 6. Залежність  $\varepsilon(f)$  (а) та  $\varepsilon'(f)$  пшениці у третьому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$

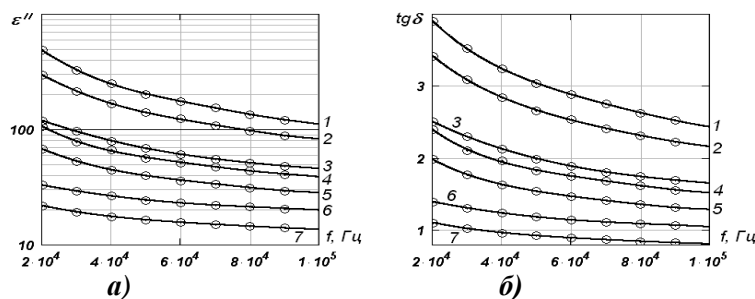


Рис. 7. Залежність  $\varepsilon''(f)$  (а) та  $\text{tg}\delta(f)$  (б) пшениці у третьому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$

2.4. Частотний діапазон 0,2...1 МГц.

Таблиця 4

Діелектричні параметри пшениці у четвертому частотному діапазоні

Вологість $W, \%$	Діелектричний параметр	Частота $f, \text{МГц}$								
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
31,41	$\varepsilon$	69,45	52,61	43,96	38,39	34,94	32,21	30,17	28,82	27,42
	$\varepsilon'$	32,33	27,4	24,68	22,84	21,66	20,71	19,98	19,48	18,97

		Продовження таблиці 4								
	$\varepsilon''$	61,46	44,92	36,83	30,86	27,41	24,68	22,61	21,24	19,8
	$\text{tg}\delta$	1,901	1,639	1,474	1,351	1,265	1,192	1,132	1,09	1,044
30,78	$\varepsilon$	52,22	44,13	37,36	33,45	30,96	29,09	27,82	26,43	25,5
	$\varepsilon'$	28,19	24,74	22,49	21,14	20,26	19,58	19,12	18,6	18,25
24,13	$\varepsilon''$	47,48	36,55	29,83	25,92	23,41	21,51	20,22	18,78	17,81
	$\text{tg}\delta$	1,684	1,478	1,326	1,226	1,155	1,099	1,057	1,01	0,976
23,22	$\varepsilon$	38,51	32,45	29,29	27,18	25,98	25,03	24,12	23,32	22,69
	$\varepsilon'$	22,88	20,79	19,66	18,88	18,43	18,07	17,73	17,42	17,18
19,14	$\varepsilon''$	30,97	24,91	21,71	19,56	18,35	17,31	16,35	15,5	14,82
	$\text{tg}\delta$	1,353	1,198	1,105	1,036	0,994	0,958	0,923	0,89	0,863
15,78	$\varepsilon$	34,46	29,46	26,91	25,41	24,12	23,24	22,57	21,84	21,37
	$\varepsilon'$	21,5	19,72	18,78	18,22	17,73	17,39	17,14	16,86	16,68
13,32	$\varepsilon''$	26,93	21,89	19,28	17,72	16,35	15,41	14,69	13,89	13,36
	$\text{tg}\delta$	1,253	1,11	1,026	0,973	0,922	0,886	0,857	0,824	0,801
19,14	$\varepsilon$	28,63	25,47	23,56	22,4	21,78	21,09	20,52	20,22	19,94
	$\varepsilon'$	19,42	18,24	17,51	17,07	16,83	16,57	16,35	16,24	16,13
15,78	$\varepsilon''$	21,04	17,78	15,75	14,5	13,82	13,05	12,39	12,04	11,71
	$\text{tg}\delta$	1,084	0,975	0,9	0,849	0,821	0,788	0,758	0,742	0,726
13,32	$\varepsilon$	23,46	21,81	20,84	20,03	19,58	19,2	18,97	18,67	18,49
	$\varepsilon'$	17,48	16,85	16,47	16,17	16	15,86	15,78	15,67	15,61
15,78	$\varepsilon''$	15,65	13,85	12,76	11,82	11,28	10,82	10,53	10,14	9,911
	$\text{tg}\delta$	0,896	0,822	0,774	0,731	0,705	0,682	0,667	0,647	0,635
13,32	$\varepsilon$	19,32	18,42	17,93	17,63	17,43	17,27	17,15	17,04	16,97
	$\varepsilon'$	15,91	15,59	15,43	15,34	15,28	15,24	15,22	15,2	15,19
13,32	$\varepsilon''$	10,97	9,82	9,132	8,688	8,382	8,121	7,898	7,7	7,565
	$\text{tg}\delta$	0,69	0,63	0,592	0,566	0,548	0,533	0,519	0,507	0,498

