НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Радіотехнічний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Радіоконструювання і виробництво радіоапаратури
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ _____
(підпис) (ініціали, прізвище)
“___”_____20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 8.05090201 – Радіоелектронні апарати та засоби
(код і назва)

на тему: Системи концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону від N джерел в одному об’ємі

Виконав: студент __6__ курсу, групи ___РВ-31м_____
(шифр групи)

Слободенюк Андрій Михайлович _____
(прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н. Сидорук Ю.К. _____
(посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з охорони праці доцент, к.т.н. Каштанов С.Ф. _____
(назва розділу) (посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент професор Коцержинський Б.О. _____
(посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2015 року

А. М. Слободенюк, КВРА 2015

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Інститут (факультет) Радіотехнічний факультет
(повна назва)

Кафедра Радіоконструювання і виробництво радіоапаратури
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 8.05090201 – Радіоелектронні апарати та засоби
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Є. А. Нелін
(підпис) (ініціали, прізвище)
«14» жовтня 2014 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Слободенюка Андрія Михайловича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Системи концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону від N джерел в одному об'ємі _____
_____,
науковий керівник дисертації Сидорук Юрій Кіндратович доцент, к.т.н ___,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від «___»_____ 20__ р. №_____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Активна зона сушарок сипучих матеріалів _____
_____

4. Предмет дослідження Електромагнітне поле в активній зоні сушарок сипучих матеріалів _____
_____
_____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити _____
1. Синтез та аналіз дзеркальних та лінзових опромінювачів _____
2. Розробка та розрахунок поляризаційних фільтрів _____
_____
_____
_____

А. М. Слободенюк КІВРА 2015

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу _____
1. Спрощена конструкція пристрою концентрації енергії _____
2. Графіки розподілу поля в активній зоні _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____
1. Синтез та аналіз опромінювачів (Доповідь, стаття) _____
2. Розподіл поля в активній зоні від N опромінювачів (Доповідь, стаття)

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 15.09.2013р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд пристроїв для сушки сипучих матеріалів	15.09.13 – 15.12.13	
2	Принципи побудови систем концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону	15.02.14 – 15.04.14	
3	Теоретичні дослідження систем концентрації енергії електромагнітного поля	05.09.14 – 15.12.14	
4	Конструктивна розробка систем концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону	15.02.15 – 01.05.15	

Студент _____ А.М. Слободенюк
(підпис) (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____ Ю.К. Сидорук
(підпис) (ініціали, прізвище)

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Обсяг магістерської дисертації становить 139 сторінок, яка включає в себе 59 ілюстрацій, 4 таблиці, 1 додаток і 51 бібліографічні найменування за переліком посилань.

Розглянуте актуальне питання розробки та проектування системи концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону для сушки сипучих матеріалів. Мета роботи полягала в розробці і дослідженні систем концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону.Проаналізовано існуючі пристроїв для сушки сипучих матеріалів, висвітленно їх основні недоліки. Досліджено можливі варіанти побудови систем концентрації енергії електромагнітного поля.

В результаті проведення теоретичного аналізу поляризаційних фільтрів, теоретичного аналізу опромінюючих структур, розрахунку систем розподілу поля, розрахунку поля в зоні концентрації енергії електричного поля НВЧ діапазону розробили спрощену конструкцію системи концентрації енергії з дзеркальними відбивачами.

НВЧ, сушарки, сипучі матеріали, мікрохвильовий пристрій, хвилевідно-щілині антени, дзеркальні антени.

ABSTRACT

Volume master's thesis is 139 pages, which includes 59 illustrations, 4 tables, 1 addition and 51 names on the list of bibliographic references.

Examined topical questions of development and designing of system concentration of electromagnetic fields microwave for drying bulk materials. Purpose of the work consisted in design and research of concentration of electromagnetic microwave field. Existing devices for drying bulk materials, lighting their main weaknesses. Researched possible construction of concentration of electromagnetic fields.

As a result of theoretical analysis polarizing filters, tanning theoretical analysis of structures, calculation of field distribution, calculation of field in the area of energy concentration electric field of microwave range developed a simplified system concentration of energy from reflector.

Extremely high frequency, dryers, bulk materials, microwave device, waveguide antenna, reflector antennas.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської дисертації

на тему: Система концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону від N джерел в одному об’ємі

А. М. Слободенюк, КВРА 2015

Київ — 2015 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 8

ВСТУП 9

1 ВИСОКОЧАСТОТНІ І НАДВИСОКОЧСТОТНІ ТЕХНОЛОГІЇ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ 13

1.1 Вплив електромагнітного НВЧ поля на патогенну мікрофлору, комах-шкідників та біохімічні показники зерна 13

1.1.1 Реакція грибної мікрофлори на електромагнітне опромінення 13

1.1.2 Вплив електромагнітного поля на бактеріальний комплекс 15

1.1.3 Вплив електромагнітного поля на афлатоксини 16

1.1.4 Вплив електромагнітного поля на комах шкідників 17

1.1.5 Зміни в білково-клейковинному комплексі при опроміненні електромагнітним полем надвисоких частот 19

1.1.6 Зміни у вуглеводах при опроміненні НВЧ електромагнітним полем 20

1.1.7 Вплив електромагнітного поля НВЧ на стан жирів та кислотність зерна і продуктів його переробки 20

1.1.8 Вплив електромагнітного поля на енергетичні характеристики проростання та схожість насіння 21

1.2 Аналіз сучасного стану розвитку обладнання для передпосівної обробки насіння та сушки зерна електромагнітним полем 22

1.2.1 Обладнання для передпосівної обробки насіння електромагнітним полем надвисоких частот 22

Висновки до розділу 43

2 МІКРОХВИЛЬОВА УСТАНОВКА ДЛЯ СУШКИ З СУМУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ В АКТИВНІЙ ЗОНІ ВІД ДЕКІЛЬКОХ ДЖЕРЕЛ 45

2.1 Загальна характеристика установки 45

2.2 Дзеркальні антени, їх основні характеристики 51

2.3 Геометрично – променева теорія формування електромагнітного поля в розкриві антени. 55

2.4 Визначення поля в розкриві параболічного дзеркала 58

Висновки до розділу 63

3 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ОПРОМІНЮЧИХ СТРУКТУР 64

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

3.1 Побудова опромінюючої структури 64
3.2 Представлення опромінюючої структури при однакових розмірах елементів 67
3.2.1 Опис програми проектування AnSoft HFSS 68
3.2.2 Результати розрахунків 70
3.3 Розрахунок поля опромінюючої структури 72
Висновок до розділу 84
4 ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНОМІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ОПРОМІНЕННЯ СИРОВИНИ У РОБОЧІЙ КАМЕРІ 85
Висновки до розділу 105
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .. 107
5.1 Визначення основних потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виконанні науково-дослідної роботи. 107
5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії 108
5.2.1 Електробезпека 108
5.2.2 Вимоги щодо організації робочих місць обладнаних ВДТ ПЕОМ 110
5.2.3 Вимоги до приміщень в яких розміщені ЕОМ 112
5.2.4 Відповідність санітарним нормам параметрів мікроклімату в робочій зоні 114
5.2.5 Освітлення робочих місць користувачів ВДТ ЕОМ 117
5.3 Заходи щодо нормалізації умов праці 118
5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях 119
5.4.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи систем оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації 119
5.4.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС 120
5.4.3 Пожежна безпека 121
ВИСНОВОК 124
Список використаних джерел 128

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

НВЧ – Надвисокі частоти

ЕМХ – Електромагнітна хвиля

ЕМТ – Електромагнітна технологія

ЕМЕ – Електромагнітна енергія

ККД – Коефіцієнт корисної дії

HFSS – High Frequency System Simulator

ЕМП – Електромагнітне поле

ПД – Поляризаційне дзеркало

ТПВ – Трансполяризаційний відбивач

ВДТ – Відео дисплейний термінал

ПЕОМ – Персональна електронно обчислювальна машина

НС – Надзвичайна ситуація

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

ВСТУП

Бурхливий розвиток радіотехніки та радіоелектроніки в останнє сторіччя привів до того, що надбання цієї галузі набуло таких масштабів, що вийшло за рамки безпосереднього їх використання в системах зв'язку та радіолокації і широко використовується в багатьох інших галузях. Зокрема, в хімічній, для прискорення хімічних реакцій, в деревообробній, для високоякісного сушіння деревини, в машинобудуванні, для поверхневого загартування сталі, та інших; але найширшого застосування воно набуває, в даний час, в сільському господарстві для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна та продуктів його переробки, дезінсекції та дезінфекції зерна при закладанні його на зберігання, для сушіння ягід, фруктів, овочів, при виробництві біодизеля, при добуванні олії з олійних рослин та для багатьох інших потреб.

Актуальність роботи полягає в тому, що світовий сільськогосподарський комплекс є основою існування людства. Зростання населення, зміна клімату і, в зв'язку з цим, зростання дефіциту продовольства примушують вчених всіх країн шукати нові технології підвищення врожайності та збереження вирощеної продукції, які були б високоефективними, екологічно придатними та енергозберігаючими.

Передпосівна обробка насіння є чи не найважливішою ланкою боротьби з бактеріальними, грибковими та іншими хворобами сільськогосподарських культур, без якої неможливо виростити добрий врожай і одержати здорову продукцію. Сучасні технології передпосівної обробки насіння базуються переважно на застосуванні отрутохімікатів. Недоліком цих технологій є забруднення і постійне нарощування отрутохімікатів в грунтах, що приводить до негативних явищ: знищення корисних бактерій, забруднення вирощеної продукції та інші.

Застосування електромагнітного поля для боротьби з патогенною мікрофлорою при передпосівній обробці насіння має наступні переваги: відсутній будь-який вплив на грунт і процеси в ньому; виключається

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

поступове звикання та пристосування мікрофлори, що спостерігається при використанні отрутохімікатів. Надзвичайно важливим є додатковий ефект, який полягає в активації біологічних процесів на початковій стадії розвитку рослини, прискорений розвиток паростку та інтенсивне нарощування кореневої системи, збільшення відсотку схожості та зростання імунітету рослини до хвороб. Оброблене електромагнітним полем зерно швидше проростає, встигає наростити потужну кореневу систему при значних запасах вологи в грунтах і тому значно краще переносить несприятливі погодні умови, особливо засуху, рослини не вилягають, дозрівають на 1 – 2 неділі раніше, що в підсумку приводить до збільшення врожаю на 10 – 30%, а в деяких випадках і більше.

Електромагнітне поле надвисоких частот доцільно використовувати для сушіння зерна безпосередньо при комбайнуванні, перед закладанням на зберігання, в процесі зберігання та перед використанням. Другою проблемою, яку можна вирішити за допомогою НВЧ електромагнітного поля в процесі зберігання зерна та зерно-борошняної продукції,це та ж сама боротьба з грибковими хворобами та комахами-шкідниками. Від ступеню зараженості продукції різноманітними шкідниками суттєво залежить якість хлібобулочної і макаронної продукції. За даними організації по продовольству і сільському господарству при ООН шкідливі комахи знищують не менше 5 - 10% світових запасів зернових культур. Шкідники знижують схожість насіння погіршують харчову і пекарську якість, сприяють підвищенню температури вологого зерна. Для захисту зерна від комах застосовують різні методи обробки: теплову, провітрювання, отрутохімікатами і слабкою радіацією. Ці способи або малоефективні або небезпечні для людини.

Традиційно для сушки зерна використовують газові сушарки, недоліки яких полягають в тому, що для їх роботи необхідний газ, вартість якого з кожним роком зростає; це вогневі технології, скорочення яких має велике екологічне значення, це енергозатратні технології, обладнання яких

А.М. Слободенюк. КіВРА 2015

громіздке і прив'язане до газових мереж. Принциповою особливістю газового сушіння є передача тепла з зовні, від гарячого газового середовища, в середину, тобто спочатку нагрівається зовнішня частина окремої зернини або іншої дрібної часточки, а потім тепло за рахунок теплопровідності передається в середню частину, тому температура зовнішньої частини завжди вища ніж внутрішньої, а вологість навпаки, в середині завжди вища ніж в оболонці. При цьому градієнт тиску пари направлений від зовні в середину, що значно знижує ефект видалення вологи і приводить до перегріву зовнішньої частини зернини. Це властиво не лише для зерна, але для любого сипучого матеріалу.

При сушінні зерна електромагнітним полем надвисокої (НВЧ) частоти кожна зернина або інша дрібна частинка нагрівається струмами провідності та струмами зміщення, що збуджуються і протікають безпосередньо в зернині. Ці струми більші там, де більша вологість, тобто в середині зернини, і, відповідно, температура в середині зернини вища ніж в її оболонці. Тому тиск пари в середній частині зернини вищий ніж в оболонці і волога витісняється на зовні, що значно прискорює процес сушіння. Крім того, при сушінні електромагнітним полем газове середовище, як носій тепла, взагалі непотрібне, тобто сушіння можна проводити при розрідженому повітрі, що значно знижує температуру кипіння води, а відтак інтенсифікує пароутворення. Так при тиску 0,1 атмосфери, що технологічно неважко реалізувати, температура кипіння знижується до майже 50°С. При такому режимі значно зменшуються енергозатрати і зберігається висока якість зерна, а деякі показники, що характеризують якість продукту, підвищуються. Підрахунки та експериментальні дані доводять, що економія енергії в НВЧ сушарках може бути значною порівняно з газовими. Зрозуміло, що економія енергії, як і інші економічні та технічні показники, залежить від конструкції пристрою.

НВЧ сушарки можна використовувати де завгодно і коли завгодно: в полі, безпосередньо на комбайнах для попереднього сушіння обмолоченого

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

зерна, на спеціально обладнаних токах, на елеваторах, на млинах та в багатьох інших випадках і при цьому одержувати високоякісну продукцію.

Сьогодні на ринку вже пропонуються різні пристрої як для передпосівної обробки насіння, так і для сушіння зерна, але ці пристрої ще досить примітивні. При їх розробці мало приділялося уваги таким важливим параметрам як: коефіцієнт корисної дії активної камери, однорідності розподілу щільності потужності, можливості нарощування потужності і продуктивності установок, їх мобільності і можливості використання в польових умовах та багатьом іншим важливим показникам. Спектр використання НВЧ обладнання може бути досить широким, відповідно різноманітним має бути і його асортимент. Можливості і перспективи розвитку його досить значні. В зв'язку з відсутністю інерційності в процесі нагрівання технологічний процес в НВЧ обладнанні може бути повністю автоматизований з суворим контролем дотримання і регулювання по заданій програмі вологості, температури, щільності потужності, швидкості руху об'єкту сушіння та інших, що гарантує високу якість продукту та забезпечує високий економічний ефект.

Не зважаючи на те, що дана робота орієнтована, в основному, на застосування в сільському господарстві, вона може бути використана також в інших галузях, де необхідно опромінювати сипучі матеріали електромагнітним НВЧ полями.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

1 ВИСОКОЧАСТОТНІ І НАДВИСОКОЧСТОТНІ ТЕХНОЛОГІЇ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

В даному розділі приведено огляд досліджень впливу електромагнітного поля на патогенну мікрофлору, комах-шкідників, біохімічні показники зерна та засобів, що пропонується різними як вітчизняними, так і зарубіжними авторами з проблем застосування НВЧ технологій в аграрному виробництві для знезараження, дезінсекції та сушіння сільськогосподарської продукції.

1.1 Вплив електромагнітного НВЧ поля на патогенну мікрофлору, комах-шкідників та біохімічні показники зерна

При розробці принципів побудови пристроїв для знезараження і сушіння зерна за допомогою енергії ЕМХ важливо знати особливості впливу НВЧ енергії на патогенну мікрофлору, комах-шкідників і на біохімічні показники зерна, а також оптимальні режими опромінення і, при цьому, оцінювати можливості в зміні в зерні, які супроводжують процес опромінення, що важливо для недопущення погіршення його якості.

Цей вплив досить добре вивчений і приведений в багатьох публікаціях та інших наукових джерелах [1 - 20], що дає змогу оцінити не тільки можливість застосування ЕМТ в сучасному агропромисловому комплексі, а також зробити висновок відносно доцільності і суттєвих технічних, економічних, екологічних та інших переваг порівняно з існуючими технологіями.

1.1.1 Реакція грибної мікрофлори на електромагнітне опромінення

При опромінюванні електромагнітним полем зерна, зараженого грибами ***Alternaria***, помічено, що при малому часі опромінення Т (10 – 40 с) спостерігається стимулююча дія на їх розвиток, що пояснюється позитивним впливом невисоких температур. При подальшому зростанні температури кількість вражених зерен починає зменшуватись [3]. З різних джерел [1 - 3]

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

відомо, що при нагріванні зерна пшениці та ячменю НВЧ полем до температури 55 – 65°С зі швидкістю V = 0,6°С/с зараженість знижується вдвічі. Практично повне знезараження має місце при кінцевій температурі 70 – 80°С, що відповідає режиму V = 0,6°С/с і Т =90 с. Вцілому відмічено стійкий ефект знезараження грибів роду *Alternaria*.

Гриби роду Bipolaris. Гриби роду *Bipolaris* менш стійки до температурного впливу порівняно з попередніми, тому для боротьби з даними грибами практично задовільними є режими боротьби з грибами *Alternaria* [3]. Зниження рівня зараженості пшениці вдвічі забезпечується при V = 0,6°С/с і Т= 30 с; різке зниження зараженості має місце за температури 45 – 60°С і повністю зникає при подальшому нагріванні [3].

Гриби роду Fusarium. Гриби роду *Fusarium* найменш вибагливі до середовища існування, мають властивість утилізації різних субстратів завдяки сильному ферментативному апарату і тому досить стійкі до викорінення. Однак електромагнітне поле НВЧ досить ефективно знижує їх кількість. При режимі опромінення V = 0,6°С/с і Т = 60 – 90 с (кінцева температура 50 – 57°С) зараженість пшениці, ячменю та кукурудзи зменшується в 2 – 3 рази. Практично повне знищення фузаріозної інфекції можливе при V = 0,8°С/с і Т= 60 – 90 с. Загалом, нагрівання до 60°С знижує враженість зернівок до цілком задовільного санітарним нормам рівня, а при температурі 80°С ці гриби практично повністю знищуються [1, 3, 4].

Дещо інші режими від наведених вище необхідні при боротьбі з пліснявими грибами *Mucor, Penicillium, Aspergilus.*

Гриби роду Mucor мають виражену стійкість до нагрівання. Автори наукових робіт [2, 3] вказують, що при нагріванні електромагнітним полем значне зменшення зараженості відбувається вже за температури 42°С, зниження вдвічі має місце при режимі V = 0,6°С/с і Т = 30 с або V = 0,5°С/с і Т = 45 с та результуючій температурі близько 50°С. Повного знищення грибів даного роду за практичних режимів не відбувалось, тому Юсупова

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Г.Г. [1] пропонує проводити знезараження грибів *Mucor* при нижчих темпах нагрівання та довшій тривалості процесу. В цьому випадку рекомендується режим V = 0,24 – 0,4°С/с і Т = 240 – 360 с (кінцева температура 85°С), при якому інфекція повністю зникала.

Гриби роду Penicillium. Вивчення впливу електромагнітного поля на гриби роду *Penicillium* проводились при наступних режимах: швидкість нагрівання V = 0,6°С/с і Т = 30 с. при кінцевій температурі 42°С кількість збудників цих грибів зменшувалась вдвічі, а при V = 0,8°С/с і Т = 60 – 90 с. і температурі 77 – 85°С досягався повний знезаражувальний ефект.

Гриби роду Aspergilus. Характер знезараження грибів роду *Aspergilus* подібний характеру грибів *Penicillium* і відносно легко знищується опроміненням електромагнітним полем НВЧ. Дані, щодо режимів знезараження, приведені в різних джерелах, дещо розбіжні. Так Головіна Т.А. [3] вказує, що повне знезараження можливе при режимі V = 0,8°С/с і Т = 30 с та кінцевій температурі понад 47°С або V = 0,6°С/с і Т = 70 с та температурі понад 60°С. Результати Юсупової Г. Г. [1] вказують на необхідний режим V = 0,6 – 0,8°С/с і Т = 90 с при кінцевій температурі 70 – 80°С. Для порівняння, звичайне нагрівання зерна кукурудзи при 80°С протягом шести годин ніякого ефекту проти грибів *Penicillium* та *Aspergilus* не створює [1].

1.1.2 Вплив електромагнітного поля на бактеріальний комплекс

В публікаціях та наукових працях багатьох дослідників приводяться результати досліджень впливу електромагнітного поля НВЧ на дезактивацію бактерій, зокрема *Starphylococcus aureus* [7], *Escherichia coli* [2, 8], *Closridium sporogenes,* в яких вказується на відмінність дії звичайної теплової обробки і опромінення електромагнітним полем НВЧ, що підтверджує припущення про наявність нетеплового впливу електромагнітного поля на клітини бактерій. Підтвердження позитивного результату в боротьбі з забрудненням

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

бактеріями роду *Bacillius* пшениці приведено в роботах [1, 2].

Для продуктів переробки зерна найбільш шкідливими є сапрофітні бактерії роду *Bacillius,* які здатні вражати більшість основних сільськогосподарських культур [1]. Важливість знезараження зерна від цих бактерій полягає в надзвичайній термостійкості спор, які не гинуть у процесі випікання хліба, легко переносячи температуру 98 – 99°С навіть при довготривалому процесі [1, 9]. При нагріванні електромагнітним полем зерна пшениці зниження зараженості бактеріями роду *Bacillius* спостерігається вже при температурі 33°С при режимі V = 0,4°С/с і Т = 30 с, зниження інфікованості вдвічі досягається при нагріванні до температури 60 – 65°С. Повний знезаражуючий ефект відмічено при V = 0,8°С/с і Т = 90 с та температурі 85°С [1]. Згідно інших даних зниження рівня інфікованності до достатнього рівня (більш ніж у десять разів) досягнуто при Р = 450 Вт/дм^3 і Т= 240с або Р = 600 Вт / дм^3 і Т = 120с та кінцевих температурах 92°С і 75°С, відповідно, [2]. В усіх варіантах використовувалось зерно, що мало вологість 16–17%.

Також проводився порівняльний експеримент ефективності впливу хімічного препарату-покращувача окислювальної дії «Ропал» і енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону на розвиток бактерій картопельної палички. Експеримент показав, що обидва методи знижують зараженість середовища, однак за оптимальних режимів хімічний метод знижує інфікованість у 2 – 3 рази, що при високому зараженні не є достатнім, в той час, як електромагнітне опромінення практично позбавляє зараженості, зберігаючи технологічні властивості борошна.

1.1.3 Вплив електромагнітного поля на афлатоксини

Санітарна якість зерна знижується з розвитком і накопиченням в ньому токсиноутворюючих грибів та продуктів їх життєдіяльності, мікотоксинів, які попавши в організм людини викликають отруєння. Афлатоксини продукуються грибами *Aspargilus,* розвиваються при температурі 6 – 8°С.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Небезпечними є також токсини, що виробляються грибами *Fusarium T - 2* [1,15]. При переробці сировини найбільша кількість токсинів залишається у висівках. Порівняння різних методів інактивації афлатоксинів в висівках показало, що при екструдуванні та підсмажуванні має місце часткова їх інактивація; при опроміненні електромагнітним полем НВЧ за режиму: швидкість нагрівання 0,8°С/с і експозиції 90 с афлатоксини нейтралізувалися повністю, при швидкості нагрівання 0,6°С/с і експозиції 60 с – зведені до безпечного рівня і при V = 0,4°С/с та Т = 30 с, - інактивація не спостерігалась.

1.1.4 Вплив електромагнітного поля на комах шкідників

Серед найвизначніших робіт, в яких досліджено використання електромагнітного поля для дезінсекції комах, варто відмітити [17, 18], в яких зібрано значний обсяг матеріалів стосовно діелектричних властивостей зерна, комах та ефективних режимів знищення різних їх видів. Головна мета комплексної роботи [17], полягає в дослідженні можливості знищення комах шкідників зерна за допомогою електромагнітного поля НВЧ. Досліджувалась реакція комах різного етапу розвитку на електромагнітне поле частотою 2,45 ГГц. Розглядались комахи видів: *T. castaneum* (малий мучний хрущак), *C. ferrugineus* (мукоїд рудий коротковусий) та *S. granarius* (амбарний довгоносик). Як середовище використовувались зерно ячменю, пшениці та жита з вологістю 14%, 16% та 18%. Опромінювання проводилось при двох експозиціях 28с і 56с потоком потужності 250, 300, 400 та 500 Вт. В результаті експерименту виявлено, що для яєць *T. castaneum* в зерні пшениці при потужностях 250, 300 і 400 Вт, вологості 14%) і експозиції 28с, відсотки смертності становили 64, 81 та 100%, відповідно. Відзначається, що при вологості 18%) смертність була вищою на 5 – 15%) і ця різниця зменшувалась при зростанні потужності. Відмічається, що реакція личинок та дорослих особин на опромінення, приблизно, однакова і, відповідно до експерименту з яйцями, їх смертність становила 53, 72 та 91%. Стовідсоткове знищення личинок забезпечувалось при потужності 500 Вт. Смертність

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

лялечок була дещо нижчою і становила відповідно 43, 55 та 76% і 100% при потужності 500 Вт. При збільшенні експозиції до 56с показники смертності збільшились на 20 – 30%. Смертність дорослих комах виду *S. granarius* за аналогічних умов виявилась такою ж, як у випадку з *T. castaneum*, для *C. ferrugineus* кількість знищених комах становила 23, 43, 69 та 100% для потужностей 250, 300, 400 та 500 Вт відповідно.

В статті [18] автор (Nelson S.O.) аналізує результати багаторічних досліджень різних науковців, які займалися вивченням впливу електромагнітного поля високої (радіо) та надвисокої частоти та можливості застосування його для знищення комах в зерні і збереження якості самого зерна. Автор визначає дещо різну сприйнятливість різних видів комах до впливу електромагнітного поля, що пояснюється міжвидовими характеристиками біологічної або фізіологічної природи, а деякі з них спричинені відмінностями в розмірах і геометричних формах. В результаті смертності дорослих комах різних видів, яка спостерігалася в експериментах з пшеницею при опроміненні електромагнітним полем частотою 39 МГц і напруженістю електричного поля 1,2 кВ/см, з'явилася можливість розташувати їх у порядку зменшення впливу і, відповідно, смертності від електромагнітного поля: *Sitophilus oryzae* (рисовий довгоносик), *Sitophilus granarius* (амбарний довгоносик), *Oryzaephilus surinamensis* (мукоїд сурінамський), *Tribolium confusum Jacquelin duVal* (малий мучний хрущак), *Tribolium castaneum* (хрущак каштановий), *Trogoderma variable Ballion* (шкіроїд), *Tenebroides mauritanicus* (темнотілка мавританська), *Rhyzopertha dominica* (зерновий шашіль). Також повідомляється про більшу сприйнятливість до електромагнітного поля рисового довгоносика по відношенню до хрущака каштанового на частоті 2,45 ГГц.

При опроміненні зерна, зараженого рисовим довгоносиком, амбарним довгоносиком, мучним хрущаком електромагнітним полем частотою 39 МГц при температурі 39°С, 41°С, та 47°С відповідно, досягалось повне знищення цих шкідників. На противагу цьому відмічається, що для ефективного

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

знищення цих комах звичайним нагріванням необхідна температура 61°С при мінімальній витримці 10 хвилин. А для забезпечення того ж результату на частоті 2,45 ГГц температура зерна мала становити 57°С. В роботі [18] приводиться однозначний висновок, що при опроміненні зерна електромагнітним полем с частотою 2,45 ГГц необхідно нагрівати зерно до значно вищих температур ніж на високих частотах в діапазоні 10 – 100 МГц.

1.1.5 Зміни в білково-клейковинному комплексі при опроміненні електромагнітним полем надвисоких частот

Одним з основних показників технологічної цінності зерна є кількість та якість клейковини, зміни в якій проявляються у термічній денатурації білка при тепловій обробці, на що впливають вологість зерна, інтенсивність нагріву, температура та тривалість нагріву. Глибокі зміни у білкових фракціях, які ще не супроводжуються денатурацією відбуваються вже при температурі 50°С [1]. Залежно від умов впливу на зерно пшениці розрізняють три стадії якісних змін в зерні [3]. Перша стадія має місце при м’яких режимах опромінення - незначній експозиції і температурі, що не перевищує 35 – 45°С. Перші ознаки денатурації проявляються у змінах розтягування клейковини, при цьому зерно відноситься уже до іншої групи якості і може бути бажаним для виробництва певних продуктів. Крім того спостерігається підвищена розчинність білків, енергія проростання і, відповідно, схожість зерна зростає. За другої стадії, при підвищенні температури до 60°С спостерігається подальша денатурація, що супроводжується незначною втратою життєздатності зерна, При цьому зерно, з точки зору споживчої якості, переходить з нижчої групи у вищу, також покращуються його хлібопекарські властивості.

Стає очевидним, що встановлюючи необхідні параметри інтенсивності та експозиції опромінення зерна можна бажаним чином змінювати характеристики клейковини і виготовляти борошно з бажаними технологічними властивостями.

А.М.Слободенюк, КІВРА 2015

1.1.6 Зміни у вуглеводах при опроміненні НВЧ електромагнітним полем

При нагріванні зерна електромагнітним полем спостерігається зменшення вмісту крохмалю, але ці зміни залежать від температури, до якої нагрівається зерно. Так при нагріванні пшениці до 60°С вміст крохмалю зменшується на незначну величину [1]. Враховуючи, що зерно при опроміненні є вологим або зволоженим, зміна вмісту крохмалю пояснюється його гідролізом, що є причиною зростання вмісту редукованих та інверсних цукрів. З цієї точки зору оптимальним визнано режим $V_{наг}$ = 0,4 – 0,6 °С/с і $T_{екс}$ = 30 - 60 с, (де $V_{наг}$ та $T_{екс}$ - швидкість нагрівання та час експозиції), при якому спостерігається початковий етап руйнування крохмалю та підвищення вмісту цукрів, що сприяє формуванню тіста, зменшуючи початковий період бродіння.