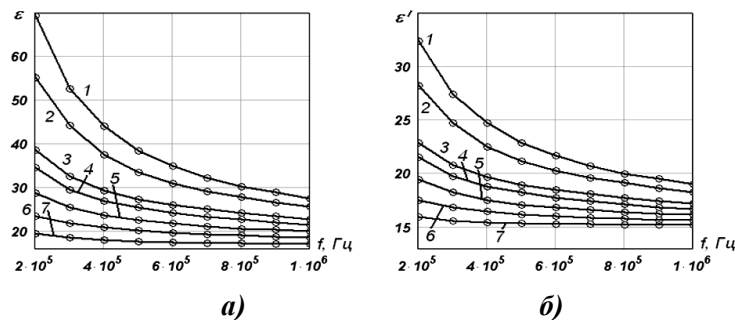


Рис. 8. Залежність  $\varepsilon(f)$  (а) та  $\varepsilon'(f)$  пшениці у четвертому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$

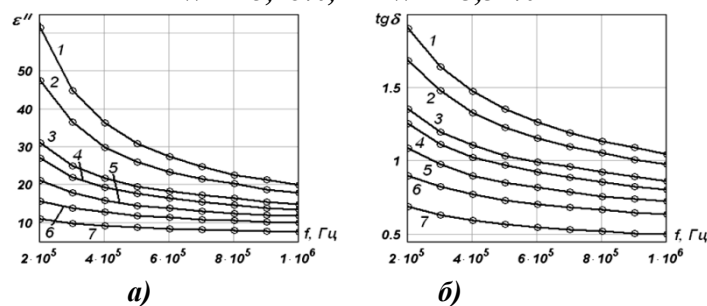


Рис. 9. Залежність  $\varepsilon''(f)$  (а) та  $\text{tg}\delta(f)$  (б) пшениці у четвертому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$



Діелектричні параметри пшениці у п'ятому частотному діапазоні

Вологість $W, \%$	Діелектричний параметр	Частота $f, \text{МГц}$								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
31,41	$\varepsilon$	21,46	19,45	18,43	17,86	17,44	17,17	16,94	16,77	16,66
	$\varepsilon'$	16,71	15,95	15,59	15,4	15,28	15,22	15,18	15,17	15,18
	$\varepsilon''$	13,47	11,13	9,83	9,044	8,4	7,941	7,504	7,141	6,852
	$\text{tg}\delta$	0,806	0,698	0,631	0,587	0,55	0,522	0,494	0,471	0,451
30,78	$\varepsilon$	20,71	18,67	18,14	17,6	17,28	17,03	16,86	16,71	16,59
	$\varepsilon'$	16,42	15,78	15,49	15,33	15,25	15,2	15,18	15,8	15,2
	$\varepsilon''$	12,61	10,53	9,435	8,646	8,135	7,68	7,349	6,99	6,643
	$\text{tg}\delta$	0,768	0,667	0,609	0,564	0,534	0,505	0,484	0,461	0,437
24,13	$\varepsilon$	19,41	18,23	17,65	17,26	17,06	16,87	16,72	16,62	16,55
	$\varepsilon'$	15,94	15,52	15,34	15,24	15,2	15,18	15,18	15,19	15,22
	$\varepsilon''$	11,08	9,561	8,724	8,103	7,74	7,37	7,013	6,741	6,499
	$\text{tg}\delta$	0,695	0,616	0,569	0,532	0,509	0,486	0,462	0,444	0,427
23,22	$\varepsilon$	18,93	17,96	17,49	17,18	16,95	16,81	16,7	16,59	16,53
	$\varepsilon'$	15,76	15,43	15,3	15,22	15,19	15,17	15,18	15,2	15,23
	$\varepsilon''$	10,48	9,177	8,484	7,96	7,525	7,239	6,962	6,643	6,427
	$\text{tg}\delta$	0,665	0,595	0,555	0,523	0,496	0,477	0,459	0,437	0,422
19,14	$\varepsilon$	18,16	17,49	17,14	16,95	16,79	16,65	16,6	16,52	16,48
	$\varepsilon'$	15,5	15,3	15,22	15,19	15,17	15,18	15,19	15,23	15,28
	$\varepsilon''$	9,47	8,484	7,898	7,525	7,185	6,837	6,679	6,406	6,174
	$\text{tg}\delta$	0,611	0,555	0,519	0,496	0,474	0,45	0,44	0,421	0,404
15,78	$\varepsilon$	17,45	17,05	16,81	16,68	16,59	16,53	16,49	16,45	16,44
	$\varepsilon'$	15,29	15,2	15,17	15,18	15,2	15,23	15,26	15,33	15,4
	$\varepsilon''$	8,416	7,72	7,234	6,908	6,644	6,433	6,225	5,979	5,778
	$\text{tg}\delta$	0,551	0,508	0,477	0,455	0,437	0,423	0,408	0,39	0,375
13,32	$\varepsilon$	16,57	16,47	16,45	16,45	16,47	16,52	16,56	16,65	16,74
	$\varepsilon'$	15,2	15,28	15,36	15,43	15,53	15,66	15,75	15,89	16,03
	$\varepsilon''$	6,597	6,149	5,872	5,705	5,48	5,26	5,138	4,957	4,807
	$\text{tg}\delta$	0,434	0,402	0,382	0,37	0,353	0,336	0,326	0,312	0,3