Електромагнітне поле також впливає на вміст глюкози, кількість якої зростає після опромінення зерна, при чому, як вказує автор [1], максимальне значення цей показник досягає при $V_{наг}$ = 0,4 – 0,8°С/с та $T_{екс}$ = 90 с і зростає в 1,9 раз, за меншої експозиції відзначалося менше зростання. Очевидно, що процес підвищення вмісту глюкози пов’язаний також з гідролізом крохмалю та сахарози. Як уже відзначалося, ця властивість сприяє підвищенню інтенсивності спиртового бродіння і скорочує тривалість визрівання тіста, що є досить важливим для хлібопекарського виробництва.

1.1.7 Вплив електромагнітного поля НВЧ на стан жирів та кислотність зерна і продуктів його переробки

Жири (ліпіди) відіграють важливу роль у зберіганні, підтримуванні харчових і технологічних властивостей і т. п. їх доля складає 4 – 5% маси зернівки.

У роботі [1] Юсупова Г.Г. пропонує з метою запобігання окислення жирів використовувати термічну обробку зерна кукурудзи та сої енергією електромагнітного поля НВЧ, в результаті чого вдається змінювати кислотне

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

та перекисне число жирів. Аналізи показали, що нагрівання до температури 90°С при потужності 600 Вт і експозиції 90 с знижує кількість жиру на 4%. При середніх режимах опромінення (450 Вт, 70°С, 90 с) вміст жирів знижувався на 7%. За мінімальної потужності (300 Вт), температурі 55°С і експозиції 90 с відбувалося зростання вмісту жирів на 6,5%.

1.1.8 Вплив електромагнітного поля на енергетичні характеристики проростання та схожість насіння

Багато дослідників констатують покращення властивостей проростання, урожайності, загальних якостей урожаю з насіння, обробленого за допомогою ЕМЕ надвисоких частот, що є найбільш ефективним, екологічним і практичним способом [21–27].

В основі всіх біохімічних процесів зерна лежить ферментативна або автолітична активність білків. Цей показник характеризує життєву силу зерна і визначає енергію проростання насіння. Він також впливає на якість продуктів випічки. Експериментальні дослідження показують, що прогрівання насіння пшениці НВЧ електромагнітним полем до температури 30 – 60°С суттєво покращує цей показник [6]. При співвідношеннях швидкості нагрівання і експозиції $V_{наг}$ = 0,4°С/с і $T_{екс}$ = 60 – 90 с; $V_{наг}$ = 0,6°С/с і $T_{екс}$ = 30 с; $V_{наг}$ = 0,8 °С/с і $T_{екс}$ = 30 с енергія проростання має вище значення ніж у контролі, що, до речі, узгоджується з іншими джерелами [7]. Найкращі показники отримані при невисокій швидкості нагрівання і експозиції 40 – 80с.

При польових дослідженнях схожості ячменю у роботі [8] вказано, що після опромінення насіння при режимах $V_{наг}$ = 0,6°С/с і $T_{екс}$ = 90 с та $V_{наг}$ = 0,6°С/с і $T_{екс}$ = 60 с (при температурі 52°С та 46°С відповідно) схожість становила 68,5% і 73,4% проти 57,9% для контрольної партії. В цій же роботі підкреслюється, що наслідком опромінення насіння ячменю є покращення показників кущування; кращі значення отримано при режимі $V_{наг}$ = 0,6°С/с і $T_{екс}$ = 90 с. При цьому зростання кількості продуктивних стеблин становило

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

20%, загальна кількість зернин на рослині зросла на 14,3%, а середня маса зернини збільшилась на 18%. Вцілому ж врожайність ячменю зросла на 14,2% (21,1 ц / Га – контроль, 24 ц / Га – експеримент), при експозиції 60с зростання врожаю становило 10,9%. В [10] повідомляється про проведення унікального експерименту, згідно з яким визначалась схожість насіння ячменю другого покоління, одержаного з зерна опроміненого електромагнітним полем при оптимальних режимах $V_{наг}$ = 0,6°С/с і з експозицією 60 і 90 с. В результаті отримано збільшення схожості на 2 і 6% порівняно з контролем відповідно.

Таким чином можна констатувати, що електромагнітне НВЧ поле є ефективним чинником знищення патогенної мікрофлори та комах шкідників в насінні та продовольчому зерні. При виборі відповідних оптимальних режимів якість насіння і продовольчого зерна не знижується, а деякі показники підвищуються.

1.2 Аналіз сучасного стану розвитку обладнання для передпосівної обробки насіння та сушки зерна електромагнітним полем

1.2.1 Обладнання для передпосівної обробки насіння електромагнітним полем надвисоких частот

Використання енергії електромагнітного поля надвисоких частот є одним із методів інтенсифікації процесу сушіння сипучих діелектричних матеріалів. При цьому в результаті швидкого підвищення температури усередині окремих часточок матеріалу, що характерно для мікрохвильового нагріву, підвищується тиск водяної пари, тобто з'являється підвищений тиск пари усередині матеріалу по відношенню до тиску середовища. Градієнт надлишкового тиску різко інтенсифікує процес сушіння, так як перенесення вологи відбувається як шляхом молекулярної дифузії, так і шляхом просочування через пори і капіляри матеріалу. Це особливо актуально для сушки зерна і іншої сільгосппродукції, оскільки при цьому не перегрівається оболонка і зародок зерна з одного боку, та зменшуються енергозатрати з

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

другого.

Пристрої для сушки класифікують за ознаками [28]:

- за способом нагріву теплоносія: з вогневим теплогенератором, з водним калорифером, з паровим калорифером, з електронагрівом, комбіновані;
- за способом інтенсифікації процесу: з псевдорозрідженням, з рециркуляцією,з застосуванням електроактивованого повітря, комбіновані;
- за принципом дії: періодичні і неперервні;
- за величиною тиску повітря: вакуумні (100–900 Па), атмосферного тиску (0,1 МПа), з підвищеним тиском (0,1–0,2 МПа), з високим тиском (більше 0,2 МПа);
- за конструкцією робочої камери: шахтні, барабанні, бункерні, конвеєрні, стелажні;
- за напрямком руху зерна і теплоносія: прямоточні, з зворотнім потоком, з поперечним потоком, зі змішаним потоком, реверсивні;
- за призначенням: спеціалізовані, універсальні;
- за мобільністю: стаціонарні та пересувні;
- за способом підводу теплоти: конвективні, кондуктивні, променисті, комбіновані;
- за способом видалення вологи зі сушильної камери: із застосуванням агента сушіння, із застосуванням сорбентів, з хімічним поглинанням вологи.

Недоліки усіх традиційних сушарок: громіздкість конструкції, високі капітальні витрати, подрібнення матеріалу при сушінні, тривалий контакт матеріалу з тепловим агентом, невисокий коефіцієнт теплообміну між газом и матеріалом, великі витрати тепла при завантаженні та вивантаженні матеріалу, складність контролю, нерівномірність сушіння по об’єму камери, потреба у великих об’ємах приміщень.

Альтернативним є спосіб, в якому в якості носія енергії використовується електромагнітне поле надвисокої (НВЧ) частоти. Енергія

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

електромагнітного НВЧ поля перетворюється в тепло безпосередньо в середовищі, що підлягає сушінню. Електромагнітні сушарки мають високу мобільність. Вони можуть використовуватись скрізь, де є електромережа, а де її немає – з використанням дизельних генераторів, в тому числі і безпосередньо на комбайнах для попереднього зниження вологості зібраного зерна. Їх продуктивність може бути різноманітною – від найменших до найпотужніших, що використовуються на сучасних елеваторах. Завдяки відсутності інерції, при зміні щільності потужності електромагнітного поля, ефективність контролю і автоматизованого керування технологічним процесом значно підвищується, що робить його простим і зручним в експлуатації.

Всі НВЧ сушарки можна умовно розділити на чотири групи: пристрої, в яких для нагрівання об'єкту сушіння використовується лише електромагнітне поле при атмосферному тиску в активній зоні, вакуумні електромагнітні сушарки, комбіновані пристрої при атмосферному тиску в робочій камері та комбіновані вакуумні сушарки.

До основних вимог НВЧ сушарок відносять: рівномірність розподілу електромагнітного поля в активній зоні пристрою, що має забезпечити однакове опромінення всіх зернівок в загальному потоці; високий коефіцієнт корисної дії, який визначається енергією, що випромінюється в активний простір пристрою; можливість концентрації енергії в заданому об'ємі від декількох генераторів; можливість зручного нарощування продуктивності установки.

Аналіз робіт по сушінню з використанням НВЧ полів показав, що в багатьох існуючих установках використовуються потужні генератори НВЧ енергії, які використовуються в короткочасному режимі включення (2–3 с), такі рішення призводять до дуже швидкого розігріву вологи, що знаходиться в матеріалі для сушіння і може призвести до псування зерна. Також досліджувалось застосування резонаторних камер, в яких зерно займає частину активної зони. Ще одним рішенням стало застосування послідовно

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

розташованих малопотужних магнетронів, наприклад, у випадку конвеєрної сушарки Пахомова В.І. [29] рис. 1.1. Тут зерно надходить у завантажувальний бункер 6 і рухається по стрічковому транспортеру 7, піддаючись конвективному сушінню повітрям, що нагнітається по повітряводам 4 і багаторазового впливу НВЧ променів від хвилевідних пристроїв 2. Але за рахунок високої швидкості руху стрічки і нерівномірності розподілу НВЧ поля в матеріалі шар зерна повинен бути тонким (25–30 мм). Це призводить до збільшення довжини транспортера для забезпечення необхідного видалення вологи з матеріалу.

Цей недолік був вирішений в сушарці [30] приведеній на рис. 1.2, але в ній також є свої недоліки. В даній сушарці один рупорний опромінювач не забезпечує однорідність поля як в поперечному, так і в подовжньому напрямках відносно положення стрічки.

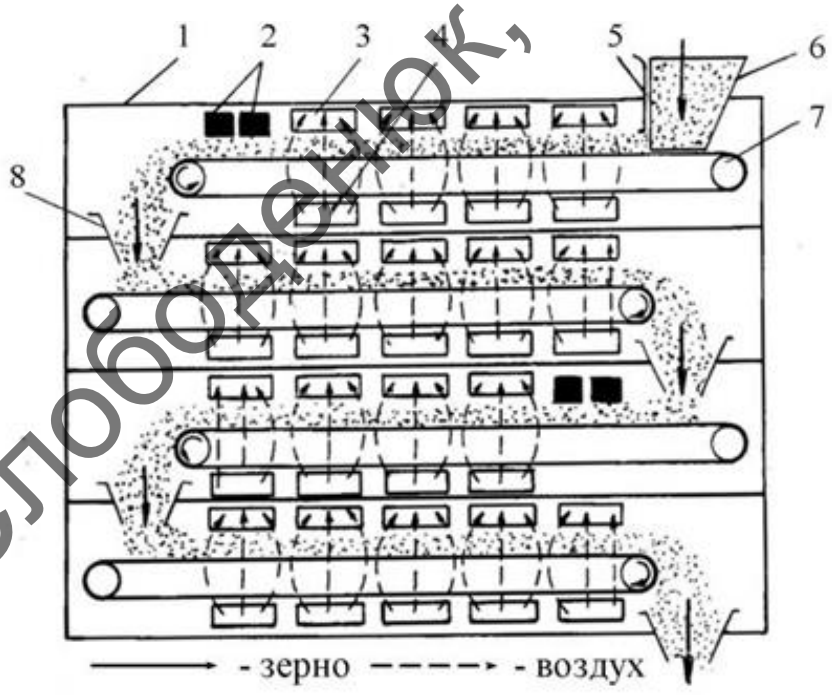


Рисунок 1.1. Принципова схема конвеєрної установки для комбінованого сушіння зерна з використанням НВЧ - енергії

Електромагнітна хвиля проходить через тонкий шар матеріалу і поглинається ним лише частково; частина залишкової енергії поглинається вставкою, решта розсіюється в межах металевого корпусу і поглинається

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

його стінками, що значно знижує коефіцієнт корисної дії пристрою. Використання лише одного джерела НВЧ енергії свідчить про те, що пристрій має низьку продуктивність.

Подібний до попереднього пристрій [31] для передпосівної обробки насіння НВЧ електромагнітним полем схематично зображений на рис. 1.3.

Основу пристрою створює вібротранспортер 5, вздовж якого переміщується зерно і опромінюється НВЧ електромагнітним полем, що випромінюється хвилеводно-щілинною антеною 4, яка живиться від генератора 3. Для регулювання часу опромінення передбачено пристрій 6, яким змінюється кут нахилу транспортера. Даному пристрою, в деякій мірі, властиві недоліки попередньої конструкції. Незначним вдосконаленням є застосування хвилеводно-щілинного опромінювача, який забезпечує більш рівномірний розподіл поля вздовж транспортера, але не підвищує рівномірність в поперечному напрямку. Досконалішим і надійнішим є також спосіб транспортування і регулювання швидкості руху насіння транспортером.

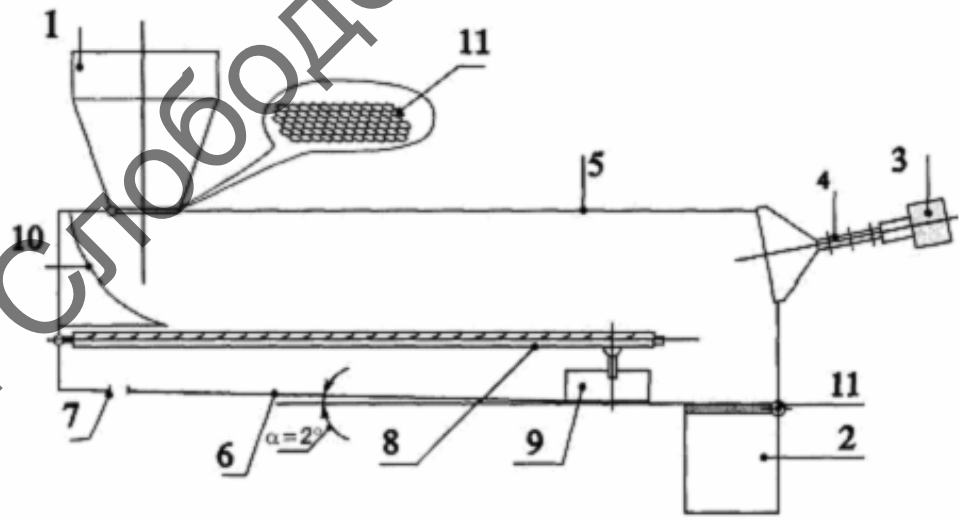


Рисунок 1.2. Пристрій для знезараження комбікормів та передпосівної обробки насіння у полі НВЧ

А. М. Слободенюк. КІВРА 2015

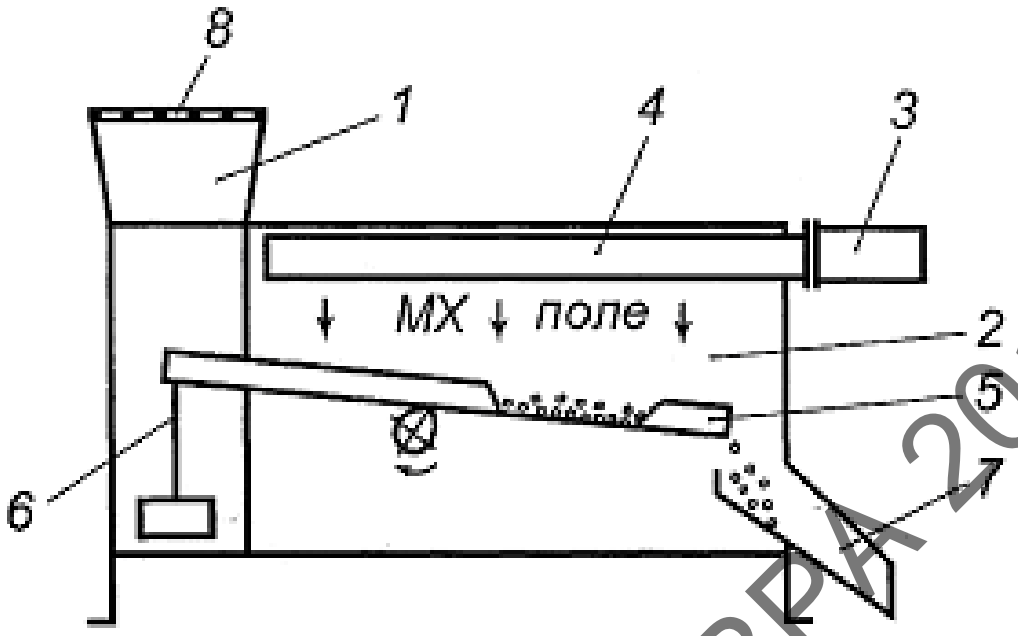


Рисунок 1.3. Мікрохвильовий пристрій передпосівної обробки насіння

Більш досконала і детальніше опрацьована конструкція промислової установки для передпосівної обробки насіння [32] приведена на рис. 1.4. Вона має бункер 1, в який безперервно або періодично завантажується насіння через металеву сітку 2, що виконує роль електромагнітного екрану. З бункера насіння поступає в продуктопровід 4, виготовлений з діелектричного матеріалу і розташований вертикально. З двох боків продуктопроводу розташовані два опромінювачі 11, які живляться від магнетронних генераторів 5. Для запобігання взаємного впливу генераторів їх живлення здійснюється від мережі зі зсувом по фазі 180°. Нижнім кінцем продуктопровід встановлений на стрічку транспортера 21, швидкістю руху якого регулюється кількість відбору насіння і, відповідно час його опромінення. Установка оснащена давачем рівня насіння в бункері 15, що забезпечує своєчасну подачу насіння в бункер. Останнє не має принципового значення, так як цей пристрій не впливає на основні параметри установки.

На жаль невідомо, які саме опромінювачі використані в установці, не приділена увага розподілу поля в зоні опромінення та узгодження продуктопроводу з опромінювачем. Таким чином невідомо, як

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

забезпечуються основні вимоги: однорідність опромінення і ефективне використання енергії електромагнітного поля. Виходячи з опису конструкції можна зробити висновок, що ці проблеми і в даній установці не вирішені належним чином.

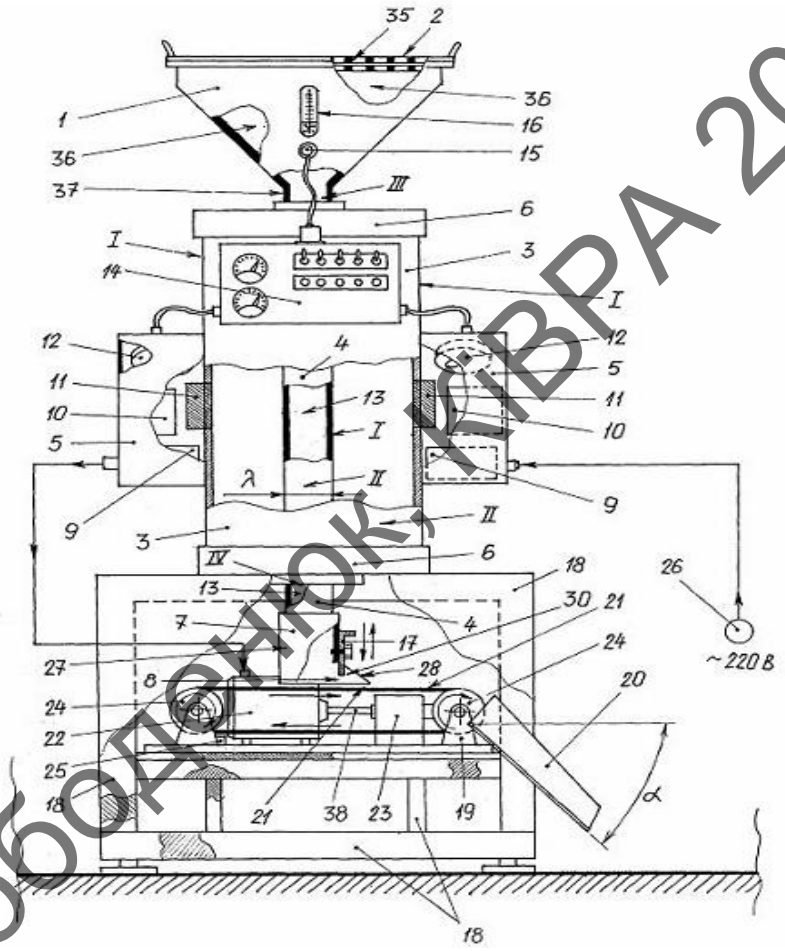


Рисунок 1.4. Пристрій для передпосівної мікрохвильової обробки насіння

Інший варіант установки для передпосівної обробки насіння сільськогосподарських рослин [33] зображений на рис. 1.5. В даному пристрої насіння подається на горизонтальний стрічковий транспортер 7. Вздовж стрічки транспортера, над її поверхнею, розташовані рупорні випромінювачі 4, які згруповані між собою і живляться від окремих джерел НВЧ енергії 5 таким чином, що їх розташування вздовж транспортера може змінюватись, змінюючи тим самим щільність потоку енергії електромагнітного поля, яка має відповідати програмі опромінення. Над

А.М. Слободянюк, КіВРА 2015

верхньою частиною транспортера прикріплені нерухомі гребені 10, які розташовані під кутом до руху стрічки в шаховому порядку з обох сторін транспортера, в наслідок чого насіння, рухаючись транспортером, перемішується, що забезпечує підвищену рівномірність опромінення.

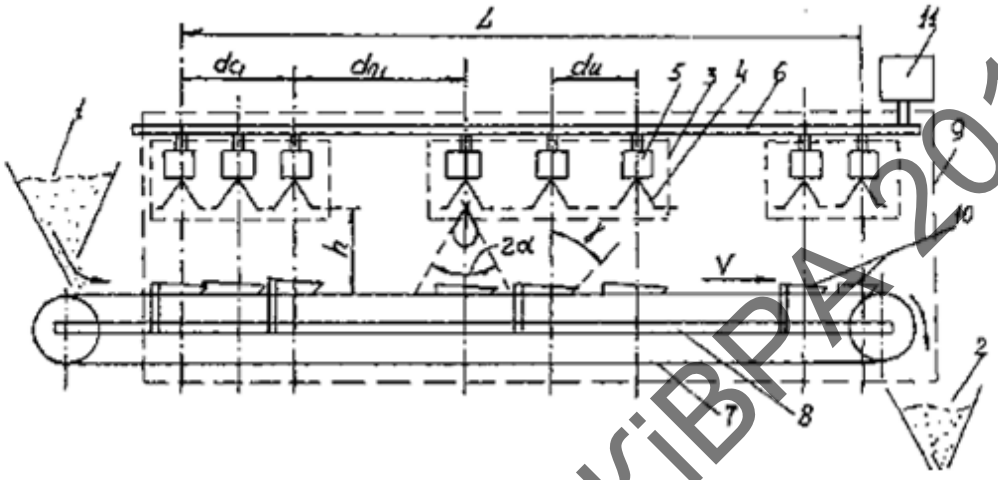


Рисунок 1.5. Пристрій для передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур

Дана конструкція більш досконала ніж попередні, але в ній також не приділена увага ефективному використанню енергії і, відповідно, ККД, через відсутність засобів для повторного використання енергії електромагнітної хвилі, що пройшла через шар насіння, не високий. Необхідно відмітити, що в стрічкових транспортерах при товстому шарі зерна енергія розподіляється нерівномірно, нижня частина його опромінюється меншою інтенсивністю, через поглинання енергії верхньою частиною. При тонкому шарі зерна більша частина енергії електромагнітного поля після проходження електромагнітної хвилі через насіння залишається не використаною, що значно знижує ККД установки. Використання гребенів, що перемішують насіння спричиняє зміщення зерна в центр транспортерної стрічки збільшуючи товщину шару в центрі і значно зменшуючи її на краях, що також суттєво впливає на рівномірність опромінення та на ККД пристрою.

Комплексний електротехнологічний пристрій [34] для передпосівної обробки насіння, що включає процес скарифікації, знезараження і активації

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

зображений на рис. 1.6. Конструкцією передбачено обробку насіння, що має тверду оболонку (люцерна, рапс та інші) в два послідовні етапи. На першому етапі насіння поступає в ультразвуковий відсік 2, який заповнено водою і піддається обробці ультразвуковим кавітаційним процесом, що створюється магнітострикційними перетворювачами 12. По ультразвуковому відсіку насіння переміщується транспортером 19 з перфорованими лопатками 20. Після відділення від води насіння потрапляє в перфорований канал 10, в якому воно підсушується термокалорифером 11. Підсушене насіння поступає в НВЧ камеру 22, де воно опромінюється електромагнітним полем, що випромінюється рупорними випромінювачами 23, які розташовані над стрічкою транспортера і живляться від спільного джерела 26 за допомогою хвилеводу 24. Ефективність комплексної обробки пояснюється наступним: завдяки ультразвуковій кавітації в оболонці зернівок з'являються мікротріщини, які сприяють прискоренню проростання; при зволоженні зерна мікроорганізми, які знаходяться на його поверхні, швидше поглинають вологу ніж саме зерно і утримують цей рівень тривалий час після просушування. При наступному опромінюванні електромагнітним полем відбувається вибіркове нагрівання і знищення мікроорганізмів.

Недоліком даного пристрою є його відносно низька продуктивність, складність конструкції і технологічного процесу. Також він зберігає недоліки попередніх варіантів.

Особливістю пристрою приведеного на рис. 1.7. є використання S-подібних вигинів у стрічці транспортера [35]. В даному пристрої стрічка транспортера послідовно проходить через два вали 25, 26 та 23, 24, кожен другий з яких розташований нижче першого і зміщений у протилежному відносно руху стрічки напрямі.

При цьому зерно, рухаючись разом з стрічкою конвеєра 19 і досягаючи вказаного вигину, пересипається на нижчу частину стрічки і одночасно перемішується, що створює умови більш рівномірного опромінення його електромагнітним полем.

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

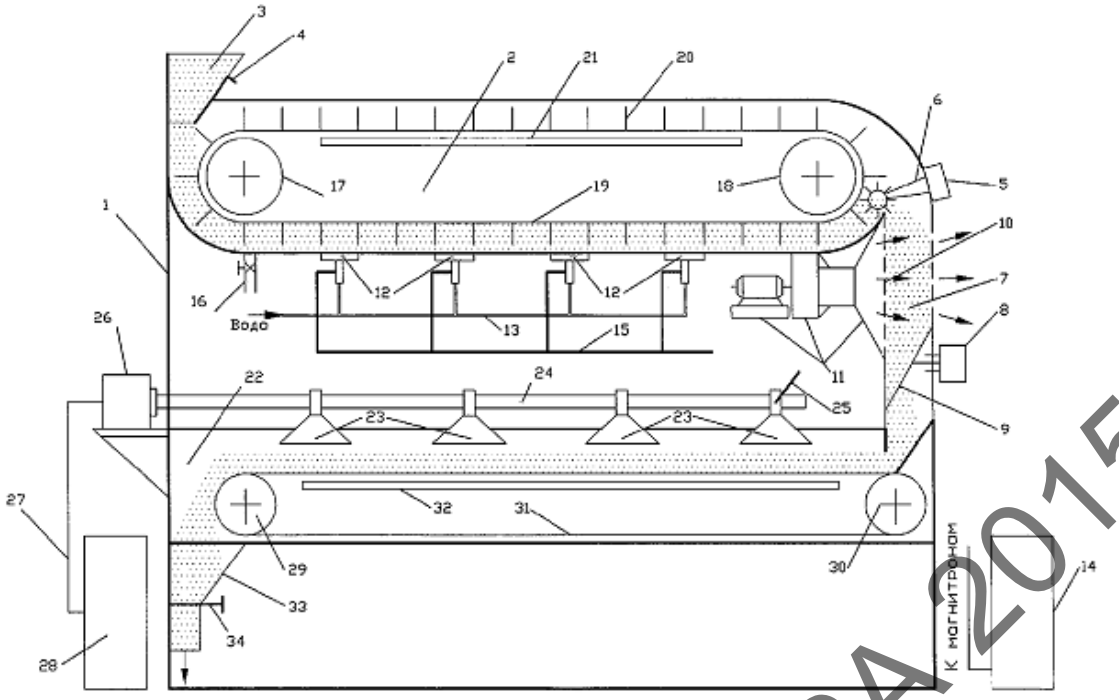


Рисунок 1.6. Електротехнологічна установка

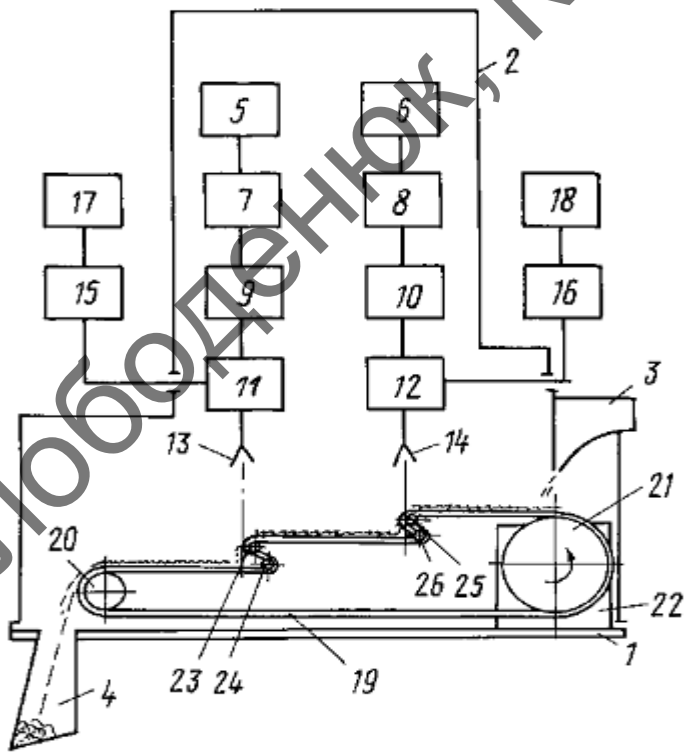


Рисунок 1.7. Пристрій для НВЧ передпосівної обробки насіння

Випромінювачі 13, 14, які живляться НВЧ генераторами 5 та 6, розміщені над зонами перемішування насіння охоплюють одночасно частину насіння до перемішування і частину після перемішування. При цьому, один випромінювач працює в діапазоні сантиметрових хвиль, а другий в

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

міліметровому діапазоні. Автори вважають, що ефективність такого пристрою вища ніж в випадку використання лише сантиметрового генератора.

Двочастотний варіант установки для передпосівної обробки насіння [36] запропоновано і показано на рис. 1.8. Вона має циліндричний металевий барабан 1, в який з протилежних сторін розташовані НВЧ та КВЧ, 5 та 8 відповідно, випромінювачі, що живляться від генераторів 6 та 10.

Рівномірність опромінення забезпечується ретельним перемішуванням насіння при обертанні барабана навколо своєї осі. Для кращого перемішування барабан обладнано спеціальними ребрами 14.

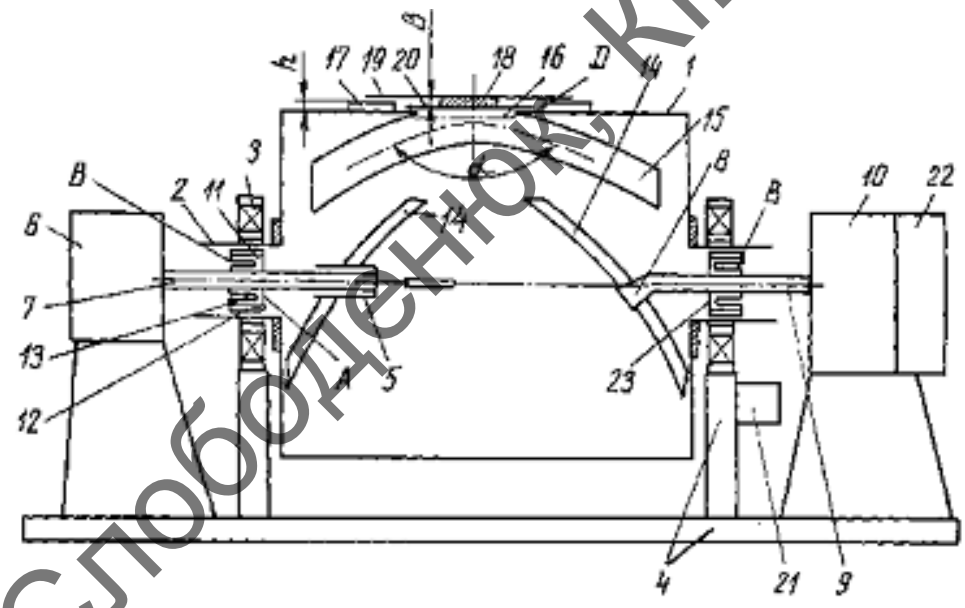


Рисунок 1.8. Пристрій для обробки насіння

Опромінення насіння в барабані відбувається одночасно з обертанням барабану навколо осі. Перемішуючись, насіння по черзі (по заданій програмі) піддається опроміненню НВЧ і КВЧ електромагнітним полем, Після закінчення процесу опромінення даної партії насіння барабан зупиняється, кришка 18 барабану відкривається і насіння висипається.

Опромінення зерна порціями, що супроводжується завантаженням і розвантаженням барабану, значно ускладнює технологічний процес і

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

обмежує продуктивність установки, до того ж в такій конструкції обмежена кількість випромінювачів, що також є її недоліком.

В установці, запропонованій в [37] і приведеній на рис. 1.9, передбачається опромінення насіння електромагнітним полем НВЧ і обробка плазмою. Установка має циліндричну камеру 1, в якій співвісно з камерою розташована труба 2, що має діаметр 25 - 30см, через яку з коефіцієнтом заповнення близько 15% пропускається насіння.

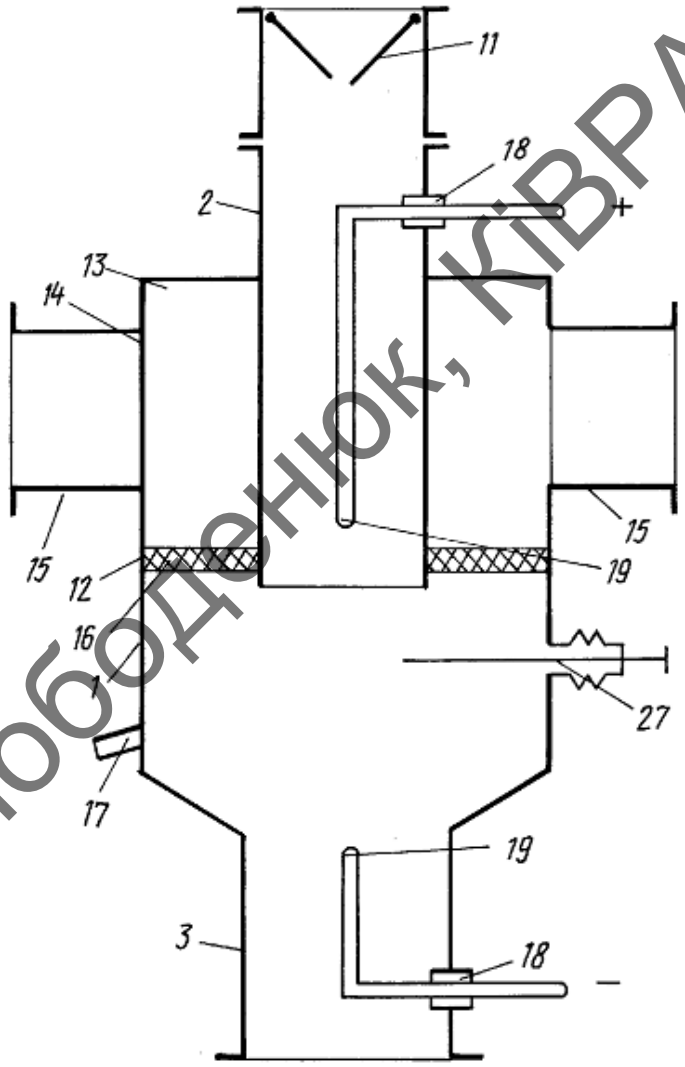


Рисунок 1.9. Пристрій для дезінсекції та дезінфекції матеріалів зернового походження

Електромагнітне поле НВЧ подається в камеру через хвилеводи 15, відділені діелектричними перетинками 16 від камери оброблення зерна. Вузол концентрації НВЧ енергії створюється відрізками труб 12 та 2, що

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

формують коаксіальний резонатор, розімкнений на одному кінці і замкнений на іншому. На нижньому зрізі труби 2 утворюється максимальна напруженість електричного поля в НВЧ діапазоні. На осі відрізків труб 2 та 3, через які завантажується і розвантажується насіння, розташовані електроди 19, що вводяться в робочу камеру через ізолятори 18. Робота пристрою полягає в тому, що через сопло 17 в камеру нагнітається газ таким чином, що в ній утворюється рециркуляційний потік. За допомогою електродів 19 і 27 та напруг, що подаються на них ініціюється плазмовий розряд, який підтримується імпульсним НВЧ електромагнітним полем. Так як НВЧ плазмовий розряд рухається проти потоку НВЧ енергії, то в кінці кожного імпульсу плазма поширюється на периферію зони рециркуляції. В паузі між імпульсами плазма рухається до осі рециркулюючого потоку. Оскільки час руху зерна в проміжку між трубами 2 та 3 набагато менший ніж період руху плазми, то плазма встигає охопити і обробити кожну окрему зернівку в потоці насіння. Таким чином в даному пристрої головну роль в обробці насіння виконує плазма, НВЧ електромагнітне поле використовується для підтримки і просторового поширення плазми.

Одним з варіантів, що відноситься до пристроїв, в яких для нагрівання об’єкту сушки використовується лише електромагнітне поле при атмосферному тиску в активній зоні, є пристрій [38], схематично показаний на рис. 1.10. Він пропонується для попередньої підготовки тютюну, яка за звичайних умов потребує тривалого часу і приміщення значної площі, але також може бути використаний для встановлення на зернозбиральному комбайні для проведення попередньої сушки зерна, що полегшить умови подальшого його зберігання. Пристрій працює наступним чином: продукт, що підлягає сушінню транспортером 25 подається до входу сушарки, в якій він через лабіринт 28, що не допускає витоку електромагнітних хвиль, під дією сили тяжіння, попадає до НВЧ камери 12, в якій, в процесі переміщення транспортером 10, піддається опроміненню електромагнітним полем, нагрівається і втрачає 10 - 15% вологи. Виводиться продукт з НВЧ камери

А.М. Слободенюк. КІВРА 2015

через вихідний лабіринт 24. В даному проекті не приведено детального опису НВЧ частини, особливо випромінювача і генератора, що є ключовими і забезпечують необхідну щільність потужності і однорідність розподілу електромагнітного поля. Очевидно також, що даний пристрій має низьку енергетичну ефективність так як електромагнітна хвиля один раз проходить через тонкий шар насіння, витрачає невелику частину енергії, решта якої розсіюється в об'ємі камери і витрачається на нагрівання її стінок.

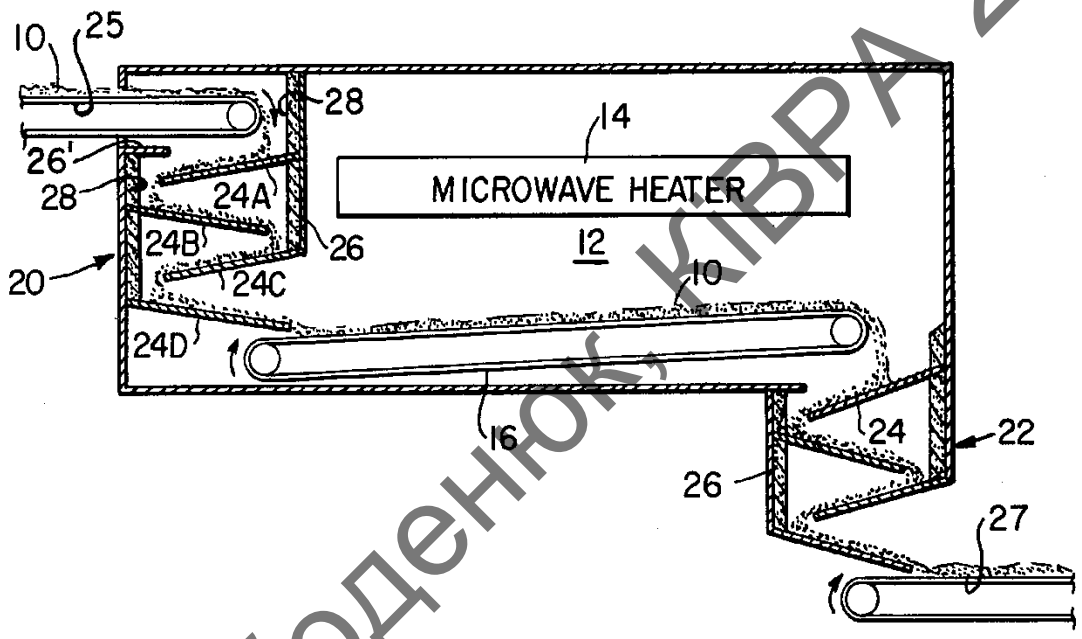


Рисунок 1.10. Мікрохвильова піч сільськогосподарської сушки

Подібний, але дещо досконаліший пристрій [39] зображенний на рис. 1.11. Даний пристрій відноситься до третьої групи, в якій об'єкт сушки обробляється електромагнітним полем і гарячим або холодним повітрям. Гаряче повітря використовується як додаткове джерело тепла для видалення вологи, що витісняється з внутрішніх шарів зернівок на їх поверхню, а також щоб винести її з загальної маси продукту і зменшити його вологу. В тому випаду, коли продукт нагрівається до температури вище середньої для його охолодження використовується обдув холодним повітрям. Таким чином апарат (рис. 1.11), призначений для сушіння харчових продуктів і має у своєму складі сушильну камеру 5 з портами для введення і виведення

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

продукту 1, рухому стрічку 4 для транспортування матеріалу, що підлягає сушінню, хвилеводи 2 для підведення електромагнітної енергії, що нагріває матеріал, та канали 3 для надходження холодного повітря, і засоби ущільнення для запобіганню витоку електромагнітної енергії через дані канали. В робочій камері випромінювачі розміщені над транспортером і під ним, що створює

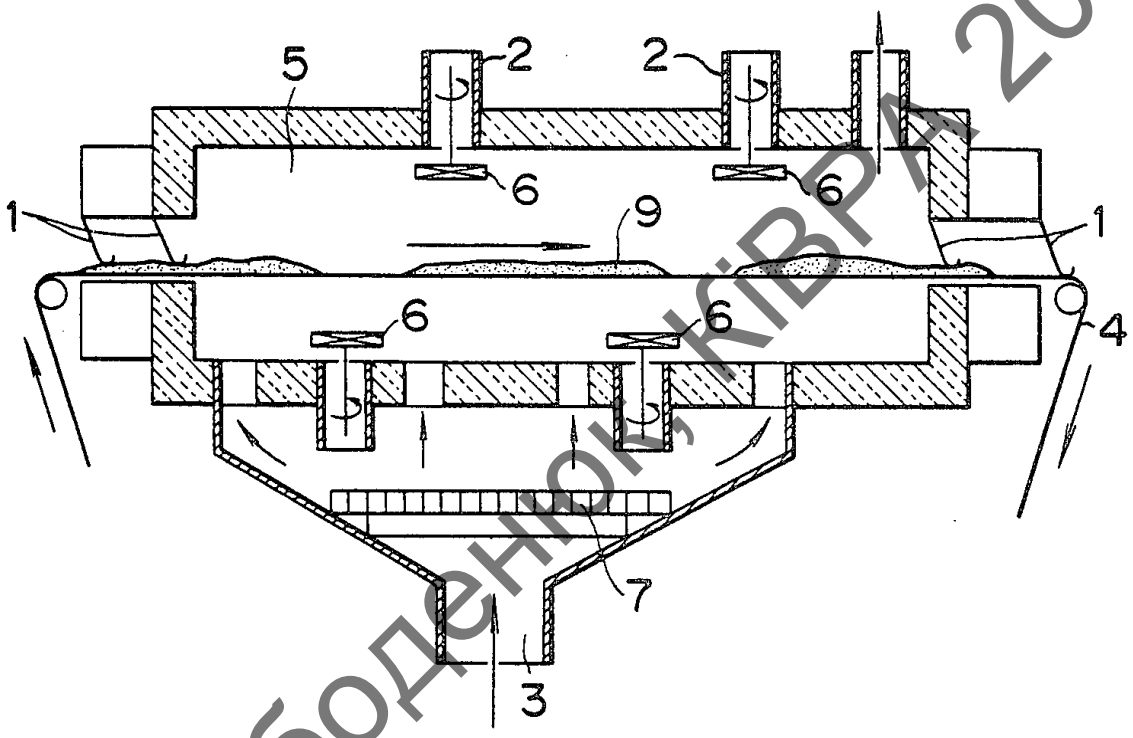


Рисунок 1.11. Пристрій для сушки холодним повітрям

умови рівномірнішого розподілу щільності енергії і деякого підвищення коефіцієнта корисної дії камери. Також для підвищення рівномірності опромінення використані пристрої збурення електромагнітного поля 6. Судячи з опису, пристрої збурення – це металеві пластинки що обертаються і розсіюють електромагнітні хвилі по об'єму камери, що викликає сумнів в енергетичній ефективності і, відповідно, доцільності їх використання. Для запобігання витоку енергії електромагнітного поля з робочої камери через канали завантаження і розвантаження продукту використовуються закритичні хвилеводи, а через канал вводу повітря – металева сітка 7. Можна

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

також припустити, що крім зазначених недоліків, даний пристрій має досить обмежену продуктивність.

Представником групи вакуумних електромагнітних сушарок є сушарка [40], схематично зображена на рис. 1.12. Вона має дві камери, одна з яких розташована в середині іншої. Внутрішня камера 1 виготовлена з радіопрозорого газонепроникного матеріалу, зовнішня 5 – з металу. Зовнішня металева камера з'єднана хвилеводом 6 з генератором 7 НВЧ електромагнітної енергії. Внутрішня камера трубопроводом 4 з'єднана з системою відкачування повітря 2 та 3. Зерно або інший продукт, що підлягає сушінню, завантажується у внутрішню камеру після чого вона закривається герметично, з неї відкачується повітря і вмикається НВЧ генератор.

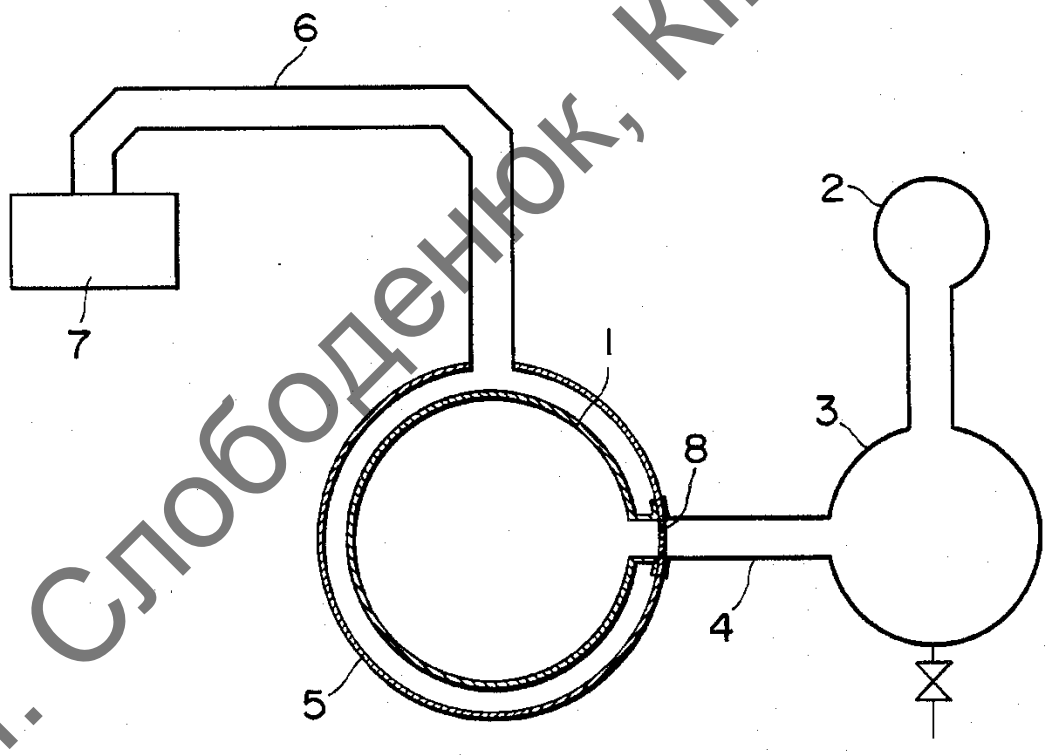


Рисунок 1.12. Пристрій мікрохвильової сушки низького тиску

Такий спосіб сушіння раціональний, так як є енергетично вигідним і не допускає перегріву продукту. Але сам пристрій має значні недоліки. До них відносяться: періодичність завантаження і розвантаження, що створює незручності при експлуатації і обмежує продуктивність обладнання;

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

нерівномірний розподіл енергії електромагнітного поля в об'ємі камери; відсутні заходи щодо повного використання енергії електромагнітного поля, яка надходить до камери; наявність лише одного джерела НВЧ енергії, що також обмежує продуктивність обладнання.

Пристрій, що зображений на рис. 1.13, відноситься до комбінованих вакуумних сушарок [41]. В ньому для сушки продукту як носії енергії використовуються гаряче повітря і електромагнітне поле, а також вакуумна камера для підвищення інтенсивності пароутворення.

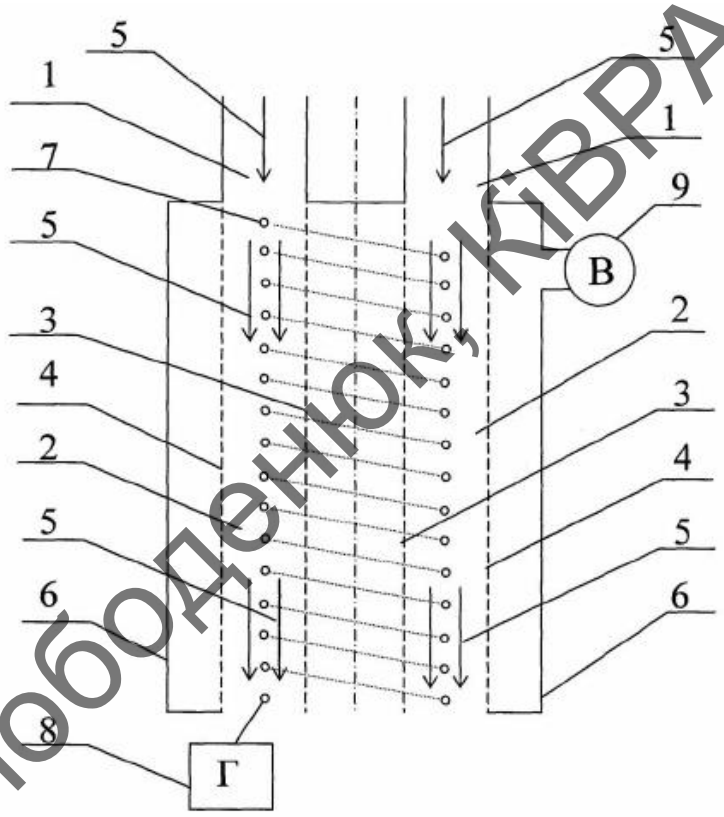


Рисунок 1.13. Пристрій сушіння зерна

Зерно або інший продукт нагрітий до 60°С гарячим повітрям в камері попереднього нагріву 1 поступає в іншу камеру 2, яка знаходиться між двома перфорованими циліндрами 3 та 4. Зовні дана камера обмежена герметичним металевим кожухом 6. Для підтримки заданої температури в вакуумній камері використовується електромагнітне поле, що випромінюється спіраллю 7, яка живиться від НВЧ генератора 8. Відкачка повітря забезпечується

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

вакуумним насосом 9.

Загалом, надто схематичне представлення конструкції пристрою не дають можливості чітко зрозуміти, як при безперервному завантаженні і розвантаженні герметизуються вхід і вихід, без чого неможливо забезпечити необхідний тиск в вакуумній камері; як забезпечується однорідність електромагнітного поля в зоні сушки і багато інших, на перший погляд, дрібниць, які при реалізації пристрою можуть бути вирішальними для його працездатності і енергоефективності.

Ще один пристрій, який відноситься до електромагнітних сушарок з відкачкою повітря, приведений на рис. 1.14 [42]. Активна (робоча) камера, в якій відбувається зменшення вологості продукту, сформована металевими циліндрами 20 та 22. Між цими циліндрами рухається зерно або інший сипучий продукт, що підлягає сушінню. НВЧ електромагнітне поле генерується магнетронним генератором 1, і по хвилеводу 26 поступає у робочу камеру. В порожнині робочої камери розміщені довгі 28 та короткі 29 провідники, орієнтовані паралельно осі камери.

Короткі провідники з'єднані з внутрішнім металевим циліндром відводком 31 на відстані половини довжини хвилі, завдяки чому ці провідники виконують роль корпусу. Довгі провідники з'єднані з внутрішнім циліндром камери за допомогою p-i-n діодів 30, завдяки чому у камері формується неоднозв'язна структура, в якій збуджується ТЕМ електромагнітне поле. За рахунок того, що на p-i-n діоди подаються керуючі сигнали від генератора випадкових чисел 13 забезпечується квазірівномірний розподіл електромагнітного поля. В роботі стверджується, що внаслідок створення багатозв'язного ТЕМ-поля забезпечується багатозонне нагрівання, і, як наслідок, рівномірне сушіння зерна. Попередня відкачка повітря в зоні завантаження і розвантаження реалізується витяжними пристроями 5, 6, 7 та 8 через трубопроводи 9, 10, 11 та 12; безпосередньо з робочої камери вакуумним насосом 14 через труби 15 та 16.

При детальному розгляді даного пристрою виникає сумнів щодо деяких

А.М. Слободенюк. КІВРА 2015

тверджень. Чи можна забезпечити рівномірне прогрівання нерівномірним розподілом поля? Тому що в наведеній вище структурі забезпечити рівномірне поле принципово не можливо. Відомо також, що існуючі p-i-n діоди не витримують високої концентрації потужності електромагнітного поля, яка має бути в потужних сушарках і тому їх застосування в даних пристроях сумнівне.

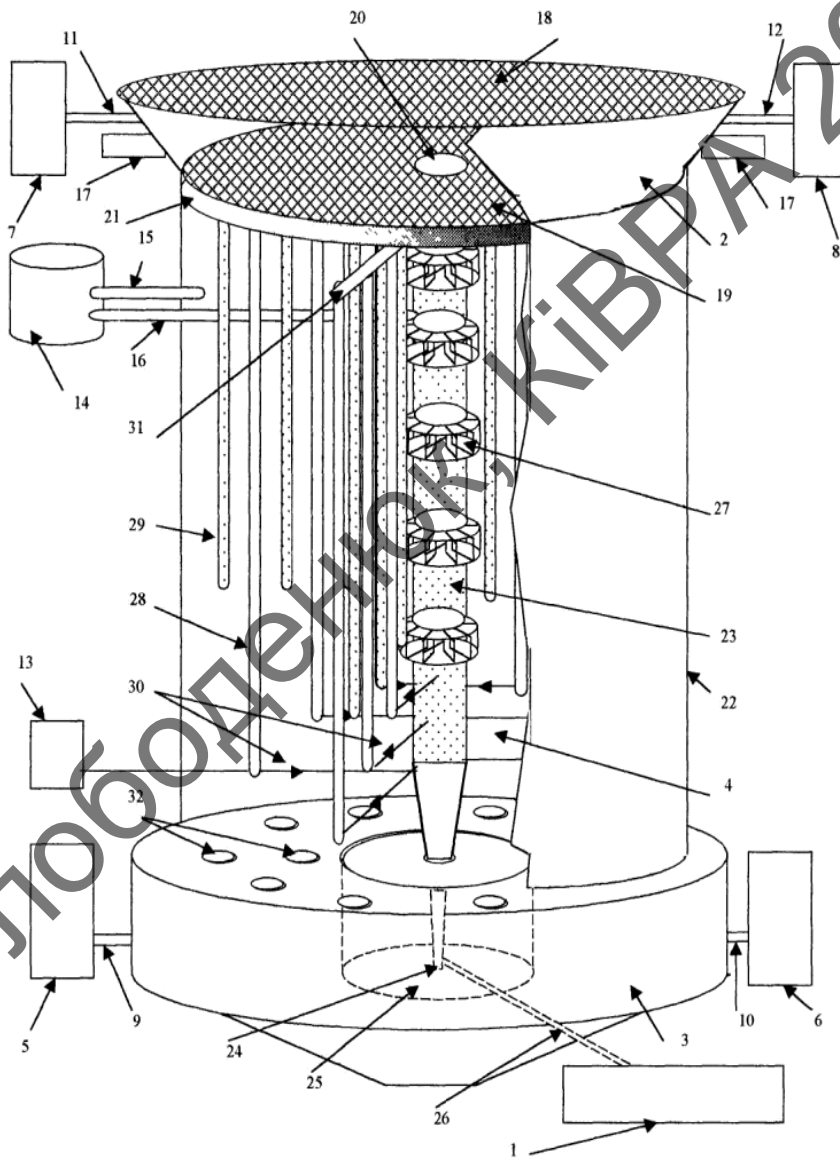


Рисунок 1.14. Надвисокочастотний пристрій для сушіння зерна

Наступний, на мій погляд, невдалий варіант приведений на рис. 1.15 [43]. Дана сушарка має НВЧ генератор електромагнітного поля 1, з'єднаний з кільцевим резонатором біжучої хвилі 23 через спрямований відгалужувач 25, який забезпечує в кільцевому резонаторі біжучу хвилю і не допускає

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

попадання електромагнітної хвилі, що залишилася після проходження через продукт, який підлягає сушінню, назад до генератора. Хвилевод 24 кільцевого резонатора в поперечному перетині має прямокутну форму. По його нижній частині рухається зерно або інший сипучий продукт, який взаємодіє з електромагнітним полем і нагрівається ним. Для забезпечення резонансу в кільцевому резонаторі використано фазозсувач 26. Завантажується і розвантажується сушарка через відрізки закритичних хвилеводів 4 та 5, відповідно. Верхня стінка хвилеводу, по якому рухається зерно, і в якому відбувається опромінення електромагнітним полем, виконана з дрібної сітки 7, через яку не проходить зерно і електромагнітне поле, але відводиться вологе повітря. Для герметизації генераторної частини від вологого повітря, пилу та зерна використані діелектричні пластинки 8 та 9.