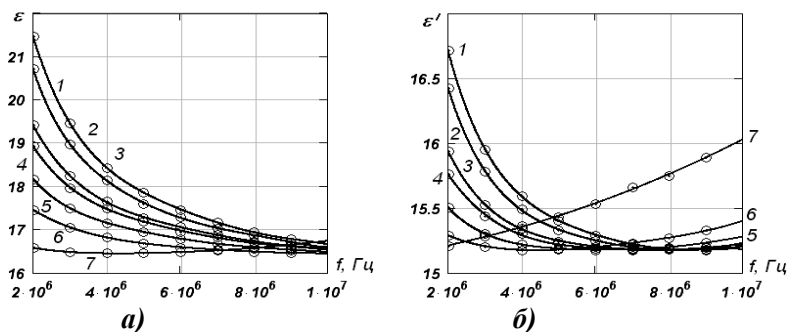
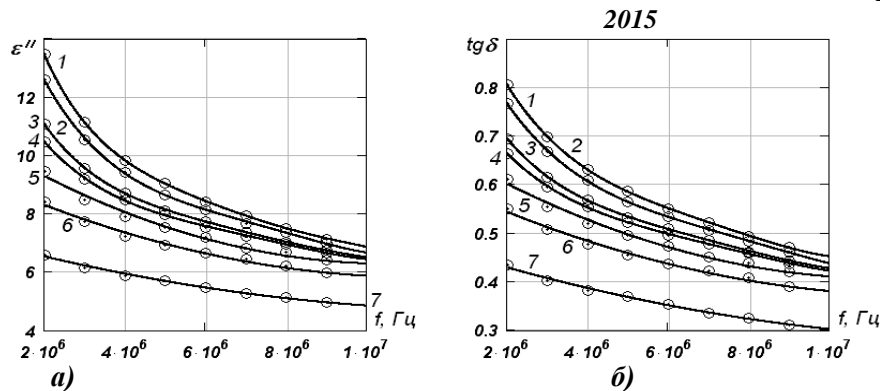


Рис. 10. Залежність  $\varepsilon(f)$  (а) та  $\varepsilon'(f)$  пшениці у п'ятому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$



**Рис. 11.** Залежність  $\varepsilon''(f)$  (а) та  $\text{tg}\delta(f)$  (б) пшениці у  $n$ 'ятому частотному діапазоні для різних вологостей: 1 –  $W = 31,41\%$ ; 2 –  $W = 30,78\%$ ; 3 –  $W = 24,13\%$ ; 4 –  $W = 23,22\%$ ; 5 –  $W = 19,14\%$ ; 6 –  $W = 15,78\%$ ; 7 –  $W = 13,32\%$

### Висновок

Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що основні діелектричні параметри  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  і  $\text{tg}\delta$  залежать від частоти прикладеного до зерна електричного поля, причому, найбільша залежність спостерігається на частотах орієнтаційної поляризації.

Дослідження проводились у досить вузьких частотних діапазонах, що дало можливість одержати деталізовані числові значення діелектричних параметрів.