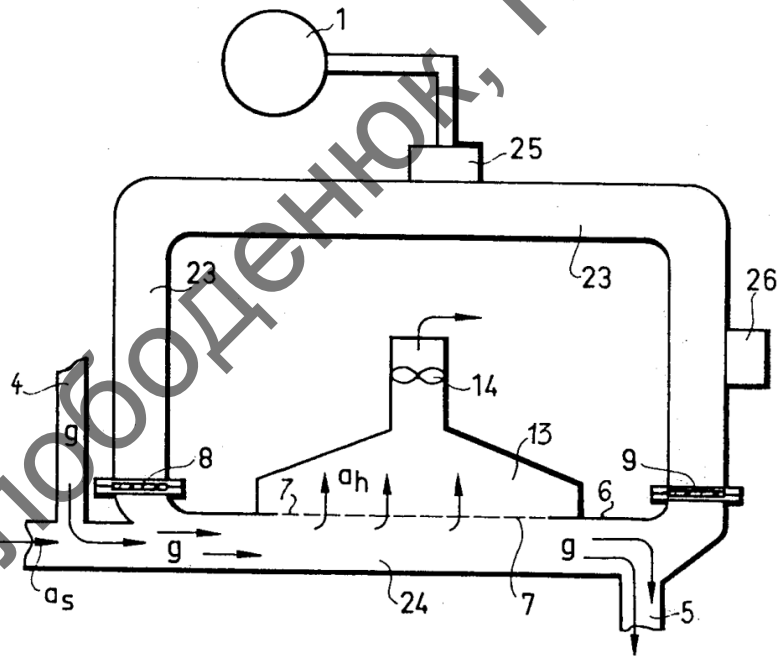


Рисунок 1.15. Мікрохвильовий пристрій для сушки виробів у вигляді зерен

Проблеми даної конструкції полягають в тому, що об’єкт сушки пропускається через хвилевід, який на частотах, дозволених для промислового використання, має досить малі розміри поперечного перетину. В більшості випадків це частота 2450 МГц і хвилевід, який відповідає їй, має

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

ширину лише 9 сантиметрів, до того ж електрична складова розподіляється в поперечному напрямку за синусоїдальним характером, тобто є суттєво нерівномірним. Таким чином даний пристрій має надзвичайно низьку продуктивність і тому втрачає сенс промислового використання.

Досить вдалим можна вважати пристрій [44], запропонований на рис. 1.16.

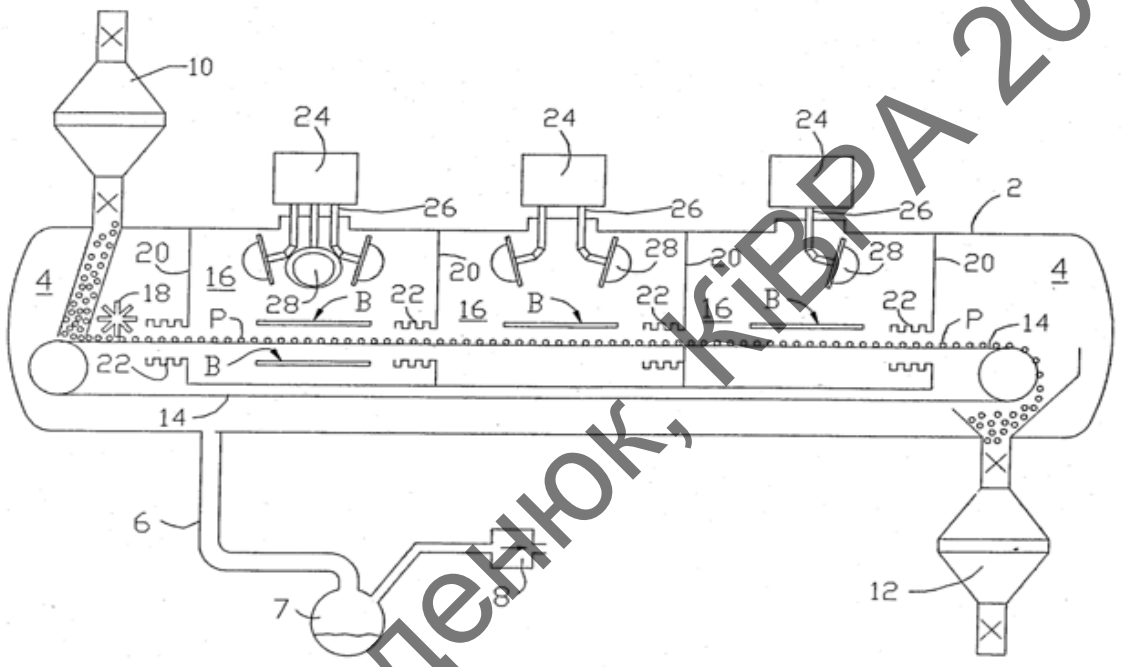


Рисунок 1.16 Пристрій для мікрохвильової і теплової сушки

В даному варіанті конструкції для сушки гранульованого продукту, в тому числі зерна, у вакуумній камері застосовуються електромагнітне поле НВЧ діапазону та інфрачервоне випромінювання. Гранульований продукт Р вводиться у вакуумну камеру 4 через вхідний вентиль 10 і розташовується на стрічці 14 вирівняним по висоті шаром. Стрічка 14 транспортує продукт Р послідовно через декілька зон 16, в яких він підлягає як мікрохвильовому, так і інфрачервоному опроміненню. Опромінення двома типами електромагнітного поля значно підвищує ефективність виходу вологи з продукту до камери 4, з якої вона відкачується вакуумним насосом 8. Сухий продукт залишає камеру 4 через вихідний шлюз 12.

У будь-якій із зон 16 камери 4 НВЧ електромагнітна хвиля, що

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

генерується генератором 24 і випромінюється антенами 28 в певній зоні відбивається від металевих поверхонь 2 та перетинок 20 втрачає однорідність поляризації, яку мало при первинному випромінюванні. Це позитивний ефект, так як при накладанні електромагнітних хвиль можна уникнути неоднорідності розподілу щільності потужності, що проявляється при однорідній поляризації за рахунок фазових співвідношень. Це електромагнітне поле нагріває продукт з середини.

Для організації інфрачервоного випромінювання використовується металеві пластинки В з нагрівачами, розташованими в середині пластинки. Сама пластинка є прозорою для НВЧ електромагнітних хвиль завдяки певній конструкції системи щілин, що перевипромінюють електромагнітні хвилі. Інфрачервоне випромінювання нагріває продукт більше зовні, як в окремих зернівках так і в масі продукту, вирівнюючи його температурний профіль. Так як в процесі руху стрічки в камері 4 вологість продукту зменшується, то щільність потужності як НВЧ електромагнітного поля, так і інфрачервоного випромінювання в наступних камерах 16 зменшується. Позитивним є також те, що нагрівання відбувається в атмосфері пониженого тиску через що волога кипить при температурі набагато нижчій за традиційну точку кипіння, пов’язаною з водою, продукт ефективно висушується без перегріву.

Висновки до розділу

1. Використання електромагнітного поля високих та надвисоких частот для сушіння зерна та іншої сільськогосподарської продукції – це значний крок вперед в удосконаленні сушильних технологій, завдяки чому можна значно зменшити енергозатрати, скоротити час сушіння, підвищити якість продукту, повністю автоматизувати весь технологічний процес, мати високомобільне обладнання, яке можна використовувати будь-де, в тому числі безпосередньо на зернозбиральних комбайнах

2. Всі НВЧ сушарки, що пропонуються сьогодні вітчизняними та зарубіжними розробниками, умовно діляться на чотири групи: пристрої, в

А.М.Слободенюк, КІВРА 2015

яких для нагрівання об’єкту сушки використовується лише електромагнітне поле при атмосферному тиску в активній зоні, вакуумні електромагнітні сушарки, комбіновані пристрої, в яких використовується електромагнітне поле та інші джерела тепла, при атмосферному тиску в робочій камері та комбіновані вакуумні сушарки. Найбільш економічними вважаються пристрої, що відносяться до останньої групи.

3. Зважаючи на сучасний стан розвитку НВЧ генераторів доцільно розвивати багатогенераторні пристрої, що працюють на спільне навантаження при мінімальному взаємному впливі.

4. Всі розглянуті конструкції сушарок мають недоліки: низька продуктивність, низька енергетична ефективність, так як більша частина енергії електромагнітного поля, що пройшла через шар насіння розсіюється в об’ємі робочої камери і поглинається її стінками, невеликий коефіцієнт корисної дії робочої камери.

5. Для підвищення коефіцієнта корисної дії робочої камери та однорідності розподілу щільності енергії електромагнітного поля необхідно забезпечити багаторазове проходження електромагнітної хвилі через об’єкт сушки.

6. У вакуумних сушарках значного вдосконалення потребує система герметизації портів завантаження і розвантаження, які забезпечать безперервну подачу матеріалу в робочу камеру та мінімальний об’єм відкачки.

7. Так як фактично всі розглянуті сушарки мають суттєві недоліки не використання повного випромінювання електромагнітного поля і нерівномірний розподіл енергії поля, то необхідна розробка нових пристроїв, в яких ці недоліки будуть вирішені.

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

2 МІКРОХВИЛЬОВА УСТАНОВКА ДЛЯ СУШКИ З СУМУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ В АКТИВНІЙ ЗОНІ ВІД ДЕКІЛЬКОХ ДЖЕРЕЛ

2.1 Загальна характеристика установки

При побудові пристроїв (установок) сушіння, знезараження та дезінсекції зерна та іншої сільськогосподарської продукції, що закладається на зберігання, і розрахованих на високу продуктивність і високу щільність енергії в активній камері, які не можуть бути забезпечені одним джерелом (магнетроном), при використанні магнетронів малої та середньої потужності, окрім задоволення приведених вище вимог, необхідно наростити сумарну потужність в заданому об’ємі від кількох джерел електромагнітної енергії.

Поставлена задача вирішується в установці [45], яка зображена на рис.2.1, рис.2.2 та рис.2.3.

Принцип роботи установки полягає в тому, що об'єкт опромінювання електромагнітним полем НВЧ з накопичувального бункера 1, рис. 2.1, рис.2.2 та рис. 2.3, надходить вільним падінням в робочу камеру 2, рис. 2.1, рис. 2.2, рис. 2.3, яка виготовлена з радіопрозорого матеріалу (діелектрика) і має форму колового циліндра. Опромінювачі робочої камери - це N дзеркальних, рис. 2.1 та рис. 2.2, або лінзових, рис. 2.3, антен, розташованих по колу навколо робочої камери і в своєму складі мають: лінійний випромінювач 3, рис.2.1, рис.2.2 та рис.2.3, і циліндричні дзеркала 4, рис. 2.1 та рис. 2.2 або циліндричні лінзи 5, рис.2.3.

Лінійні випромінювачі, які є опромінювачами дзеркальних або лінзових антен, це хвилеводно-щілинні або хвилеводно-вібраторні антени, що випромінюють електромагнітні хвилі, вектор поляризації яких нахилений під кутом 45° до осі антени і до осі робочої камери. Як дзеркала використовується циліндрична металева поверхня 4, рис. 2.1, коаксіальна з робочою камерою, параболічні циліндри або фрагменти еліптичних чи

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

колових циліндрів 6, рис. 2.2, фокальна вісь яких не співпадає з віссю робочої камери.

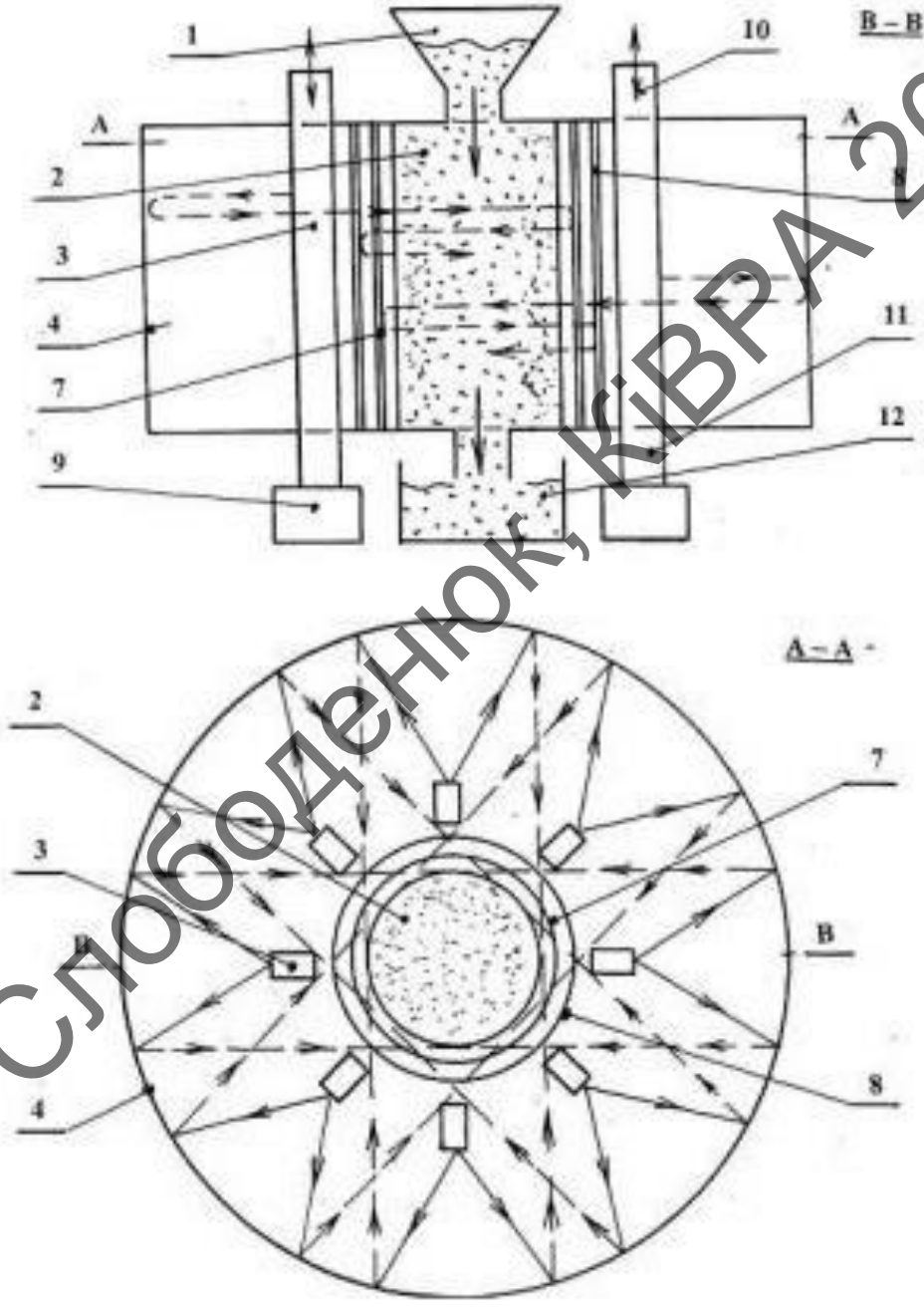


Рисунок 2.1. Мікрохвильовий пристрій для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна та інших сипучих матеріалів з циліндричним дзеркалом коаксіальним з робочою камерою.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

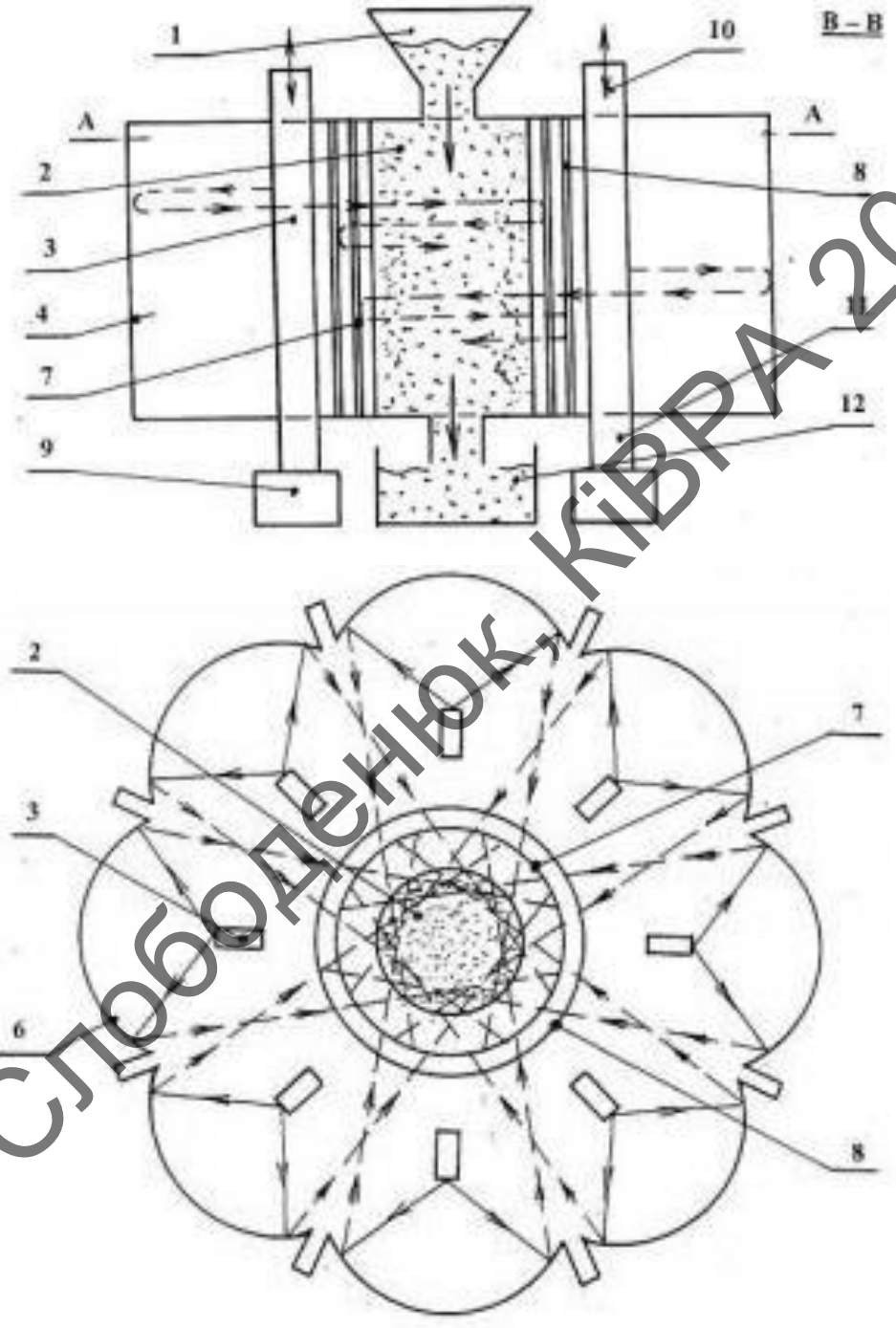


Рисунок 2.2. Мікрохвильовий пристрій для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна та інших сипучих матеріалів з дзеркалами в формі параболічного або фрагмента еліптичного чи колового циліндра, вісь якого не співпадає з віссю робочої камери.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

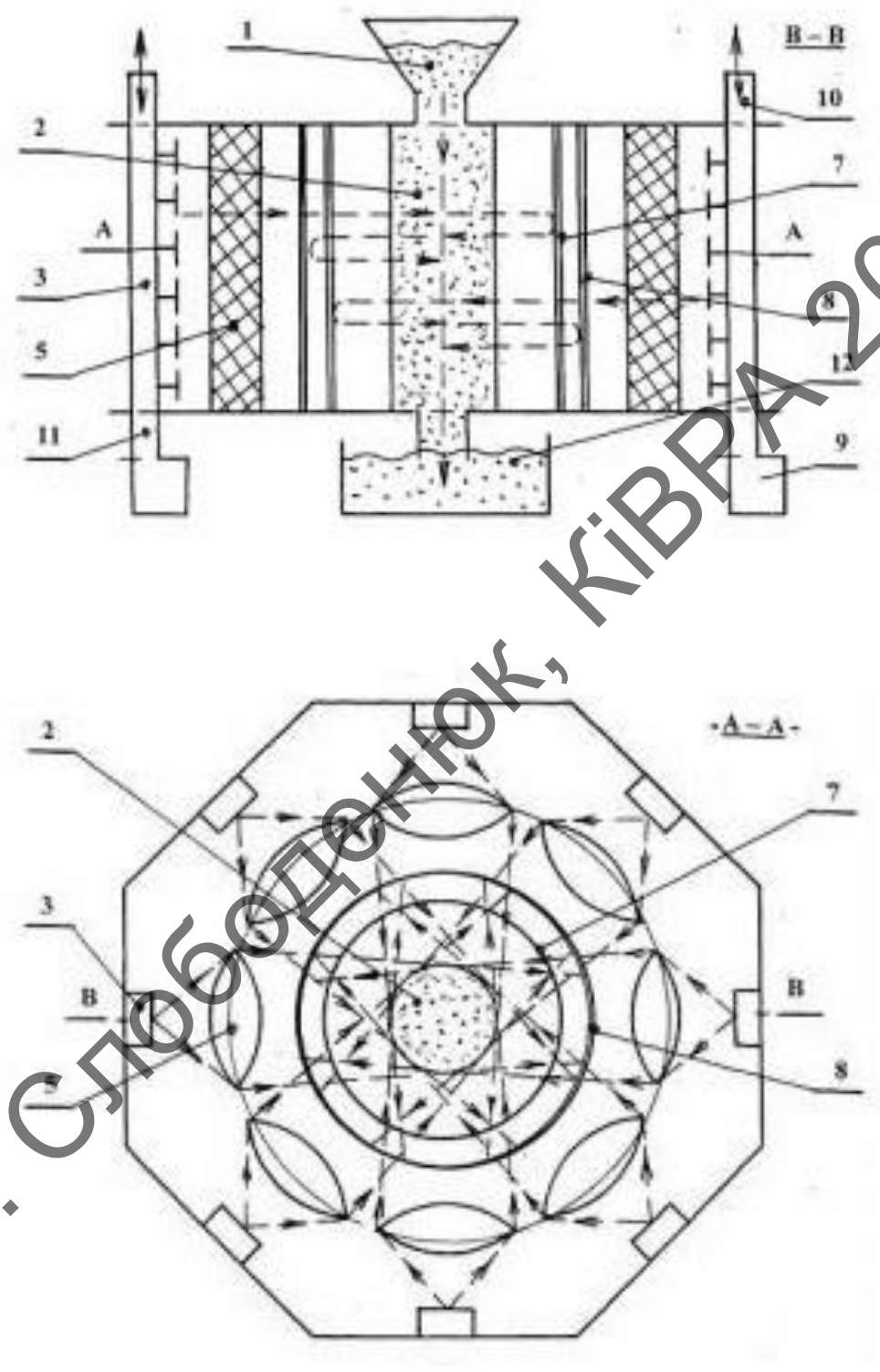


Рисунок 2.3. Мікрохвильовий пристрій для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна та інших сипучих матеріалів з циліндричними лінзами.

А. М. Слободянюк, КіВРА 2015

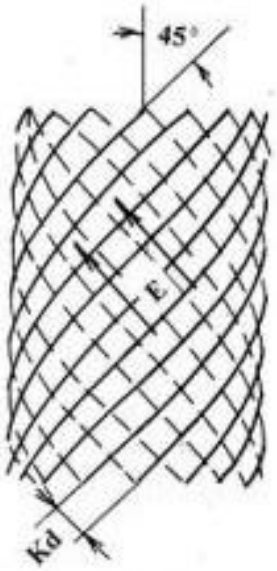


Рисунок 2.4. Структура поляризованого циліндричного дзеркала.

Використання циліндричної поверхні коаксіальної з робочою камерою як дзеркала для електромагнітних хвиль дещо спрощує конструкцію пристрою, але обмежує можливості впливати на хід променів, відбитих від дзеркала і, відповідно, на розподіл енергії в робочій камері, так як фазова лінія лінійного випромінювача має бути розташована на відстані R/2 від осі циліндра, де R - радіус циліндра, який використовується як дзеркало. При використанні параболічних, еліптичних та колових циліндричних металевих поверхонь (в останньому випадку вісь циліндричної поверхні не співпадає з віссю робочої камери) конструкція пристрою ускладнюється, але можливість впливати на хід променів відбитих від дзеркала і, відповідно, на концентрацію і розподіл енергії в робочій камері значно розширюється, так як фокальна лінія дзеркал безпосередньо не зв'язана з віссю камери, а форма поверхні дзеркала з радіусом циліндра, на якому вони розташовані.

Навколо робочої камери 2 розташоване поляризоване дзеркало 7, рис. 2.1, рис. 2.2 та рис. 2.3, що має форму циліндра коаксіального з робочою камерою, діаметр якого дещо більший діаметра робочої камери. Його конструкція полягає в тому, що на поверхні діелектричного циліндра нанесена одношарова обмотка тонкого металевого провідника (рис. 2.4). Кут намотки $\alpha = 45°$, крок намотки $t = Kd$, де K - ціле число більше 1, d - діаметр

А. М. Слободенюк. КіВРА 2015

або ширина смужки провідника. Крок намотки розраховується з умови заданих значень коефіцієнта проходження і коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі від поверхні поляризованого дзеркала. Електромагнітна хвиля, яка падає на поверхню поляризованого дзеркала зовні, має вектор поляризації, перпендикулярний відносно орієнтації обмотки (орієнтації провідника). При такій взаємній орієнтації вектора поляризації і провідника дзеркало прозоре для електромагнітних хвиль. При правильному виборі кроку; намотки коефіцієнт проходження (коефіцієнт прозорості) близький до одиниці, тому електромагнітна хвиля вільно проходить через поляризоване дзеркало і віддає більшу частину своєї енергії об'єкту опромінення. Залишкова електромагнітна хвиля, яка пройшла через робочу камеру, попадає на поверхню поляризованого дзеркала з внутрішньої сторони і, практично, повністю відбивається від його поверхні, так як вектор поляризації в цьому випадку виявляється паралельним відносно орієнтації провідника, що очевидно на рис. 2.4. Відбита електромагнітна хвиля, яка пройде через робочу камеру в зворотному напрямку, вільно пройде через поляризоване дзеркало але відіб'ється від діелектричного циліндра 8, рис. 2.1, рис. 2.2 та рис.2.3, яка виконує функцію пристрою, що узгоджує антену-опромінювач з ускладненою робочою камерою, в яку входять: власне робоча камера, поляризоване дзеркало та діелектричний циліндр 8.

Розглянутий вище процес ідентичний для всіх N дзеркальних та лінзових опромінювачів робочої камери. Таким чином, забезпечується практично повна концентрація енергії електромагнітного поля в робочій камері, що гарантує високий коефіцієнт її корисної дії; з тієї ж причини відсутній зв'язок між окремими випромінювачами, так як практично відсутня електромагнітна хвиля, яка може попасти на вхід інших джерел електромагнітної енергії; Задана концентрація (щільність) потужності реалізується необхідною кількістю джерел енергії та відповідним вибором діаметра робочої камери; рівномірність опромінення в поперечній площині забезпечується тим, що опромінення відбувається ідентичними джерелами

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

енергії, які симетрично розташовані навколо робочої камери, вибором діаметра робочої камери, формою дзеркал, які забезпечують заданий хід променів в зоні робочої камери та іншими параметрами; в подовжньому напрямку рівномірність або заданий закон зміни щільності потужності забезпечується лінійними випромінювачами.

Лінійний випромінювач - це лінійна антенна решітка, фазова лінія (фазовий центр) якої співпадає з фокусною лінією дзеркала (лінзи). З метою реалізації максимального коефіцієнта корисної дії випромінювача і максимального використання НВЧ енергії, що генерується магнетронами 9, рис. 2.1, рис. 2.2 та рис. 2.3, в хвилеводах випромінювачів створюється режим стоячих хвиль короткозамикачами 10, рис. 2.1, рис. 2.2 та рис. 2.3, з рухомими короткозамкненими стінками, а також пристрої 11, рис. 2.1, рис.2.2 та рис. 2.3, що узгоджують магнетрон з випромінювачем. Об'єкт, який пройшов опромінення в робочій камері, збирається в контейнері 12, рис. 2.1, рис. 2.2 та рис.2.3. В варіанті з лінзами лінзи можуть бути, як сповільнюючими, так і прискорюючими. Сповільнюючі лінзи виготовляються з твердого діелектрика, мають значну вагу і складну технологію. Прискорюючі лінзи виготовляються з тонких металевих пластинок, мають значно меншу вагу і простішу технологію виготовлення порівняно з сповільнюючими лінзами.

2.2 Дзеркальні антени, їх основні характеристики

Дзеркальні антени являють собою сукупність металевого відбивача і первинного випромінювача. Такі антени використовуються в багатьох галузях радіотехніки, особливо в радіолокації, радіоастрономії і космічному зв'язку. Найбільш розповсюдженими є відбивачі у вигляді параболоїда обертання (рис. 2.5а), обрізаного параболоїда (рис. 2.5б) і параболічного циліндра (рис. 2.5в). Антени з параболічними відбивачами називаються інакше параболічними антенами.

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

Дзеркальними антенами називають антени, у яких поле в розкриві формується в результаті віддзеркалення електромагнітної хвилі від металевої поверхні спеціального рефлектора (дзеркала). Джерелом електромагнітної хвилі зазвичай служить яка-небудь невелика елементарна антена, названа в цьому випадку опромінювачем дзеркала або просто опромінювачем. Дзеркало і опромінювач є основними елементами дзеркальної антени.

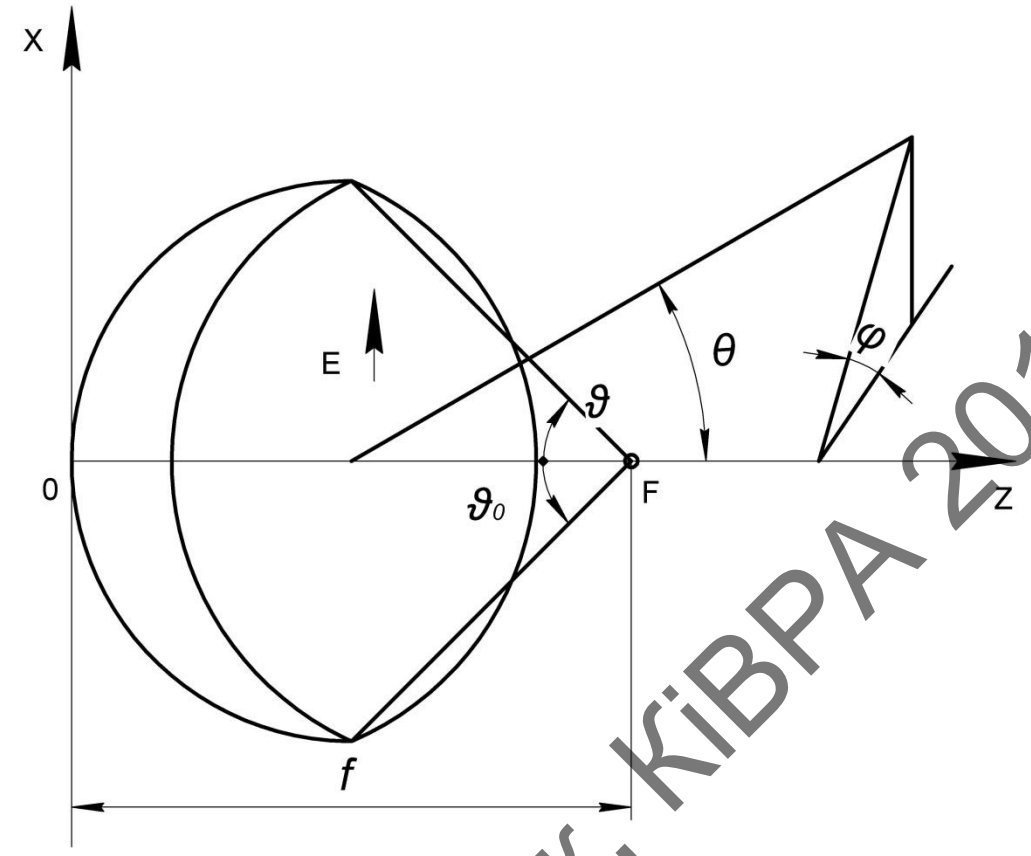
Дзеркало зазвичай виготовляється з алюмінієвих сплавів. Іноді для зменшення парусності дзеркало виконується не суцільним, а гратчастим. Поверхні дзеркала додається форма, що забезпечує формування потрібної діаграми спрямованості. Найбільш поширеними є дзеркала у вигляді параболоїда обертання, усіченого параболоїда, параболічного циліндра або циліндра спеціального профілю. Опромінювач розташовується у фокусі параболоїда або уздовж фокальної лінії циліндрового дзеркала. Відповідно для параболоїда опромінювач повинен бути точковим, а для циліндра – лінійним. Разом з однозеркальними антенами застосовуються і дводзеркальні.

Для того щоб правильно розраховувати електромагнітне поле, яке відбивається від циліндричного дзеркала і розповсюджується в робочу зону, проаналізуємо принцип дії такої антени.

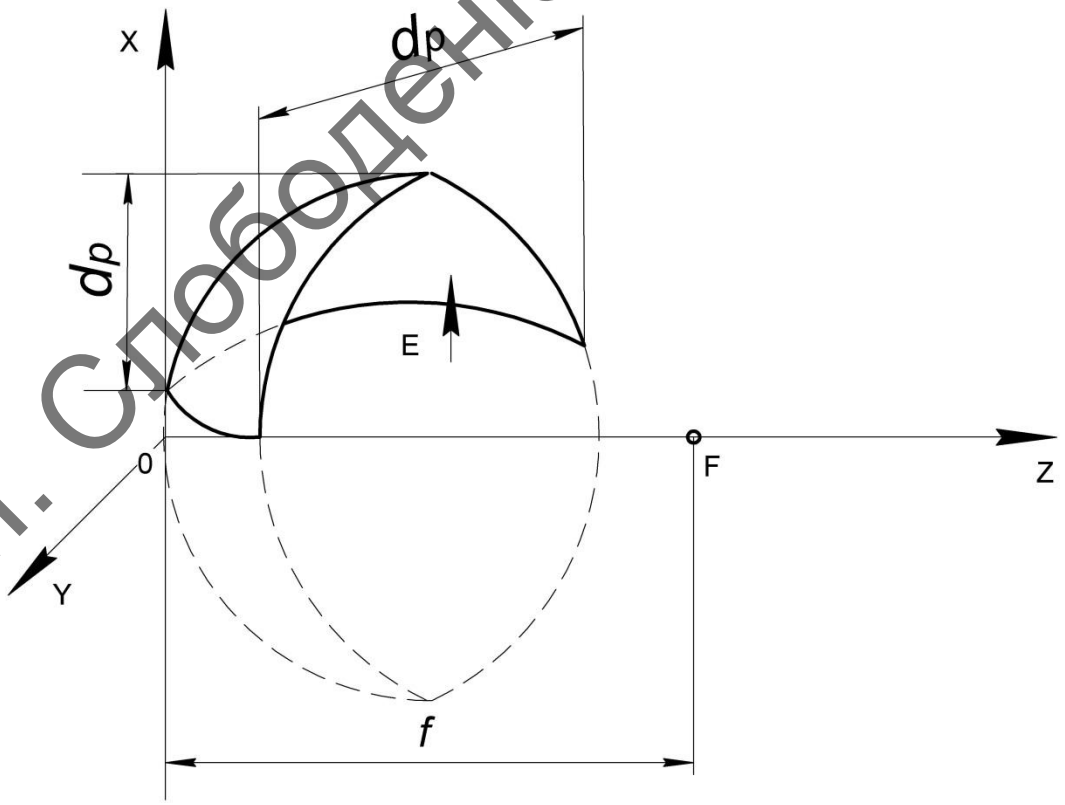
Принцип дії найпростішої дзеркальної антени ілюструється на рис.2.6. Точковий опромінювач (наприклад, маленький рупор), розташований у фокусі параболоїда, створює в поверхні дзеркала сферичну хвилю. Дзеркало перетворює її в плоску, тобто розбіжний пучок променів перетвориться в рівнобіжний, чим і досягається формування гострої діаграми спрямованості.

Зміщення опромінювача в напрямку, перпендикулярному оптичній осі дзеркала, супроводжує відхилення напрямку головного максимуму випромінювання в бік, протилежний зміщенню опромінювача. Якщо обертати опромінювач навколо осі антени, то головний пелюсток буде також повертатися.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

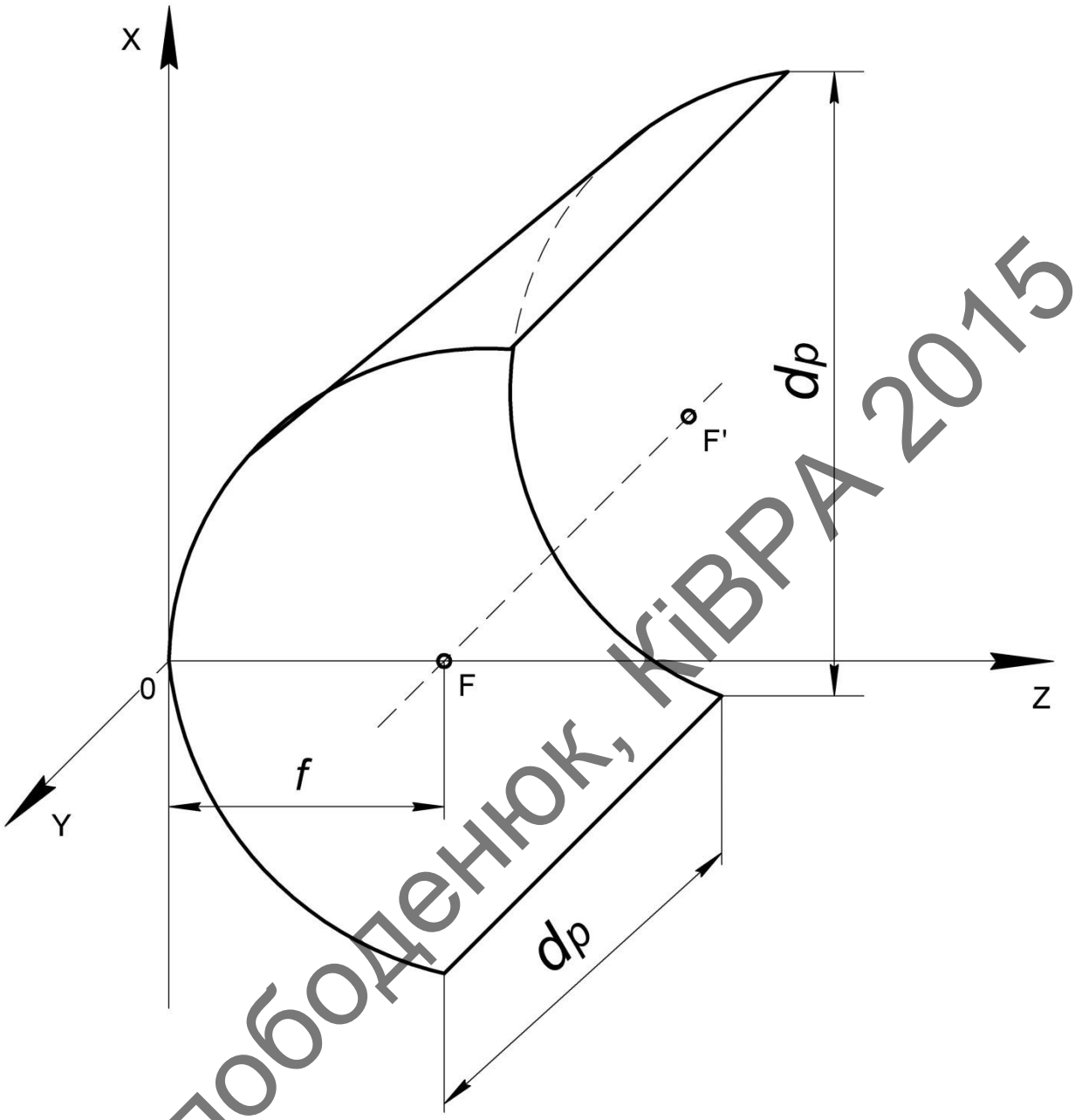


а – у вигляді параболоїда обертання



б – у вигляді обрізаного параболоїда

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015



в – у вигляді параболічного циліндра

Рисунок 2.5. Види відбивачів дзеркальних антен, де d_p – діаметр розкриву відбивача [см]; v_0 – кут розкриву [рад]; f – фокусна відстань відбивача [см]; F – фокус параболоїда;

Таким чином можна утворити рівносигнальну зону навколо осі антени з одночасним формуванням декількох ДС спільним дзеркалом (в тому числі сумарних і різницевих).

А.М.Слободенюк, КіВРА 2015

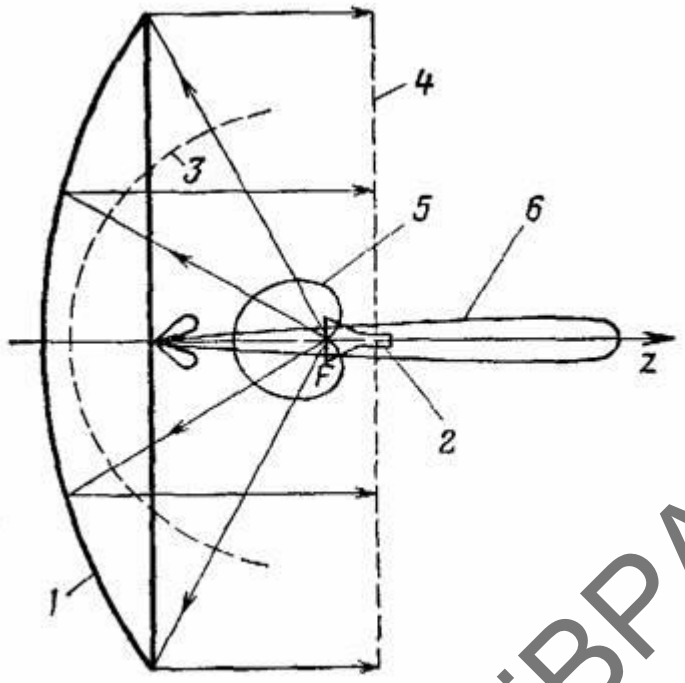


Рисунок 2.6. Принцип дії дзеркальної антени.

1 - дзеркало; 2 - опромінювач; 3 - сферичний фронт хвилі опромінювача; 4 - плоский фронт хвилі, відбитої від дзеркала, 5-діаграма спрямованості опромінювача; 6 – діаграма спрямованості дзеркала.

2.3 Геометрично – променева теорія формування електромагнітного поля в розкриві антени.

Розглянемо перетин параболічного циліндра в площині xoz (рис.2.7). Утворена цим перетином парабола має властивість, що відстані від її фокуса F до будь-якої точки, що лежить на лінії MN, перпендикулярній осі параболи і паралельної її директрисі, по ламаним шляхах, (FP_1M_1, FP_2M_2 та ін.) однакові. Отже, виходить плоский фронт хвилі. Встановлений у точці F опромінювач випромінює хвилі, близькі до сферичних. При цьому розбіжні промені збігаються з лініями FP_1, FP_2 і т.д. Якби довжина хвилі первинного джерела була нескінченно мала, то промені, що падають на внутрішню поверхню параболоїда, відбивалися б від неї за законами геометричної оптики. При цьому, внаслідок параболічної форми дзеркала, всі відбиті промені були б паралельні осі z і, таким чином, сферична хвиля перетворювалася б параболоїдом в плоску. Насправді довжина хвилі

А.М. Слободенюк КіВРА 2015

опромінювача не безкінечне мала, і тому відбиті промені йдуть не паралельно, а дещо розходяться. Однак розбіжність відбитих від дзеркала променів на невеликій ділянці шляху від дзеркала до поверхні розкриву можна знехтувати, і цю поверхню можна вважати синфазно збудженою.

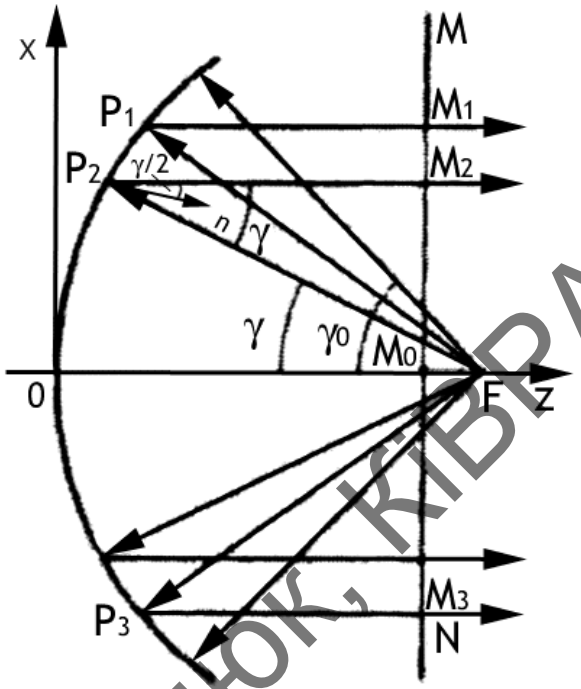


Рисунок 2.7. Отримання плоского фронту хвилі.

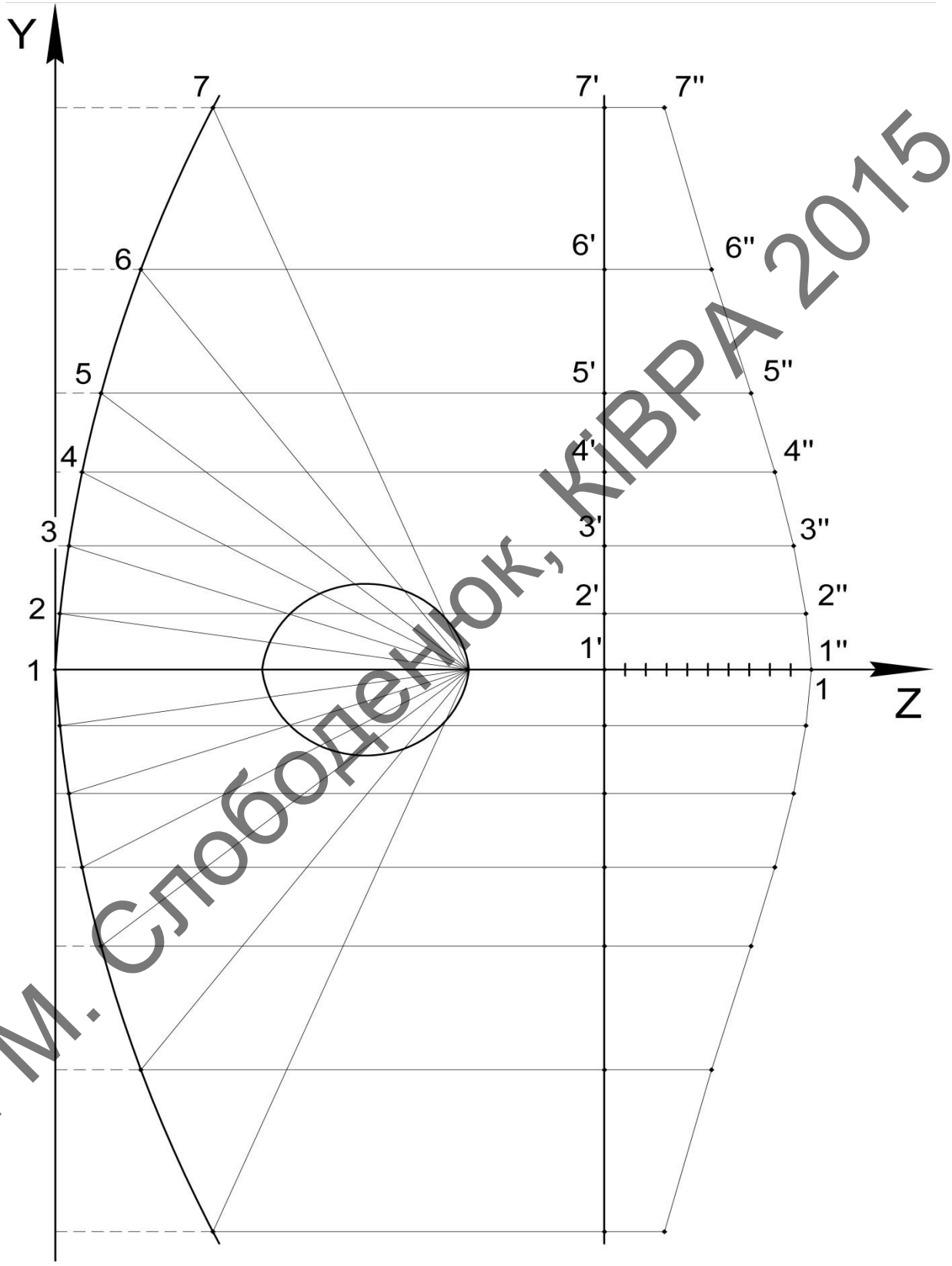
Розподіл поля відбитого від параболічного циліндра зображено на рис. 2.8.

При аналізі параболічних дзеркал зручно одночасно використовувати різні системи координат, переходячи в процесі аналізу від однієї до іншої, більш зручною для подальших розрахунків. Такими системами координат є:

1. Прямокутна X,Y,Z з початком у вершині параболоїда і віссю Z, що збігається з віссю його обертання. Рівняння поверхні дзеркала в цій системі координат має вигляд
$$x^2 + y^2 = 2pz .$$
2. Циліндрична система R,ξ,Z. Тут R і ξ - полярні координати, відлічувані в площині Z=const. Кут ξ відлічується від площини XOZ. Рівняння параболоїда в цих координатах буде $R^2 = 2pz$.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Циліндричну систему координат зручно використовувати при визначенні координат точок витоку (тобто точок джерел поля).



А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Рисунок 2.8. Розподіл поля від параболічного циліндра.

Поверхня, обмежена кромкою параболоїда і площиною $z = z_0$, називається розкривом дзеркала. Радіус R_0 цієї поверхні називається радіусом розкриву. Кут $2\psi_0$, під яким видно дзеркало з фокусу, називається кутом розкриву дзеркала.

Форму дзеркала зручно характеризувати або відношенням радіусу розкриву до подвійної відстані (параметру параболоїда) $\frac{R_0}{2f} = \frac{R_0}{P}$, або величиной половини розкриву ψ_0. Дзеркало називають дрібним, або довгофокусним, якщо, глибоким, або короткофокусним, якщо $\psi_0 > \pi/2$.

Відповідність позначок (параметрів дзеркала) приведена на рис.2.9.

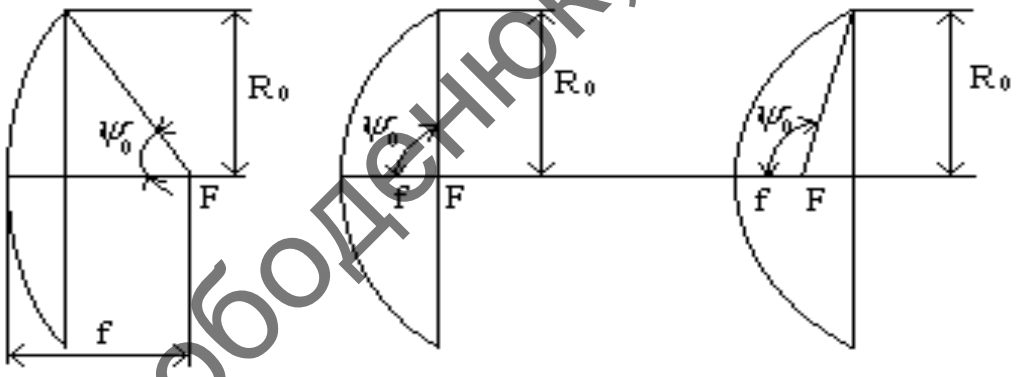


Рисунок 2.9. Характерні параметри параболічних дзеркал

2.4 Визначення поля в розкриві параболічного дзеркала

Поле в розкриві визначається методом геометричної оптики. Завжди виконується умова $f >> \lambda$, отже, дзеркало в дальній зоні і падаючу від опромінювача хвилю на ділянці від фокусу до поверхні дзеркала можна вважати сферичною [46].

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

У сферичній хвилі амплітуда поля змінюється обернено пропорційно $1/\rho$. Після відбиття від поверхні дзеркала хвиля стає плоскою і амплітуда її до розкриву дзеркала з відстанню не змінюється. Таким чином, якщо нам відома нормована діаграма спрямованості опромінювача $F(\psi)$, поле в розкриві дзеркала легко знаходиться.

Для зручності розрахунків введемо нормовану координату точки в розкриві дзеркала

$$R' = \frac{R}{R_0} = \frac{\rho \sin\psi}{\rho \sin\psi_0}.$$

Підставами значення ρ і ρ_0

$$\rho = \frac{2f}{1+\cos\psi} = \frac{1}{\cos^2(\psi/2)}$$

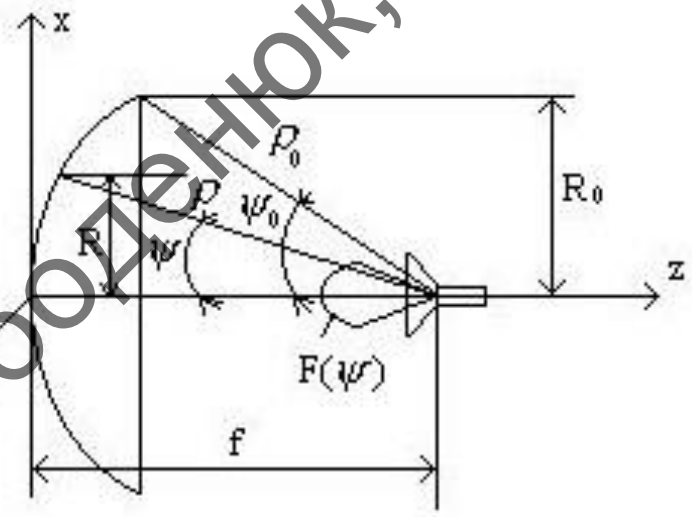


Рисунок 2.10. Поле в розкриві параболоїдного дзеркала

у виразі для R', після елементарних перетворень отримуємо

$$R' = \operatorname{ctg}\frac{\psi_0}{2}\operatorname{tg}\frac{\psi}{2}.$$

Очевидно, що ψ і R' змінюється в межах $0 \le \psi \le \psi_0; 0 \le R' \le 1$.

Нормоване значення амплітуди поля в розкриві визначиться виразом

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

$$F(R') = \frac{f}{\rho} F(\psi).$$

Підставами в останню формулу значення ρ, отримаємо остаточне

$$F(R') = \frac{1+\cos\psi}{2} F(\psi).$$

Отримана формула є розрахунковою. З неї видно, що амплітуда поля в розкриві дзеркала залежить тільки від радіальної координати R'. Така осьова симетрія у розподілі поля з'явилася наслідком допущення, що діаграма спрямованості опромінювача є функцією тільки полярного кута ψ і не залежить від азимутального кута ξ, хоча ця залежність звичайно виражена слабо. Внаслідок цього в більшості випадків можна обмежитися розрахунком розподілу поля в розкриві тільки уздовж двох головних взаємно перпендикулярних напрямків: паралельного осі X і осі Y. Система координат X, Y, Z орієнтується так, щоб ці напрямки лежали в площині вектора $\vec{E}$ (площина XOZ) і вектора $\vec{H}$ (площина YOZ). Для цих площин потім і розраховується поле випромінювання і діаграма спрямованості антени. Розрахунок ведеться в припущенні, що поле в розкриві залежить тільки від радіальної координати R', а діаграма спрямованості опромінювача при розрахунку в площині вектора $\vec{E}$ є $F_E(\psi)$, а при розрахунку в площині вектора $\vec{H}$ є $F_H(\psi)$.

Таким чином, розподіл поля в площині вектора $\vec{E}$ буде дещо відрізнятися від розподілу в площині $\vec{H}$, що суперечить прийнятій залежності розподілу поля тільки від радіальної координати. Однак внаслідок невеликого відмінності між функціями $F_E(\psi)$ і $F_H(\psi)$ прийняті допущення не приводять до істотних погрішностей в розрахунках і в теж час дозволяють врахувати відмінності в діаграмі спрямованості опромінювача в площинах $\vec{E}$ і $\vec{H}$. З рис. 2.10. видно, що найбільш інтенсивно опромінюється центр дзеркала, а поле до його країв по амплітуді падає внаслідок зменшення

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

значення $F(\psi)$ і збільшення ρ зі збільшенням ψ. Типовий розподіл нормованої амплітуди поля в розкриві параболічного дзеркала показано на рис. 2.11 :

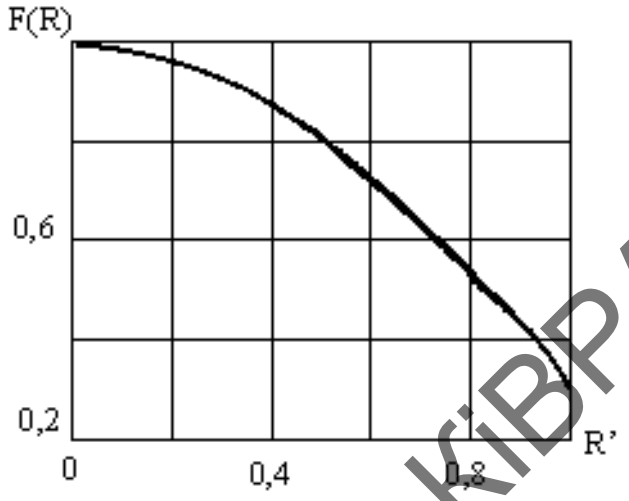


Рисунок 2.11. Типовий розподіл нормованої амплітуди поля в розкриві параболічного дзеркала

Для спрощення подальших розрахунків знайдене значення доцільно апроксимувати інтерполяційним поліномом

$$Q(R') = \sum_{n=0}^{m} a_n \left(1 - R'^{l}\right)^{n} .$$

Цей поліном добре апроксимує фактичний розподіл поля в розкриві параболоїда і для знаходження поля випромінювання при такій апроксимації не буде потрібно громіздких обчислень. Випромінювання круглого майданчика з розподілом поля на її поверхні, що визначаються, вже було розглянуто вище [47]. Вузлами інтерполяції, тобто точками, де поліном $Q(R')$ збігається з раніше знайденою функцією $F(R')$, будемо вважати точки розкриву дзеркала, відповідні значенням R': $R' = 0, R'_1, R'_2, ..., R'_n, ..., 1$. Тоді коефіцієнти полінома визначається з системи рівнянь:

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

$$a_0 + a_1 + \ldots + a_m = 1;$$
$$a_0 + a_1\left(1 - R'^2_1\right) + \ldots + a_m\left(1 - R'^2_1\right)^m = F\left(R'_1\right);$$
$$a_0 + a_1\left(1 - R'^2_2\right) + \ldots + a_m\left(1 - R'^2_2\right)^m = F\left(R'_2\right);$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$a_0 = F(1).$$

На цьому рішення задачі визначення поля в розкриваючи параболоїда можна вважати закінченим.