Одержані числові значення можуть бути використані в подальших дослідженнях зерна пшениці та при калібруванні височастотних вологомірів з метою зменшення їх похибок.

### Список літератури

1. Зерно. Метод определения влажности : ГОСТ 13586.5-93 [Действителен от 1993–10–21]. – М. : Межгосударственный стандарт, 1993. – 9 с.
2. Куцевол Олег Миколайович. Радіочастотні методи та засоби контролю вологості зерна : монографія / Олег Миколайович Куцевол, Микола Олександрович Куцевол, Володимир Олександрович Поджаренко. – Вінниця : РВВ ВДАУ, 2009. – 115 с. – ISBN-978-966-2959-59-3.
3. Куцевол О. М. Метод контролю вологості із нестабільними діелектричними втратами і пористістю / О. М. Куцевол, М. О. Куцевол // *Наука i wyksztaicenie bez granic – 2010 : VI międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 07-15 grudnia 2010 roku : тези доп.* – Перемишль, 2002. – Vol. 23. – С.70–73
4. Куцевол Олег Миколайович. Метод визначення діелектричних параметрів вологого зерна / Олег Миколайович Куцевол, Микола Олександрович Куцевол, Василь Григорович Петрук // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* –Вінниця: Вид-во ВНТУ, 2012. – № 2. – С.14–16.
5. Куцевол Олег Миколайович. Метод контролю вологості зерна / О. М. Куцевол, М. О. Куцевол // *Зб. наук. праць Вінниц. націон. аграр. унів. Серія: Технічні науки.* – Вінниця : РВВ ВНАУ, 2011. – № 9. – С. 156–158.
6. Дубров Николай Семенович. Многопараметрическое влагомеры сыпучих материалов / Николай Семенович Дубров, Евгений Самойлович Кричевский, Борис Исаакович Невзлин. – М. : Машиностроение, 1980. – 144 с.
7. Кричевский Евгений Самойлович. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Евгений Самойлович Кричевский, Александр Григорьевич Волченко, Сергей Сергеевич Галушкин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
8. Секанов Юрий Петрович. Влагометрия сыпучих и волокнистых растительных материалов : монография / Ю. П. Секанов. – М. : ВИМ, 2001. – 190 с. – ISBN-5-7010-0283-7.
9. Куцевол О. М. Радіочастотні методи вимірювання вологості зерна / Олег Миколайович Куцевол, Володимир Олександрович Поджаренко // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* – 2005. – № 3. – С. 5–7.
10. Куцевол О. М. Височастотні методи вимірювання вологості зерна / Олег Миколайович Куцевол, Володимир Олександрович Поджаренко // *Наук. праці Дон. Націон. техн. унів. Сер. "Обчислювальна техніка та автоматизація".* – 2005. – Т. 2. – № 90. – С. 199–204.
11. Куцевол Олег Миколайович. Дослідження діелектричних втрат в зерні / Олег Миколайович Куцевол, Микола Олександрович Куцевол, Василь Григорович Петрук // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* – Вінниця : Вид-во ВНТУ, 2010. – № 6. – С.11–14.
12. Пат. 75700 Україна, МПК G 01 N 27/22. Спосіб вимірювання вологості / Поджаренко В. О., Куцевол М. О., Куцевол О. М. ; заявник патентовласник Вінницьк. націон. техн. унів. – №2004032000 ; заявл. 18.03.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5. – 2 с.

### References

1. Zerno. Metod opredeleniya vlazhnosti: GOST 13586.5-93 [deystvitelen ot 1993-10-21]. - M.: Mezhhgosudarstvenniy standart, 1993. - 9 s.