При інженерних розрахунках для спрощення обчислень зазвичай можна обмежитися трьома членами полінома, тобто покласти m = 2. Тоді

$$Q(R') = a_0 + a_1\left(1 - R'^2\right) + a_2\left(1 - R'^2\right)^2.$$

В цьому випадку в якості вузлів інтерполяції беруть точки в центрі розкриву дзеркала $(R' = 0, \psi = 0)$, на краю дзеркала $(R' = 1, \psi = \psi_0)$ і приблизно в середині між цими крайніми точками $\left(R'_1 = 0.5, \psi_1 = 0.5\psi_0\right)$. Коефіцієнти цього полінома визначаються системою рівнянь:

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1;$$
$$a_0 + a_1\left(1 - R'^2_1\right) + a_2\left(1 - R'^2_1\right)^2 = F\left(R'_1\right);$$
$$a_0 = F(1).$$

Відносна похибка, яка визначає відхилення полінома від заданої функції $F(R')$, може бути обчислена за формулою

$$\delta = \frac{Q(R') - F(R')}{F(R')}.$$

Розрахунки показують, що в багатьох випадках вже при трьох членах полінома відносна похибка не перевищує 1-2 %. Якщо потрібна велика точність, слід брати більше число членів полінома.

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

Висновки до розділу

1. Приведено принцип побудови трьох варіантів мікрохвильових установок для сушіння сипучих діелектричних матеріалів з концентрацією енергії електромагнітного поля в активній зоні від декількох (більше двох) джерел (магнетронів).

2. Для формування фронту хвилі і закону розподілу напруженості електричного поля (щільності енергії) по фронту хвилі в ближній зоні використовуються дзеркальні або лінзові пристрої. Так як активна камера має осьову симетрію N порядка, то дзеркальні відбивачі і прохідні лінзи мають циліндричну форму (коловий циліндр, параболічний циліндр, еліптичний циліндр і, відповідно, циліндричні лінзи).

3. Форма дзеркал і лінз в поперечному перетині впливає на розподіл напруженості електричного поля (щільності потужності) в поперечній площині фронту хвилі. Підбираючи форму дзеркала або необхідної лінзи можно досягти зазначеного розподілу енергії в поперечному перетині активної камери при відомій характеристиці спрямованості опромінювача (першоджерело електромагнітної хвилі).

4. Для можливості розрахунків розподілу напруженості електричного поля в розкриві дзеркала в наступних розділах розглянуто теорію параболічних дзеркал і розрахунків основних параметрів їх.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

3 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ОПРОМІНЮЧИХ СТРУКТУР

3.1 Побудова опромінюючої структури

Щілинна антена - антена, виконана у вигляді металевого радіохвилеводу, жорсткої коаксіальної лінії, об'ємного резонатора або плоского металевого листа (екрана), в провідній поверхні яких прорізані отвори (щілини), що служать для випромінювання радіохвиль. Випромінювання відбувається в результаті збудження щілин внутрішнім електромагнітним полем. Щілинні антени відрізняються порівняльною простотою конструкції; в них можуть бути відсутні виступаючі частини, що в ряді випадків є їх важливою перевагою. В нашому випадку це і є головною перевагою, оскільки вона має просту конструкцію, її легко розмістити і , у випадку поломки, замінити у сушарці.

Розрізняють антени резонансні, нерезонансні і антени з узгодженими щілинами. У резонансних антенах відстань між сусідніми щілинами становить λв (рис. 3.1а- випадок синфазно-пов'язаних щілин з полем хвилеводу) або становить λв / 2 (рис. 3.1Б- випадок перемінnофазно пов'язаних щілин з полем хвилеводу), де λв – довжина хвилі в хвилеводі. Таким чином, резонансні антени є одночасно синфазними і, отже, напрям максимального випромінювання збігається з нормаллю до осі антени. Синфазне збудження поздовжніх щілин, розташованих по різні сторони щодо середньої лінії при d = λв / 2, забезпечується за рахунок додаткового зсуву по фазі на 180° в силу протилежних напрямків поперечних струмів по обидва боки від середньої лінії широкої стінки хвилеводу. У разі похилих щілин на боковій стінці додатковий зсув на 180° виходить за рахунок зміни знака кута нахилу щілини δ. Отже, результуючий зсув по фазі сусідніх випромінювачів в обох випадках виявляється рівним 360° або 0°, незалежно від типу навантаження на кінці антени. Антени розглянутого типу можуть бути добре узгоджені з живильної лінією у вельми вузькій смузі частот. Дійсно, так як кожна щілина окремо не узгоджена з хвилеводом, то все відбиті від щілин

А.М. Спододенюк, КІВРА 2015

хвилі складаються на вході антени синфазно і коефіцієнт відбиття системи стає великим. Очевидно, що це неузгодженість можна компенсувати на вході антени за рахунок якого-небудь елементу настройки, але так як вже при малих змінах частоти узгодження порушується, то антена залишається дуже вузькосмуговою. Тому в більшості випадків відмовляються від синфазного збудження окремих щілин і вибирають відстань між ними $\lambda в / 2 < d < \lambda в$. Характерною особливістю одержуваної таким чином нерезонансних антени є більш широка смуга частот, в межах якої має місце гарне узгодження, так як окремі відображення при великому числі випромінювачів приблизно компенсуються. Однак відмінність відстані між щілинами від $\lambda в / 2$ призводить до несинфазного збудженню щілин падаючої хвилею і напрям головного максимуму випромінювання відхиляється від нормалі до осі антени. Для усунення відбиття від кінця антени встановлюють поглинаючу навантаження.

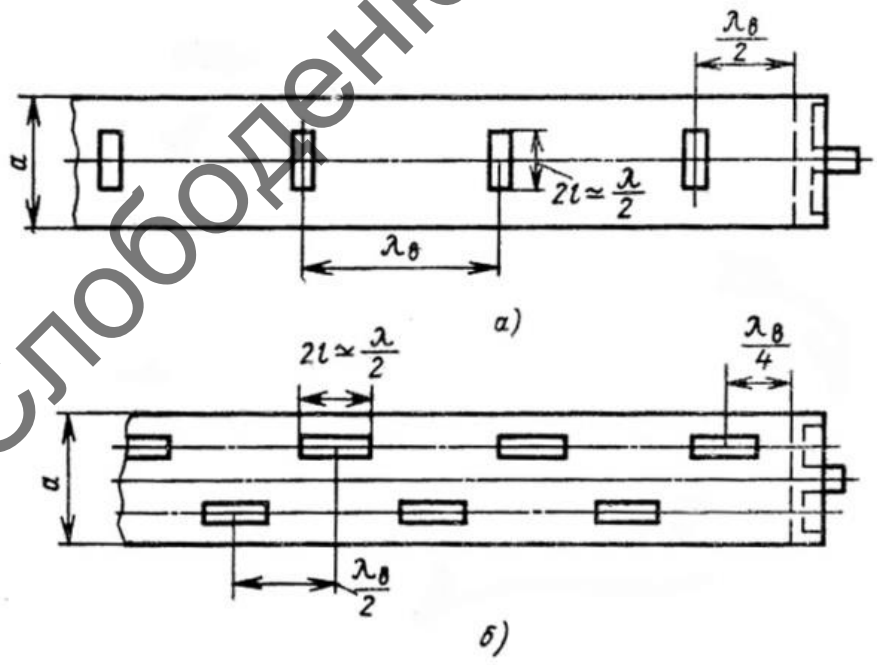


Рисунок 3.1. Резонансна антена: а - з поперечними щілинами; б - з поздовжніми щілинами.

На рис. 3.2 показані схеми нерезонансних антен з синфазним зв'язком щілин з полем хвилеводу (рис. 3.2 а, б) і з перемінофазним зв'язком (рис. 3.2

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

в, г), причому щілини прорізані як у широкій, так і у вузькій стінках хвилеводу. У всіх випадках фазовий розподіл уздовж антени можна вважати лінійним, якщо взаємодія випромінювачів як по внутрішньому, так і по зовнішньому простору не враховується. Якщо щілинні антени, показані на рис. 3.2 а, б, в, мають поле випромінювання тільки основний поляризації, то антени з похилими щілинами у вузькій стінці (рис. 3.2 г) мають ще й поле паразитної поляризації.

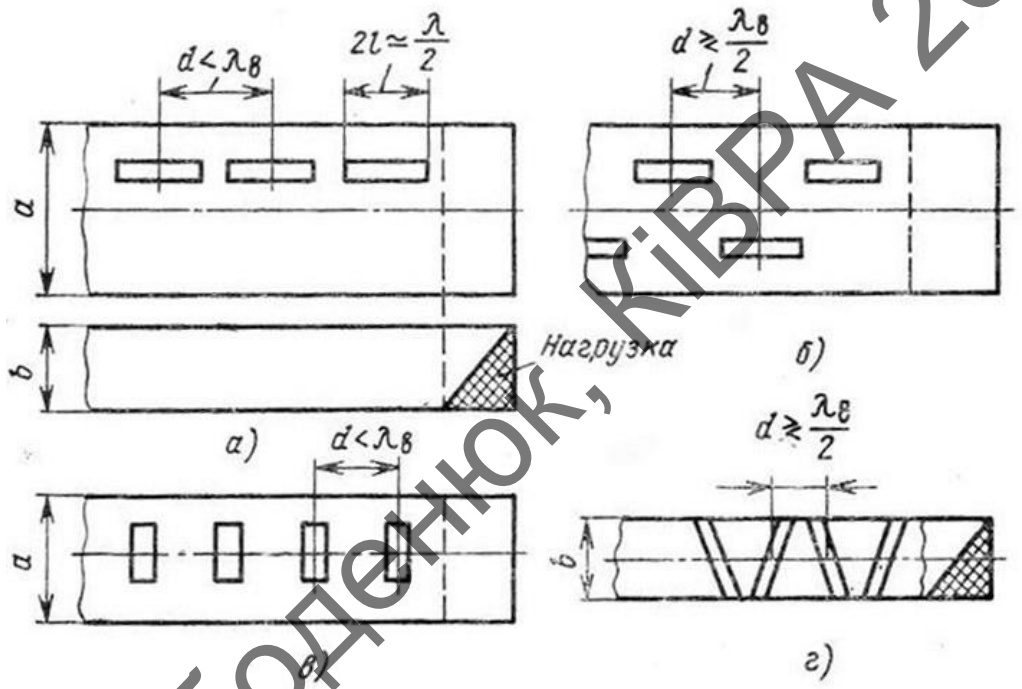


Рисунок 3.2. Схеми нерезонансних хвилевідно-щілинних антен

У антенах з узгодженими щілинами кожна щілина (поздовжня, поперечна або похило-зміщена) окремо погоджена з хвилеводом за допомогою реактивного вібратора або діафрагми, і не викликає віддзеркалень. Отже, в таких антенах з поглинаючим навантаженням встановлюється режим біжучої хвилі. На рис. 3.3 показана, наприклад, схема антени з похило-зміщеними узгодженими щілинами на широкій стінці хвилеводу. Такі антени характеризуються двома геометричними параметрами: зміщенням x_1 і кутом повороту δ, за допомогою яких можна регулювати незалежно амплітуду і фазу поля, випромінюваного щілиною. У таких антенах гарне узгодження з живильним хвилеводом виходить в

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

широкій смузі частот (5-10)%. У разі похило-зміщених щілин на широкій стінці хвилеводу підбором кута нахилу δ і зміщення x_1 домагаються того, щоб нормована активна провідність хвилеводу в перетині щілини дорівнювала одиниці.

При істотній зміні частоти антена також залишається узгодженої з живильним хвилеводом, оскільки антена перетворюється на нерезонансну. Відстань між узгодженими випромінювачами в разі решітки з перемінnофазно пов'язаними щілинами вибирається зазвичай рівним λв / 2 на номінальній частоті. Напрямок максимального випромінювання при цьому перпендикулярно осі хвилеводу.

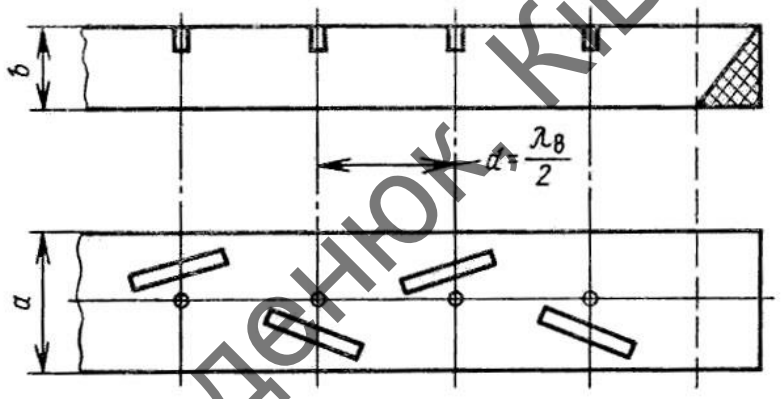


Рисунок 3.3. Щілинна антена з похило-зміщеними узгодженими щілинами.

Найбільший практичний інтерес представляють узгоджені похило-зміщені щілини, при застосуванні яких відсутній взаємний вплив випромінювачів по основній хвилі.

3.2 Представлення опромінюючої структури при однакових розмірах елементів

Для того щоб зменшити час розробки і не витрачати попусту матеріал для створення опромінюючої структури, оскільки не відомо який вийде результат, проектування проводиться в програмі AnSoft HFSS.

А. М. Слободенюк. КІВРА 2015

3.2.1 Опис програми проектування AnSoft HFSS

Програма High Frequency System Simulator (HFSS) компанії AnSoft (рис.3.4) призначена для аналізу тривимірних НВЧ структур, в тому числі, антен і взаємних пристроїв, що містять ферити. Серед можливостей Ansoft HFSS можна відзначити:

- підпрограму аналізу власних коливань і власних хвиль (eigenmode solver);
- нові можливості візуалізації результатів аналізу, зокрема, анімації картин поля, побудова тривимірних діаграм спрямованості і т.д .;
- адаптивний алгоритм вирішення електродинамічних задач, що забезпечує високу ефективність моделювання складних структур;
- можливість аналізу багатополюсників з багатомодовими портами;
- великі бази даних по СВЧ матеріалами і СВЧ компронентам;
- можливість параметричного аналізу та оптимізації параметрів структури.

Електродинамічне моделювання в HFSS грунтується на використанні методу скінченних елементів (Finite Element Method, FEM). Рішення граничної задачі шукається в частотній області. Використання методу скінченних елементів забезпечує високий ступінь універсальності чисельних алгоритмів, які виявляються досить ефективними для широкого кола завдань від аналізу хвилевідних і полоскових структур до моделювання антен і складних невзаємних пристроїв, що містять гіротропні середовища.

Процес проектування за допомогою HFSS включає в себе ряд стандартних кроків:

1. Створення моделі аналізованої структури, в тому числі:
   - створення тривимірної графічної моделі структури (креслення);
   - завдання параметрів матеріалів, з яких складається структура.

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

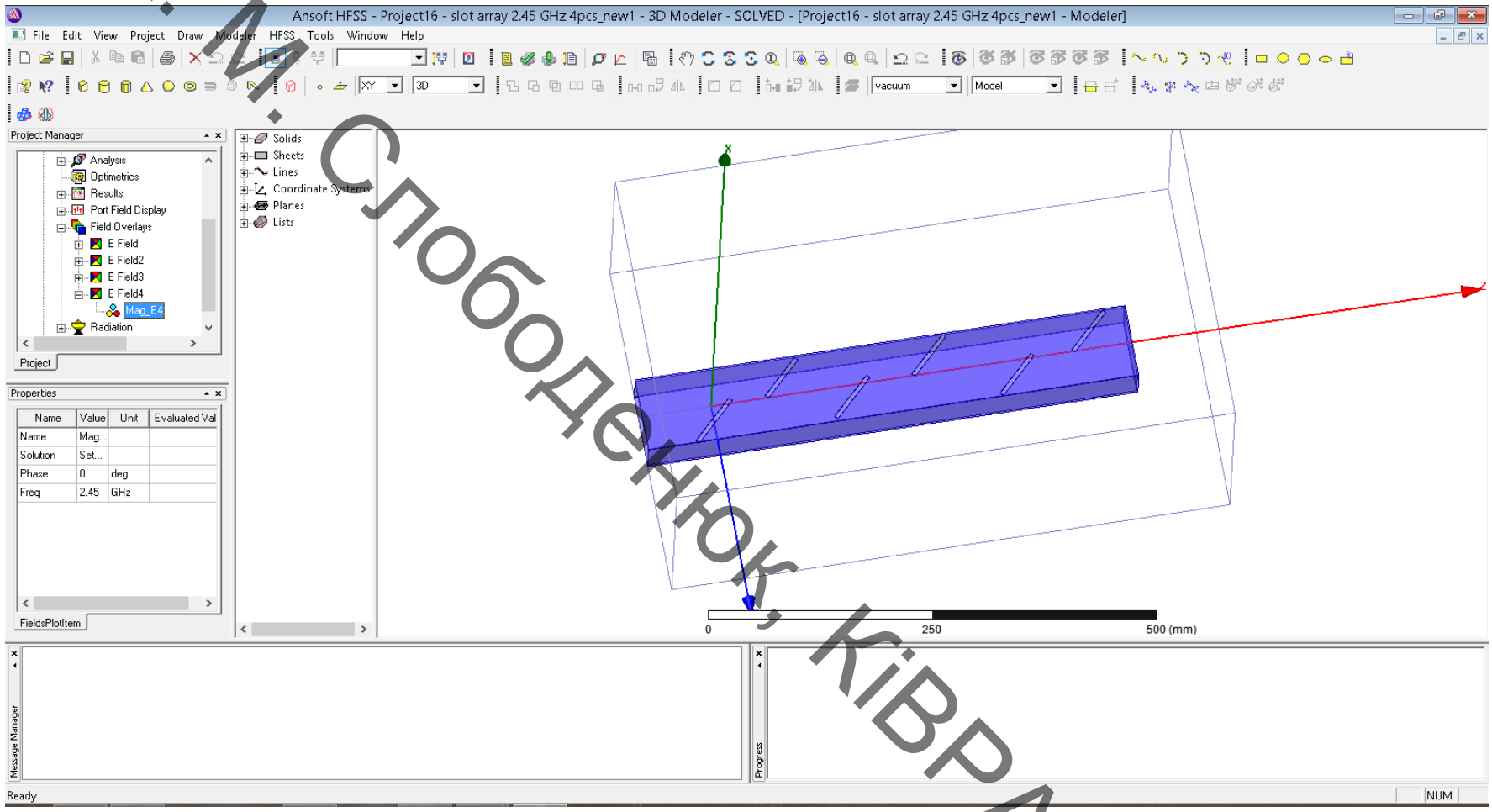


Рисунок 3.4. Інтерфейс програми HFSS.

А.М. Слободенюк, КіВРА 2015

2. Визначення електродинамічних параметрів структури, що включає:
   - завдання граничних умов на поверхнях, які формують аналізований об'єкт;
   - визначення та калібрування портів;
   - завдання параметрів рішення.
3. Електродинамічний аналіз досліджуваного об'єкта, у тому числі:
   - аналіз об'єкта в смузі частот;
   - параметричний аналіз об'єкта;
   - параметрична оптимізація об'єкта.
4. Візуалізація результатів електродинамічного аналізу, що включає:
   - побудова графіків в декартових, полярних координатах, діаграм Сміта, діаграм спрямованості і т.д .;
   - анімація розподілів електромагнітного поля та електричного струму;
   - збереження результатів аналізу в файлах даних.

3.2.2 Результати розрахунків

Була спроектована опромінююча структура з однаковими розмірами щілин і відстанню між ними, що становить λв / 2, при частоті 2.45 ГГц (рис 3.5).

Перед проектуванням випромінювача виконувались попередні оцінки необхідної кількості щілин при відомих розмірах хвилевода і відстані між щілинами, яка приблизно дорівнює λ_g / 2. Відповідно, для забезпечення потоку ЕМ-енергії щільністю 400—600 Вт/дм^3 при живленні від генератора потужністю 800—1000 Вт необхідно від 3 до 6 щілин.

Усі щілини орієнтовані під кутом 45° до осі хвилевода, оскільки при такому куті зменшується спотворення діаграми направленості. Ширина щілини повинна забезпечувати роботу випромінювача при заданому рівні

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

потужності, витримуючи створену на її кромках напругу без виникнення пробою.

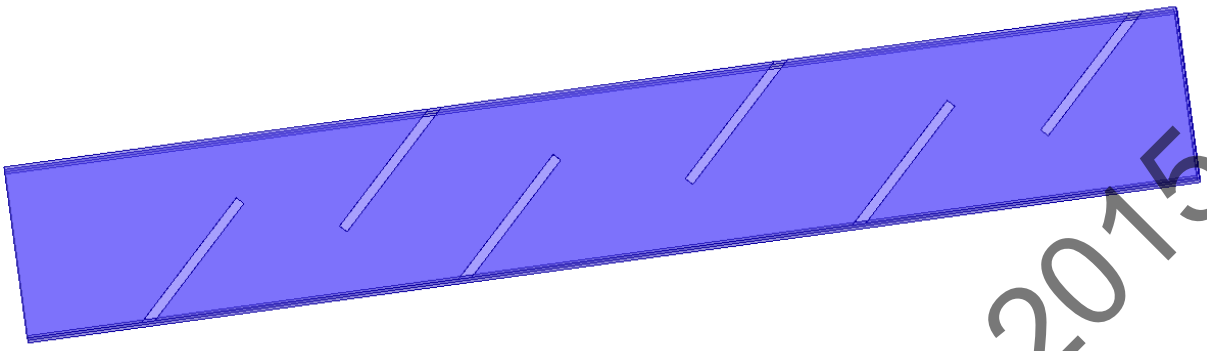


Рисунок 3.5. Опромінююча структура.

Напруга на щілині визначається як

$$U_{щ} = \sqrt{2\frac{P_{щ}}{G_{щ}}}, \qquad (3.1)$$

де $P_{щ}$ — випромінювана щілиною потужність, $G_{щ}$ — провідність випромінювання щілини. $G_{щ}$ може бути визначена через відповідний опір випромінювання симетричного вібратора $R_{в}$ завдяки принципу двоїстості

$$G_{щ} = \frac{R_{в}}{2(60\pi)^2}, \qquad (3.2)$$

де опір випромінювання вібратора визначається виразом

$$R_{в} = 60\int_{0}^{\pi}\frac{(\cos(kl\cos\theta) - \cos kl)^2}{\sin\theta}d\theta, \qquad (3.3)$$

видно, що опір випромінювання визначається електричною довжиною вібратора (щілини). Таким чином, оскільки при синтезі решітки розглядаються щілини довжиною від 0,45 до 0,55 довжин хвилі, опір випромінювання щілини може змінюватись у межах приблизно від $1{,}4\cdot10^{-3}$ См до $3\cdot10^{-3}$ См. При чотирьохщілинному випромінювачі і потужності генератора 1000 Вт $U_{щ}$ буде становити приблизно 470—680 В. За нормальних умов пробивна напруга у повітрі становить 4,5 кВ/мм , і пробивна ширина щілини становитиме 0,15 мм. Відповідно, при ширині 1,5 мм буде забезпечений десятикратний запас електричної міцності.

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

Результати проектування показали, що при однакових розмірах щілин, а саме довжини щілини, змішенням щілини від центра, зміщенням щілини вздовж хвилевода, поле в щілинах не буде синфазне, оскільки різниця між фазами становить 80^{o} (рис.3.6). На рис. 3.7 зображено амплітуди щілин опромінюючої структури з якої видно, що амплітуда поля по довжині хвилевода зменшується і не є рівномірною.

Отже, опираючись на данні результати можна прийти до таких висновків:

- потрібно досягти синфазності всіх щілин;
- досягти рівномірного розподілу поля по всій довжині хвилевода.

Це все досягається зміною довжини щілини, змішенням щілини від центра, зміщенням щілини вздовж хвилевода і відстанню останньої щілини до кінця хвилевода. Зміна довжини щілини впливає на фазу випромінювання і на амплітуду збудження, зміщення від центру - на фазу випромінювання, зміщення вздовж хвилевода - на фазу і амплітуду випромінювання.

3.3 Розрахунок поля опромінюючої структури

Опираючись на результати попереднього розділу і зміною довжини щілини, змішенням щілини від центра, зміщенням щілини вздовж хвилевода і відстанню останньої щілини до кінця хвилевода було створена створена конструкція опромінюючої структури (рис.3.8).

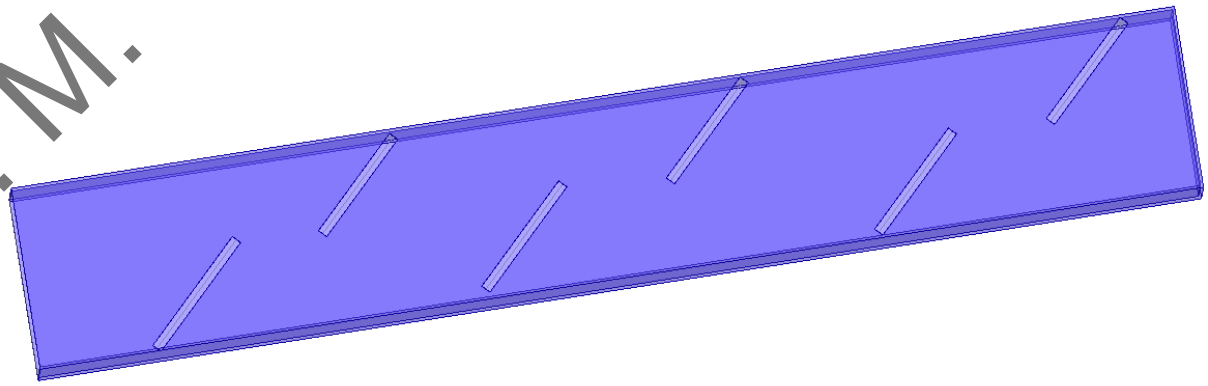


Рисунок 3.8. Конструкція опромінюючої структури.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

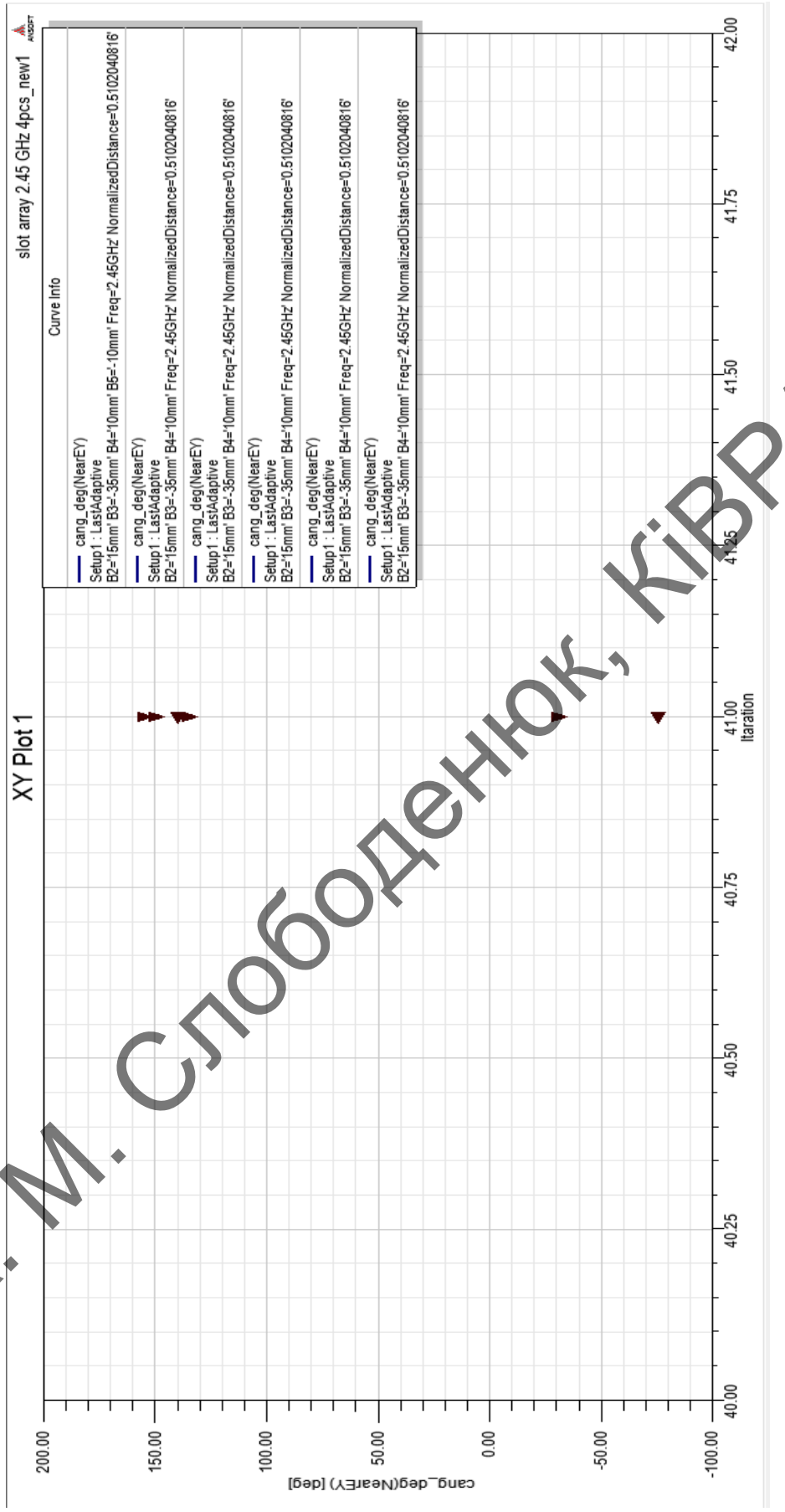


Рисунок 3.6. Фаза щілин опромінюючої структури.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

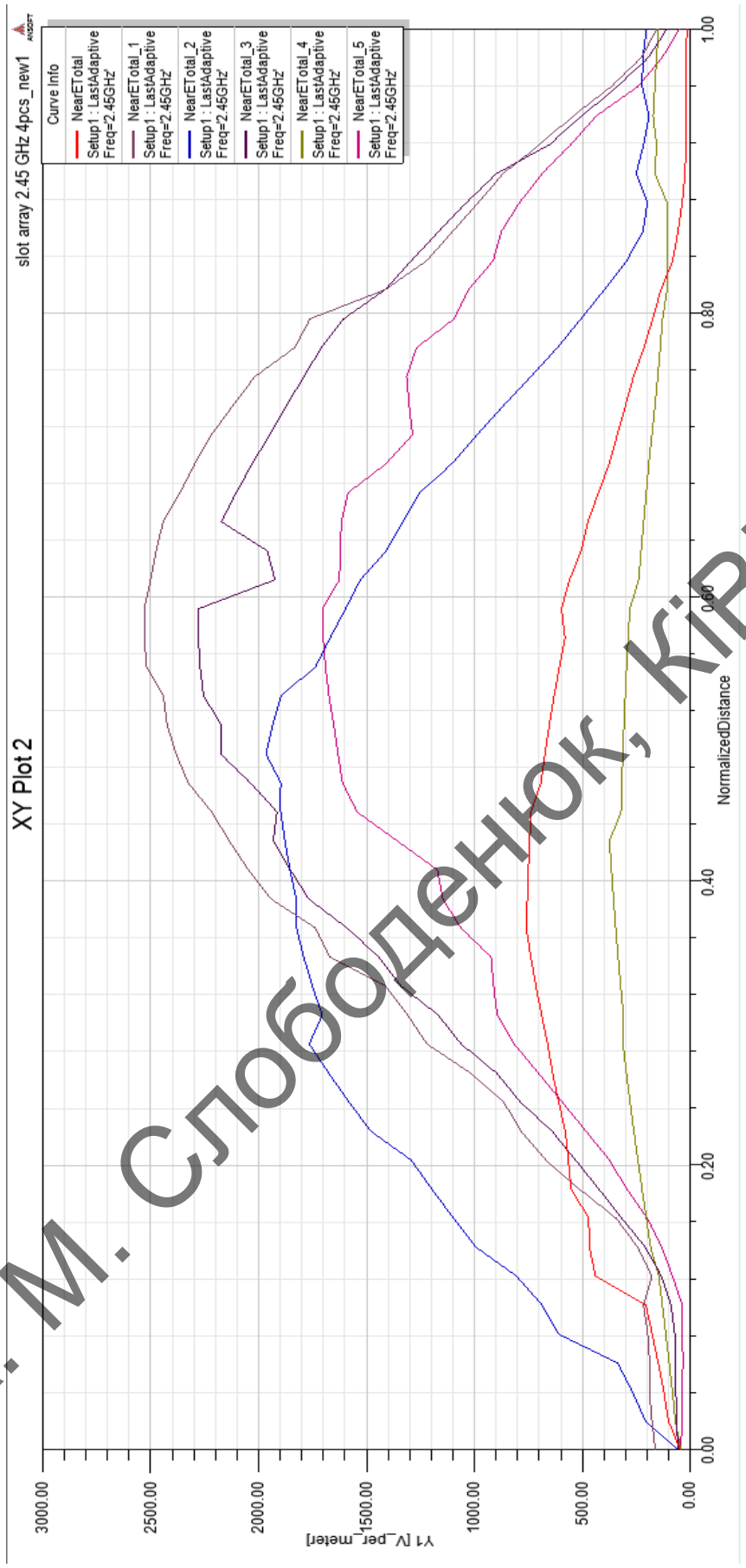


Рисунок 3.7. Амплітуди розподілу поля опромінюючої структури в поперечному перетині

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Було проведено багато ітерацій по зміні параметрів структури для досягнення синфазності у всіх щілинах. Максимальна різниця між фазами становить близько 45° (рис.3.9) і це є допустимим значенням в порівнянні з попереднім розділом, що означає синфазність в усіх щілинах.

На рисунках 3.10 і 3.11 представленні розподіл поля по довжині хвилевода і амплітуди розподілу поля щілин опромінюючої структури, які показують, що поле по всій довжині структури майже одинаковий і якого намагалися досягти. Це вийшло при таких значеннях параметрів структури:

Щілина / Параметр	1	2	3	4	5	6
Довжина щілини	65,2 мм	58,2 мм	63 мм	60,4 мм	60,4 мм	60,4 мм
Відстань від центра до щілини	20 мм	20 мм	17 мм	20 мм	20 мм	20 мм

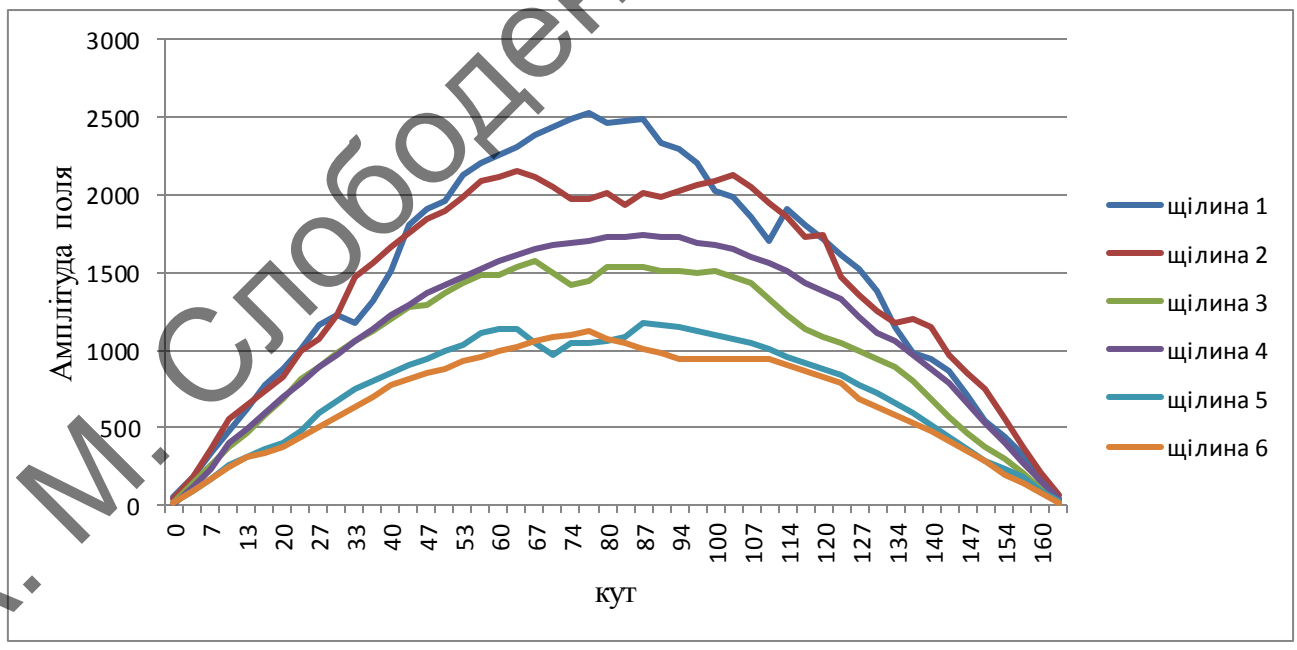


Рисунок 3.11. Амплітуди щілин опромінюючої структури від кута.

Побудовано розподіл поля кожної щілини відбитого від параболічного циліндра рис.3.12 – рис.3.17.

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

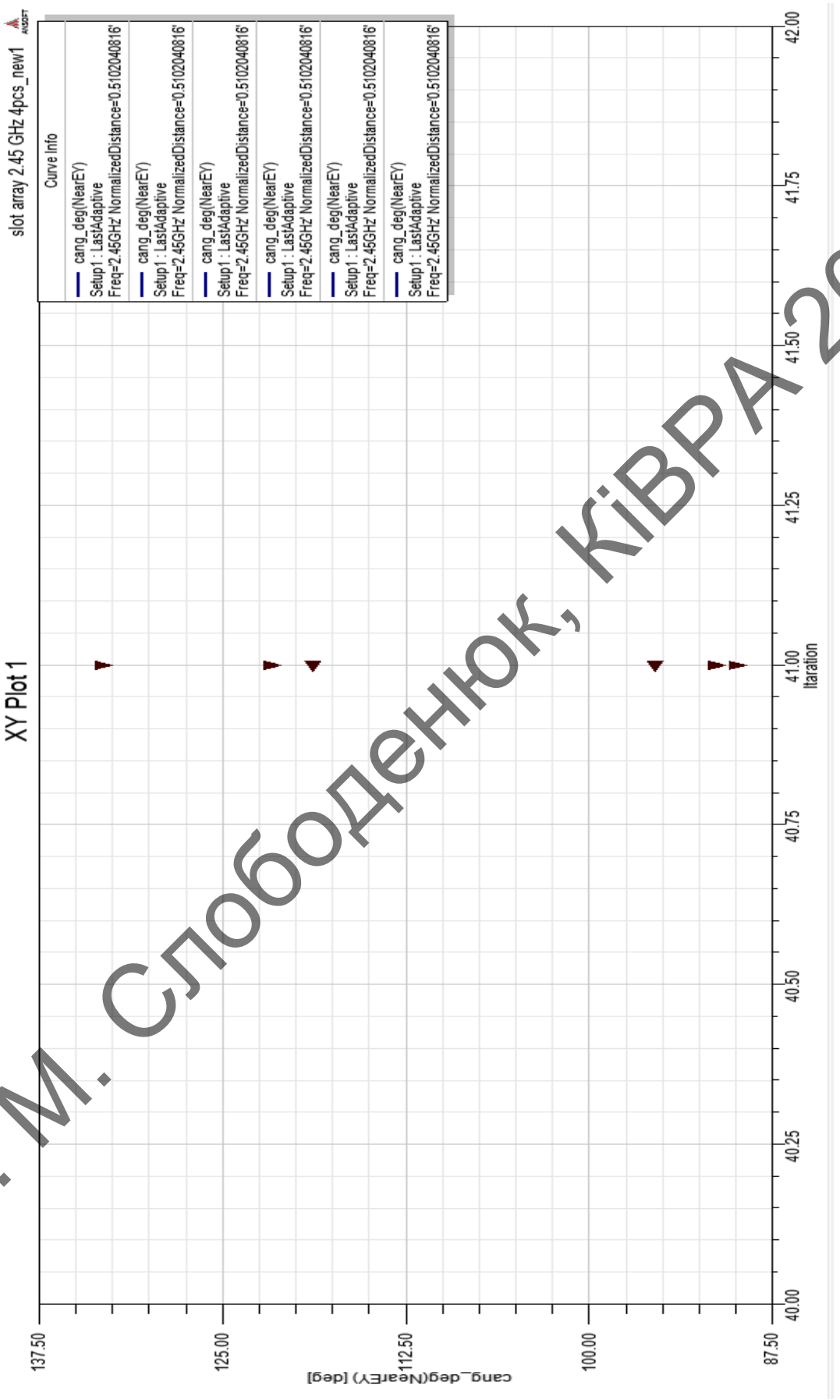


Рисунок 3.9. Фаза щілин опромінюючої структури.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

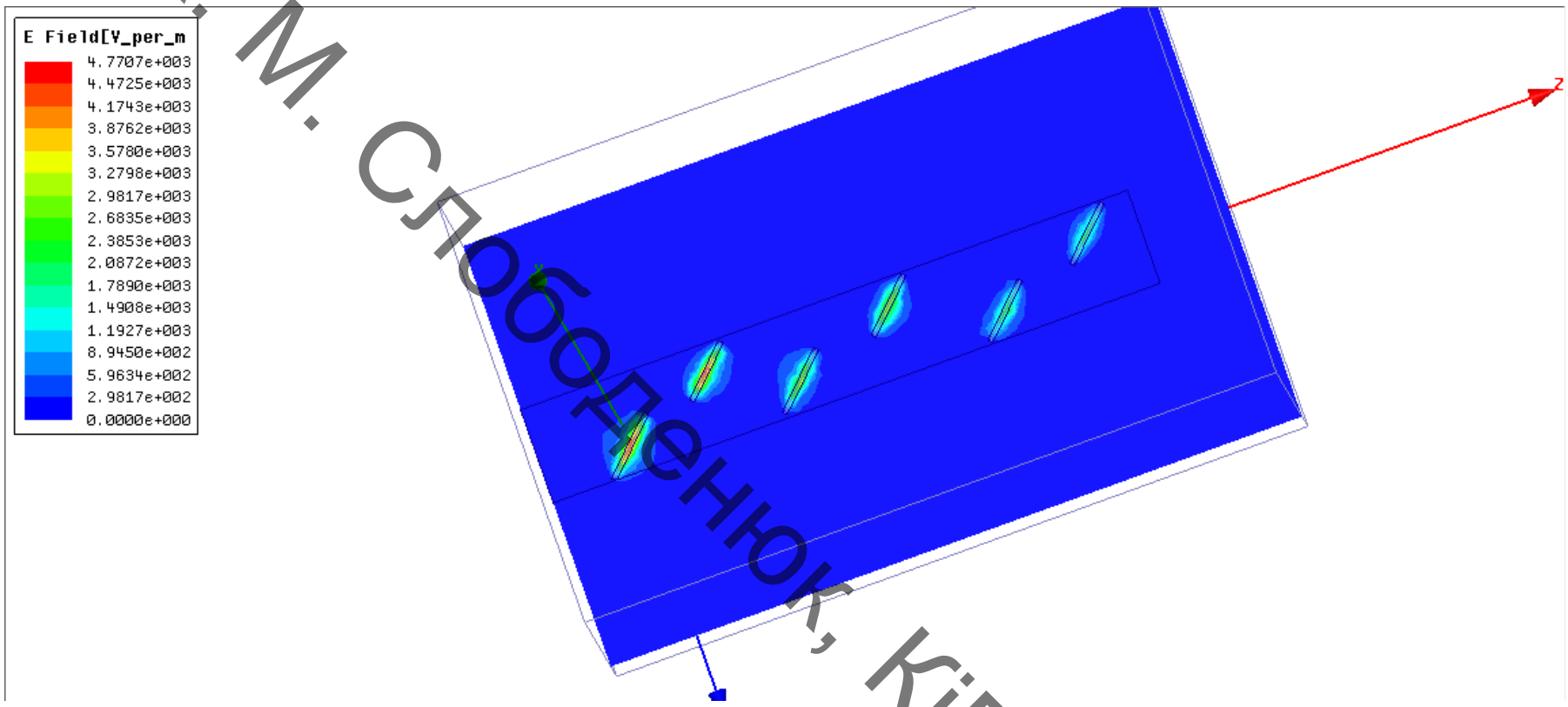
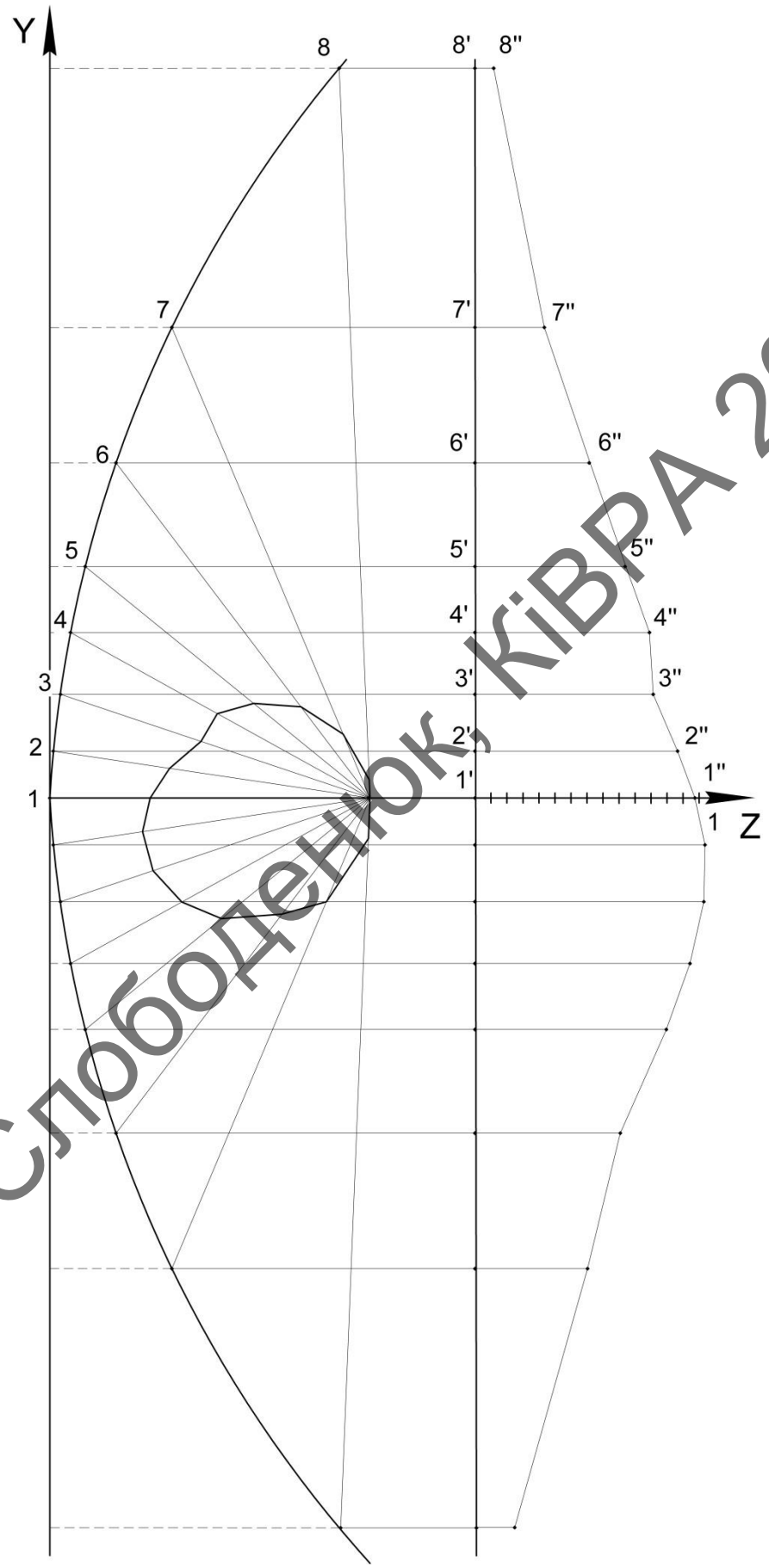


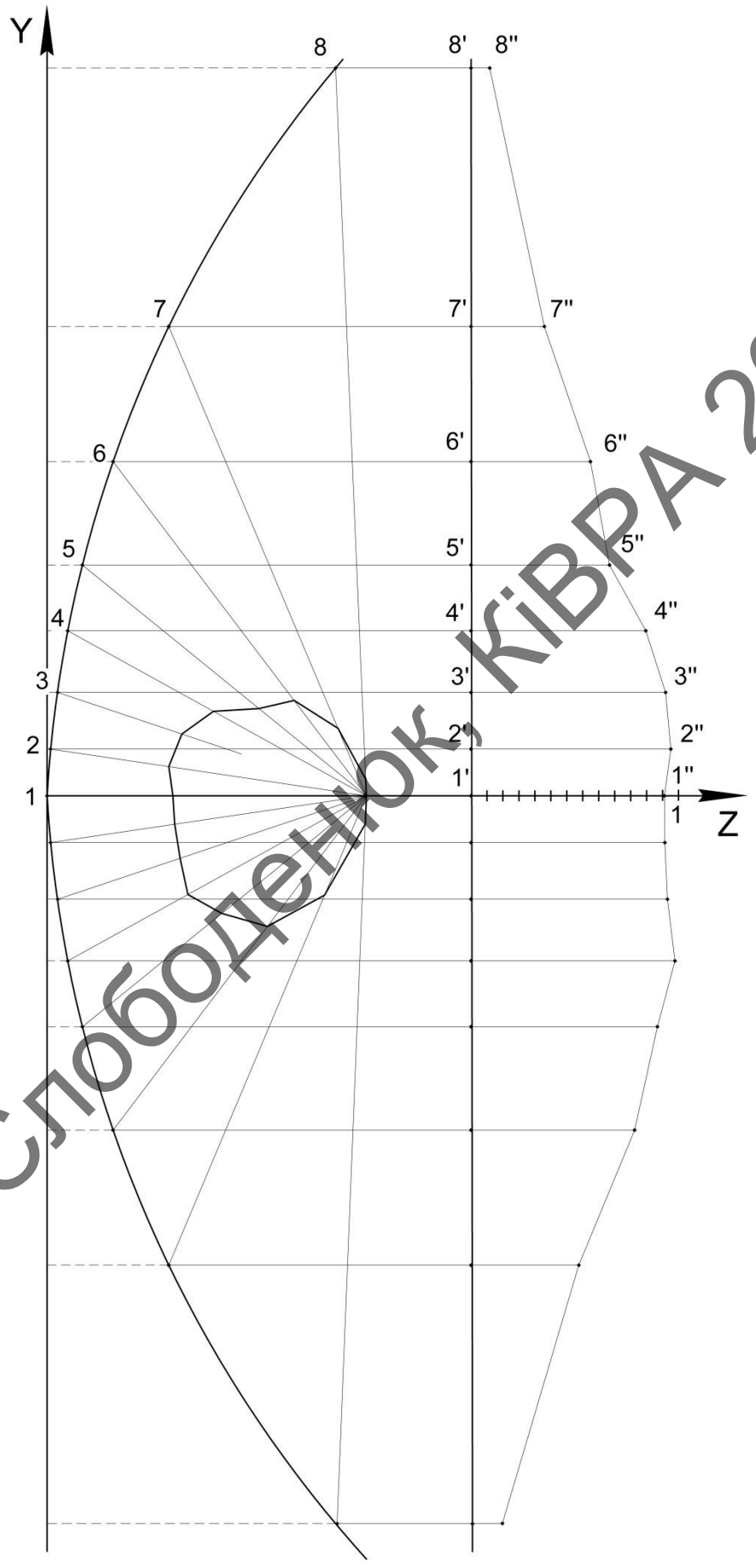
Рисунок 3.10. Розподіл поля опромінюючої структури.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015



А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

Рисунок 3.12. Розподіл поля 1 щілини від параболічного циліндра.



А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

Рисунок 3.13. Розподіл поля 2 щілини від параболічного циліндра.

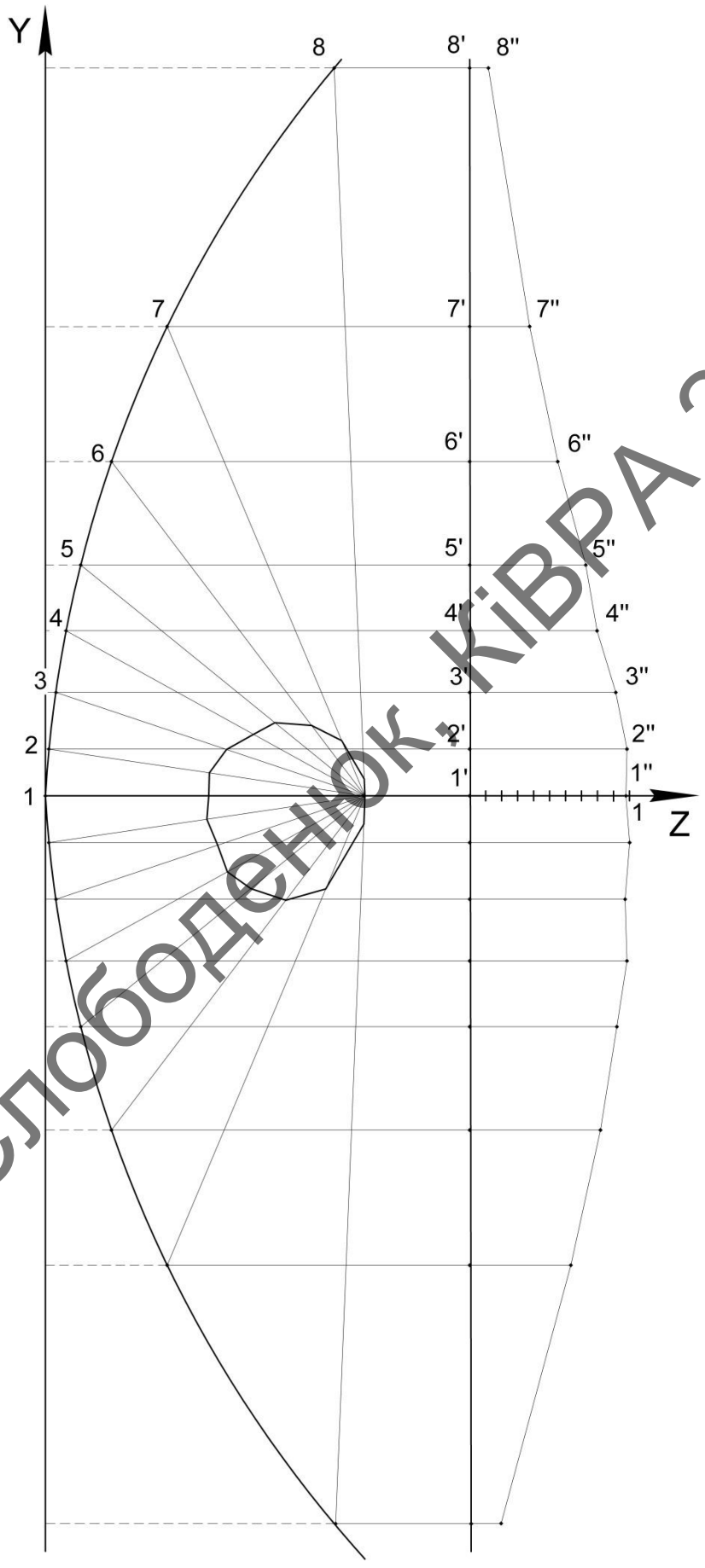
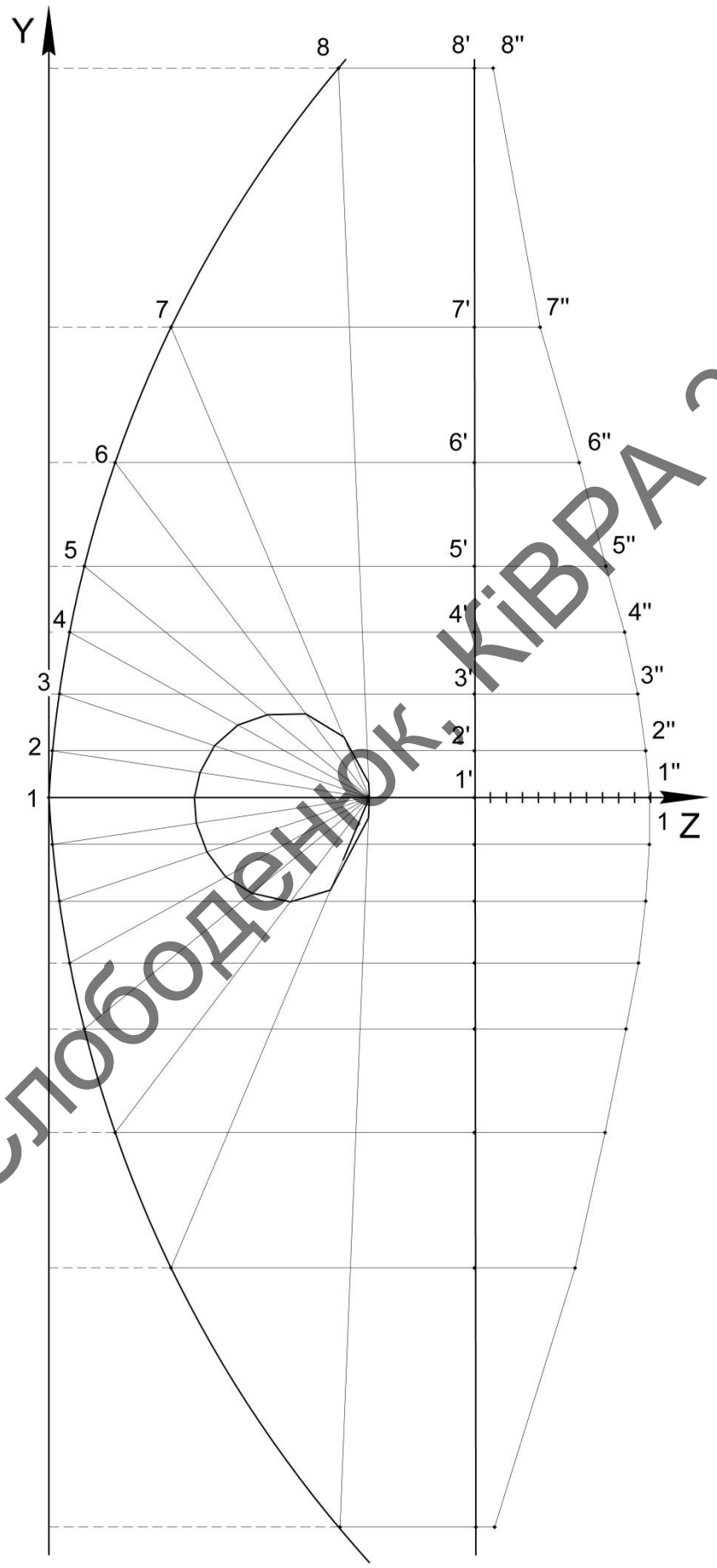