2. Kutsevol Oleh Mykolayovych. Radiochastotni metody ta zasoby kontrolyu volohosti zerna: monografiya / Oleh Mykolayovych Kutsevol, Mykola Oleksandrovych Kutsevol, Volodymyr Oleksandrovych Podzharenka. - Vinnytsya: RVV VDAU, 2009. - 115 s. - ISBN-978-966-2959-59-3.
3. Kutsevol O. M. Metod kontrolyu volohosti Iz nestabil'nimi dielektrichnimi Vtrata y poristystyu / O. M. Kutsevol, M. O. Kutsevol // Nauka i wyksztaicenie bez granic - 2010: VI miedzynarodowej naukow-praktycznej konferencji, 07-15 grudnia 2010 roku: tezy dop. - Peremyshl', 2002. - Vol. 23. - С.70-73
4. Kutsevol Oleh Mykolayovych. Metod vyznachennya dielektrichnikh parametriv voloha zerna / Oleh Mykolayovych Kutsevol, Mykola Oleksandrovych Kutsevol, Vasyl' Hryhorovych Petruk // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. - Vinnytsya: Vyd-vo VNTU, 2012. - № 2. - S.14-16
5. Kutsevol Oleh Mykolayovych. Metod kontrolyu volohosti zerna / O. M. Kutsevol, M. O. Kutsevol // Zb. nauk. prats' Vinnyts. Natsion. ahrar. Univ. Seriya: Tekhnichni nauky. - Vinnytsya: RVV VNAU, 2011. - № 9. - S. 156-158.
6. Dubrov Nikolay Semenovich. Mnogoparametricheskiye vlagomery sypuchikh materialov / Nikolay Semenovich Dubrov, Yevgeniy Samoylovich Krichevskiy, Boris Isaakovich Nevzlin. - M.: Mashinostroyeniye, 1980. - 144 s.
7. Krichevskiy Yevgeniy Samoylovich. Kontrol' vlazhnosti tverdykh i sypuchikh materialov / Yevgeniy Samoylovich Krichevskiy, Aleksandr Grigor'yevich Volchenko, Serey Sergeyeovich Galushkin. - M.: Energoatomizdat, 1987. - 136 s.
8. Sekanov Yuriy Petrovich. Vlagometrii sypuchikh i voloknistykh rastitel'nykh materialov: monografiya / YU. P. Sekanov. - M.: VIM, 2001. - 190 s. - ISBN-5-7010-0283-7.
9. Kutsevol O. M. Radiochastotni metody vymiryuvannya volohosti zerna / Oleh Mykolayovych Kutsevol, Volodymyr Oleksandrovych Podzharenka // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. - 2005. - № 3. - S. 5-7.
10. Kutsevol O. M. Visokochastotni metody vymiryuvannya volohosti zerna / Oleh Mykolayovych Kutsevol, Volodymyr Oleksandrovych Podzharenka // Nauk. pratsi Don. Natsion. tekhn. Univ. Ser. "Obchyslyval'na tekhnika ta avtomatyzatsiya". - 2005. - T. 2. - № 90. - S. 199-204.
11. Kutsevol Oleh Mykolayovych. Doslidzhennya dielektrichnikh Vtrata v zerni / Oleh Mykolayovych Kutsevol, Mykola Oleksandrovych Kutsevol, Vasyl' Hryhorovych Petruk // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. - Vinnytsya: Vyd-vo VNTU, 2010. - № 6. - S.11-14
12. Pat. 75700 Ukrayina, MPK G 01 N 27/22. Sposob vymiryuvannya volohosti / Podzharenko V. O., Kutsevol M. O., Kutsevol O. M.; zayavnyk patentovlasnik Vinnits'k. Natsion. tekhn. Univ. - №2004032000; zayavl. 18.03.04; opubl. 15.05.06, Byul. № 5. - 2 s.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ

**Аннотация:** предложено обоснование необходимости и важности проведения детальных исследований основных диэлектрических параметров зерна: относительной диэлектрической проницаемости (модуля комплексной диэлектрической проницаемости  $\dot{\epsilon}$ )  $\epsilon$ , элементов комплексной диэлектрической проницаемости  $\dot{\epsilon}$  (действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  составляющих), а также тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  в узких промежутках радиочастотного диапазона (длинных и средних радиоволн).

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, зерно, тангенс угла диэлектрических потерь, радиочастотный, влажность.

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DIELECTRIC PARAMETERS OF GRAIN WHEAT

**Summary:** justification of need and importance of carrying out detailed researches of the key dielectric parameters of grain is offered: relative dielectric permeability (the module of complex dielectric permeability of  $\dot{\epsilon}$ )  $\epsilon$ , elements of complex dielectric permeability of  $\dot{\epsilon}$  (the valid  $\epsilon'$  and imaginary  $\epsilon''$  of components), and also a tangent of angle of dielectric losses of  $\text{tg}\delta$  in narrow intervals of radio-frequency range (long and average radio waves).

**Keywords:** dielectric permeability, grain, tangent of angle of dielectric losses, radio-frequency, humidity