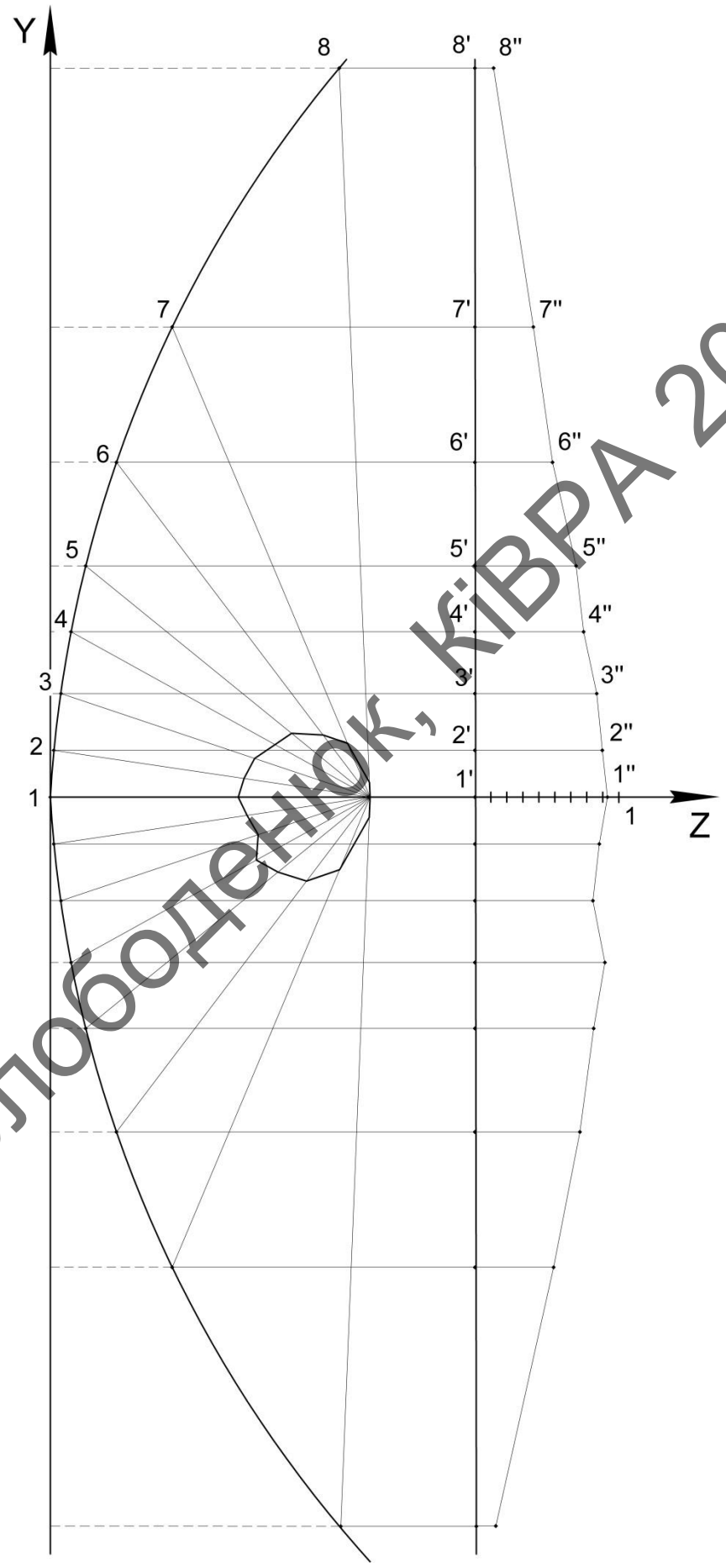
Рисунок 3.14. Розподіл поля 3 щілини від параболічного циліндра.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015



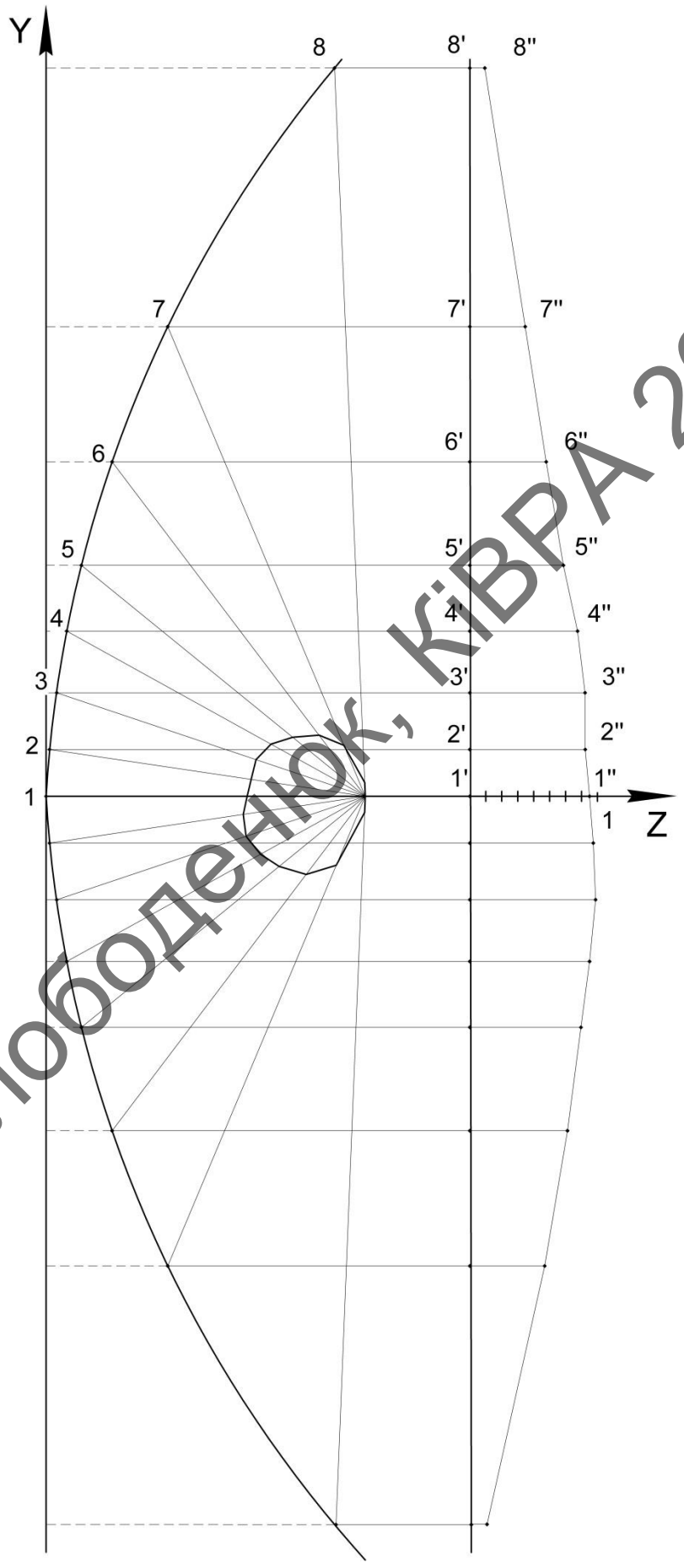
А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

Рисунок 3.15. Розподіл поля 4 щілини від параболічного циліндра.



А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Рисунок 3.16. Розподіл поля 5 щілини від параболічного циліндра.



А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Рисунок 3.17. Розподіл поля 6 щілини від параболічного циліндра.

Висновок до розділу

1. Опромінююча структура є основним вузлом активної камери від якого залежить характер розподілу напруженості електричного поля і відповідно щільності енергії як в поздовжньому (осьовому) напрямку, так і в поперечній площині.
2. В якості первинного випромінювача (опромінювача дзеркала або лінзи) вибрано прямокутний хвилевід з щілинами, розташованими під кутом 45^{o} до осі хвилевода. Така форма щілин обумовлена тим, що поляризація електромагнітної хвилі, що входить в центральну частину активної камери, де розташований об'єкт опромінення, майже повністю відбивається від протилежної стінки камери, так як оболонка центральної частини активної камери виконана як відповідний поляризаційний діелектрик.
3. Так як теоретичний аналіз таких випромінювачів в літературі відсутній, а створення теорії косих випромінюючих щілин в широкій стінці хвилевода досить складна, то для розрахунку обрано існуючу программу AnSoft HFSS.
4. В процесі виконання розрахунків було з'ясовано, що для забезпечення циліндричного фронту хвилі (рівнофазність в напрямку паралельному осі хвилевода) і однорідності розподілу амплітуди напруженості електричного поля в цьому напрямку необхідно змінювати параметри щілин, а саме: довжину щілин, відстань між щілинами, відстань кожної окремої щілини від центра і інших конструктивних параметрів.
5. Виконуючи зміни зазначених вище конструктивних параметрів щілин і проводячи розрахунки параметрів фронту хвилі було досягнуто заданих параметрів фронту електромагнітної хвилі і, відповідно, зафіксовані конструктивні параметри опромінювача.
6. Розраховані таким чином характеристики спрямованості в поперечній площині опромінюючої структури використані для розрахунку розподілу поля в розкриві дзеркальних антен, дзеркала яких мають форму параболічного циліндра.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНОМІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ОПРОМІНЕННЯ СИРОВИНИ У РОБОЧІЙ КАМЕРІ

Використовуючи результати попереднього розділу дослідимо рівномірність та ефективність опромінення сировини у робочій камері. Робоча камера сформована у вигляді замкненого циліндричного відсіку, вздовж якого в центрі розташована циліндрична камера обробки, оточена лінійними решітками випромінювачів НВЧ-енергії. Для забезпеченні максимальної кількості перевідбивань хвилі у межах робочої камери і забезпечення згасання хвилі наша камера повинна бути резонаторною. Резонаторна камера реалізовується у зустрічнорефлекторному та роторефлекторному методах формування електромагнітного поля.

Зустрічнорефлекторний метод базується на основі моделі робочої камери, зображеної на рис. 4.1, *а*, яка у найпростішому випадку сформована двома обмежувальними паралельними екрануючими стінками *5*, і має симетричну будову відносно центральної осі. Вздовж верхньої та нижньої стінок розміщені решітки випромінювальних елементів *1а* та *1б*, які для зменшення рівня взаємодії між собою мають взаємно ортогональні площини поляризації. Решітки випромінювачів відділені від камери обробки (камери опромінення) *2*, у якій відбувається взаємодія сировини з ЕМП, узгоджувальними пластинами *6*, призначеними для зниження рівня хвиль, відбитих від камери обробки. Паралельно до узгоджувальних пластин розміщені поляризаційні дзеркала (ПД) *3*, осі поляризації яких співпадають з поляризацією прилеглих до них випромінювачів. ПД являють собою систему паралельних провідників, що виконують функцію поляризаційного фільтра, пропускаючи хвилі, площина поляризації яких ортогональна до їх осі поляризації.

Сутність представленої моделі полягає у тому, що випромінена джерелом *1* хвиля вільно проходить крізь прилегле до випромінювача ПД,

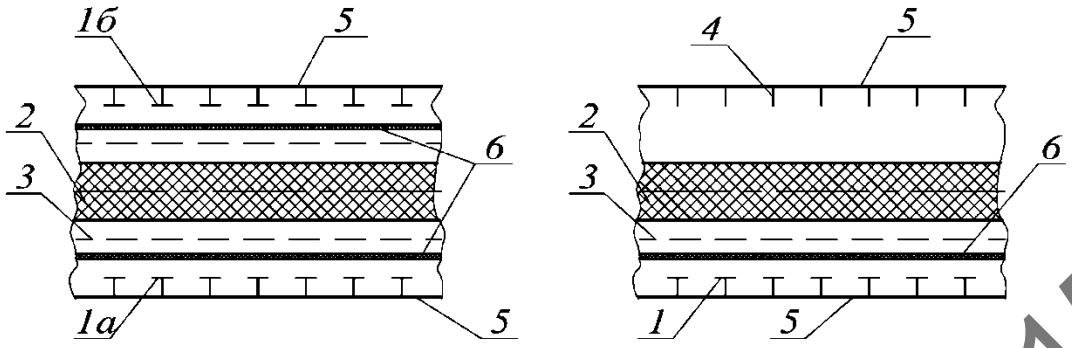
А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

оскільки площина її поляризації перпендикулярна осі поляризації дзеркала, проникає у камеру обробки і віддає їй частину енергії, а пройшовши товщу матеріалу і вийшовши за її межі, хвиля відбивається від протилежного ПД, і відбивається у зворотному напрямі, повторно проходячи крізь матеріал. Таким чином, в описаній моделі електромагнітна хвиля двічі проходить крізь оброблюваний матеріал, що дозволяє певним чином вирівняти профіль розподілу поглинутої у ньому енергії. Однак певну проблему для описаної конфігурації становить те, що відбита від протилежного ПД хвиля є поляризованою у тій же площині, що й падаюча, і, на жаль, сприятиме підвищенню коефіцієнта стоячої хвилі вздовж напряму її поширення, а, відповідно, і нерівномірному розподілу потужності енергії у матеріалі.

Роторефлекторний метод реалізується моделлю, зображеною на рис. 4.1, *б*, яка, як і попередня, складається з екрану *5*, узгоджувальної пластина *6*. Принциповою відмінністю, і елементом удосконалення, порівняно з попередньою моделлю є використання так званого трансполяризаційного відбивача (ТПВ) або роторефлектора, функціонування якого полягає у тому, що площина поляризації хвилі, поляризованої під кутом 45° до осі його поляризації, після відбиття повертається на 90°.

Переваги такої моделі полягають у тому, що після випромінювання решіткою *1* (рис. 4.1, *б*) плоска хвиля, вільно пройшовши крізь поляризаційне дзеркало, проходить камерою опромінення *2*, віддаючи частину енергії, після чого відбивається від роторефлектора *4*, який крім відбивання повертає вектор поляризації хвилі на 90º; як наслідок, при другому проходженні хвилі крізь оброблюваний матеріал не відбувається утворення стоячої хвилі, оскільки коливання хвиль відбувається у ортогональних площинах. Після другого проходження хвилі крізь камеру обробки *2* осі поляризації ПД *3* і падаючої хвилі є взаємно паралельними, і хвиля відбивається назад, проходить камеру обробки, змінює поляризацію на роторефлекторі на початкову, ще раз проходить камерою опромінення.

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015



а *б*

Рисунок 4.1 — Плоскопаралельні моделі робочих камер

Зустрічнорефлекторній камері властивий більш вузький діапазон робочих частот і діелектричних характеристик оброблюваної сировини внаслідок того, що при зміні довжини хвилі у камері обробки *2* погіршуються умови узгодження, і більший рівень енергії повертатиметься назад до джерела ЕМ коливань. При використанні роторефлекторної камери завдяки подвійному проходженню ЕМХ в напрямі від випромінювача до ТПВ, при забезпеченні товщини шару оброблюваного матеріалу кратною $\lambda(1/4+n/2)$ (n — ціле число, λ — довжина хвилі у матеріалі) відбуватиметься часткова компенсація залишкової енергії хвилі, що пройшла чотири рази крізь камеру обробки, і хвилі, що після другого проходження шару матеріалу пройшла крізь поляризаційне дзеркало.

Для реалізації запропонованих методів формування електромагнітного поля робоча камера оснащена поляризаційним дзеркалом, трансполяризаційним відбивачем, діелектричним узгоджувачем.

Найважливішими функціональними показниками робочої камери у складі всього пристрою є рівномірність сформованого розподілу поля у об'ємі сировини та енергоефективність, як співвідношення енергії поглинутої сировиною і загальної спожитої енергії.

Виконання досліджень робочої камери шляхом експериментальних вимірювань, зокрема по визначенню профілю розподілу інтенсивності ЕМП всередині оброблюваного матеріалу, що знаходиться у камері обробки, є

А. М. Сподоєнюк, КіВРА 2015

складним завданням в силу необхідності детектування напруженості електричної чи магнітної складової поля не порушуючи картини розподілу поля внесеним зондом чи іншим давачем. Дослідження параметрів електромагнітного поля доцільніше вимірювати на основі температурного розподілу у речовині, що створюється досліджуваним ЕМП, з використанням діелектричних [47], оптоволоконних [48] термометрів, термопар, що, однак, призведе до виникнення похибок внаслідок збурення поля. Як наслідок, і враховуючи розвиток комп'ютерних програмних середовищ для чисельного моделювання електродинамічних структур, дослідження параметрів поля в робочій камері у роботі виконано за допомогою середовища HFSS.

В силу значного ускладнення структури робочої камери елементами з малими електричними розмірами (поляризаційне дзеркало, трансполяризаційний відбивач) безпосереднє відтворення моделі камери за її геометричними розмірами не дає змоги виконати її розрахунок у обраному програмному середовищі внаслідок потреби у величезних обчислювальних потужностях і часових витратах. У зв'язку з цим розробленню моделі передувало її спрощення шляхом еквівалентної заміни окремих елементів більш простими з точки зору чисельного моделювання аналогами.

Модель робочої камери пристрою відповідно до ескізної моделі (див. рис. 4.2) розроблена у середовищі HFSS і зображена на рис. 4.3.

Модель сформована *n*-гранником *1*, кожна грань якого представляє широку стінку прямокутного хвилевода з виконаними на ній щілинами *2*. Живлення щілин здійснюється синфазно і з однаковими амплітудами. Збудження щілин забезпечено виконанням на їх поверхні хвилеводних портів, потужністю живлення яких забезпечується необхідний розподіл поля вздовж випромінювача. В центрі робочої камери *1* (див. рис. 4.3) паралельно до її стінок розташована циліндрична камера опромінення *3*, діелектричні характеристики матеріалу якої відповідають еквівалентним властивостям матеріалу, що підлягає опроміненню. Камера опромінення оточена циліндричною діелектричною узгоджувальною стінкою *4*, на зовнішній

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

поверхні якої нанесене поляризаційне дзеркало *5* у вигляді спіралеподібної сітки, провідники якої орієнтовані під кутом 45° до осі камери.

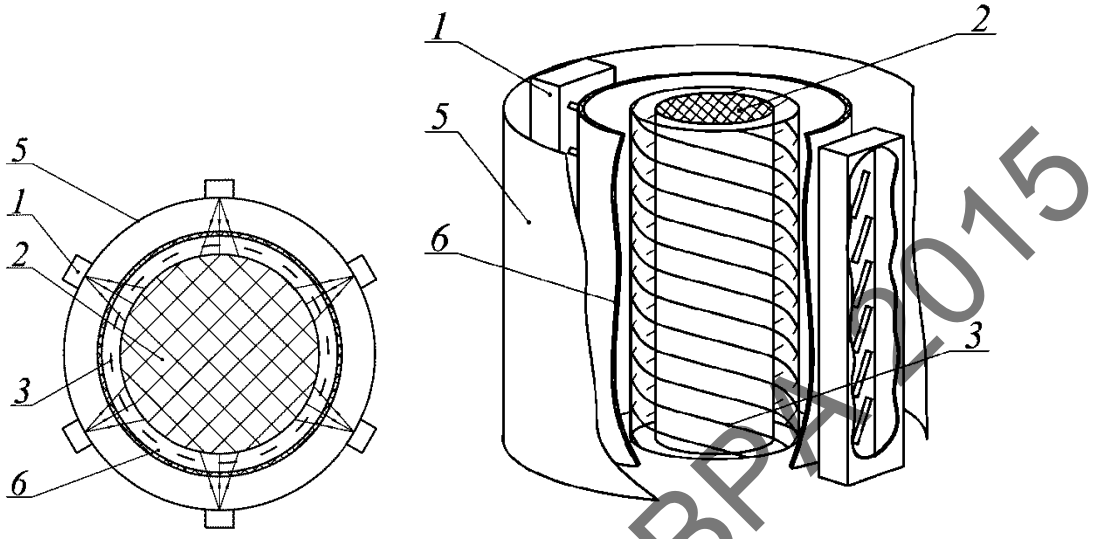


Рисунок 4.2 — Модель циліндричної робочої камери

1 — лінійний опромінювач, *2* — оброблюване середовище, *3* — поляризаційне дзеркало, *4* — роторефлектор, *5* — зовнішній екран, *6* — узгоджувальна стінка

Для зменшення впливу обмеженості довжини структури на розподіл поля торцевим площинам, що обмежують модель робочої камери, присвоєно властивість ідеальних магнітних стінок, що еквівалентно розташуванню вздовж по обидва кінці камери аналогічних структур.

Оскільки живлення випромінювачів здійснюється від окремих не синхронізованих між собою генераторів НВЧ коливань, а діючим фактором на оброблюване середовище є не миттєве значення напруженості поля, а його середнє значення [1], то це дає можливість розраховувати інтенсивність електромагнітного поля у камері опромінення шляхом скалярного складання інтенсивностей (щільностей енергії поля), створених кожним випромінювачем. Відповідно, модуль напруженості електричного поля, створеного *N* випромінювачами, розташованими навколо робочої камери, у певній точці *M* у камері обробки, визначається виразом

А.М. Слободенюк, КіВРА 2015

$$\left|E\left(M\right)\right| = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_a}\left|E_n\left(M\right)\right|^2}, \qquad (4.11)$$

де $E_n(M)$ — напруженість електричного поля у точці M, створена випромінювачем з номером n, N_a — кількість граней з опромінювачами у робочій камері.

Таким чином, послідовність розрахунку сумарного профілю розподілу напруженості електричного поля передбачає знаходження профілю поля $|E_1(M)|$ по перетину камери опромінення при збудженні випромінювачів на одній із граней робочої камери, після чого сумарний профіль поля визначається відповідно до (4.11), так, що профіль розподілу $|E_n(M)|$ визначається шляхом повороту профілю $|E_1(M)|$ на кут $360°(n-1)/N_a$. В силу того, що щілини на випромінювачах виконані періодично, то аналіз поля виконується в межах одного періоду λ_g вздовж осі камери.

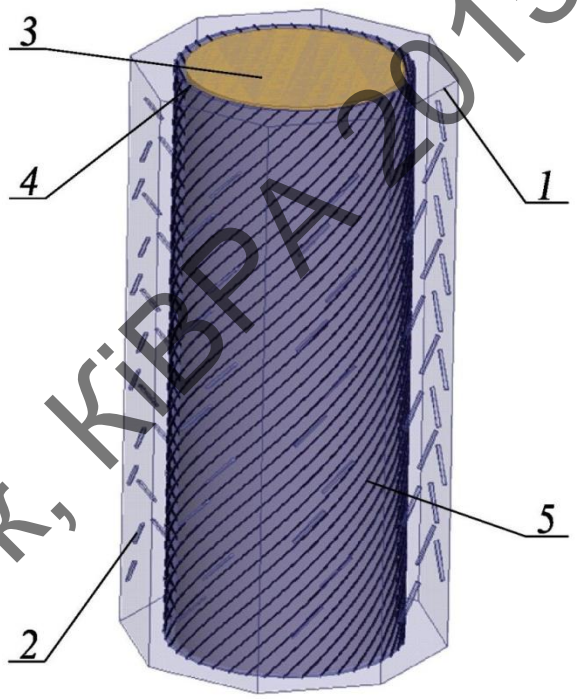


Рисунок 4.3 — Модель робочої камери

Діаметр камери опромінення встановлювався з огляду на інтенсивність затухання хвилі у матеріалі, що її заповнює, і кількість опромінювачів навколо камери обробки так, щоб сумарна інтенсивність поля в центрі камери була близькою до інтенсивності поля на периферії камери опромінення. Як об'єкт обробки розглядався матеріал із відносною діелектричною проникністю ε_r=2,65 і тангенсом кута діелектричних втрат tgδ=0,11, що відповідає зерну пшениці вологістю 14% [49]. Опромінення робочої камери відбувається вісьмома розташованими навколо камери

А. М. Сподоєнюк, КіВРА 2015

обробки щілинними решітками. Діаметр камери обробки для забезпечення рівномірного розподілу поля становив 300 мм, а відстань від поверхні оброблюваного матеріалу до випромінювача — 100 мм.

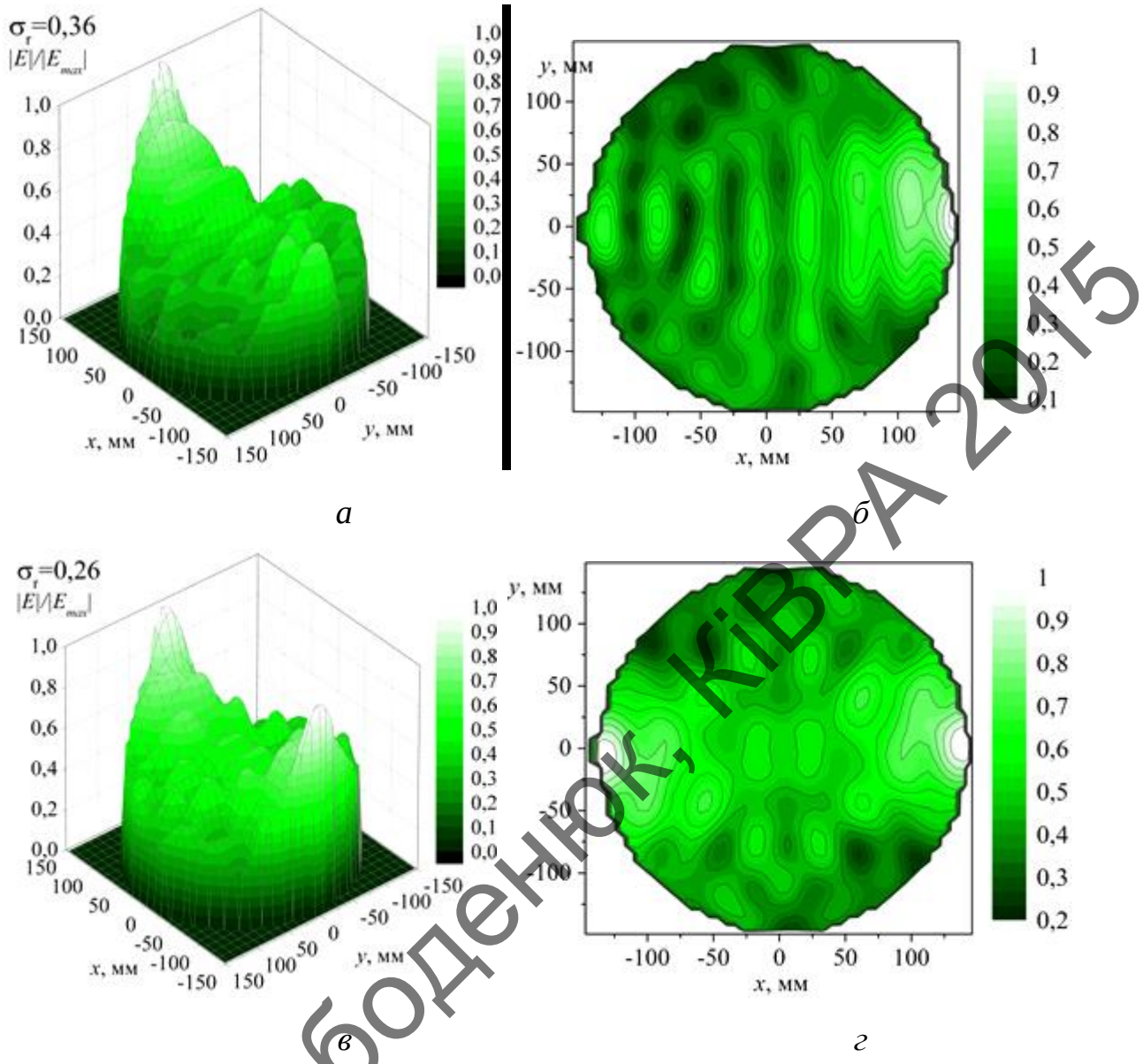
Для оцінки нерівномірності розподілу поля використаємо поняття коефіцієнта нерівномірності поля, що характеризує відносне середньоквадратичне відхилення розподілу параметрів поля від його математичного очікування:

$$\sigma_r = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} \left(X_i - \bar{X} \right)^2}{N}}, \qquad (4.2)$$

де $\bar{X}$ — математичне очікування розподілу, N — кількість розрахункових точок. Використання відносного (замість абсолютного) відхилення дає змогу більш коректно порівнювати між собою результати досліджень для різних перетинів камери обробки, для яких середнє значення відрізняється.

Профіль розподілу нормованої абсолютної величини напруженості електричного поля по перетину камери опромінення, відповідно до рис. 4.3, при збудженні *однієї* із восьми решіток, зображений на рис. 4.4, *а*, *б* у об'ємному та плоскому вигляді; коефіцієнт нерівномірності напруженості поля σ_r для розподілу становить 0,36. Розрахований розподіл відповідає площині z=0,5l, де z=0 проходить через центр щілини з номером n=N_s/2, N_s — кількість щілин на одній грані робочої камери, а вісь z паралельна до осі камери (рис. 4.3). Видно, що розподіл поля внаслідок затухання енергії хвилі при поширенні і ефектів, пов'язаних з інтерференцію падаючої та відбитої хвиль, має суттєво нерівномірний характер. На рис. 4.4, *в*, *г* ілюстровано зміну розподілу модуля напруженості електричного поля при опроміненні камери обробки двома протилежно розташованими опромінювачами, звідки видно, що збільшення кількості опромінювачів підвищує рівномірність поля. Усі залежності нормовані до максимального значення E_{max}.

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015



а *б*

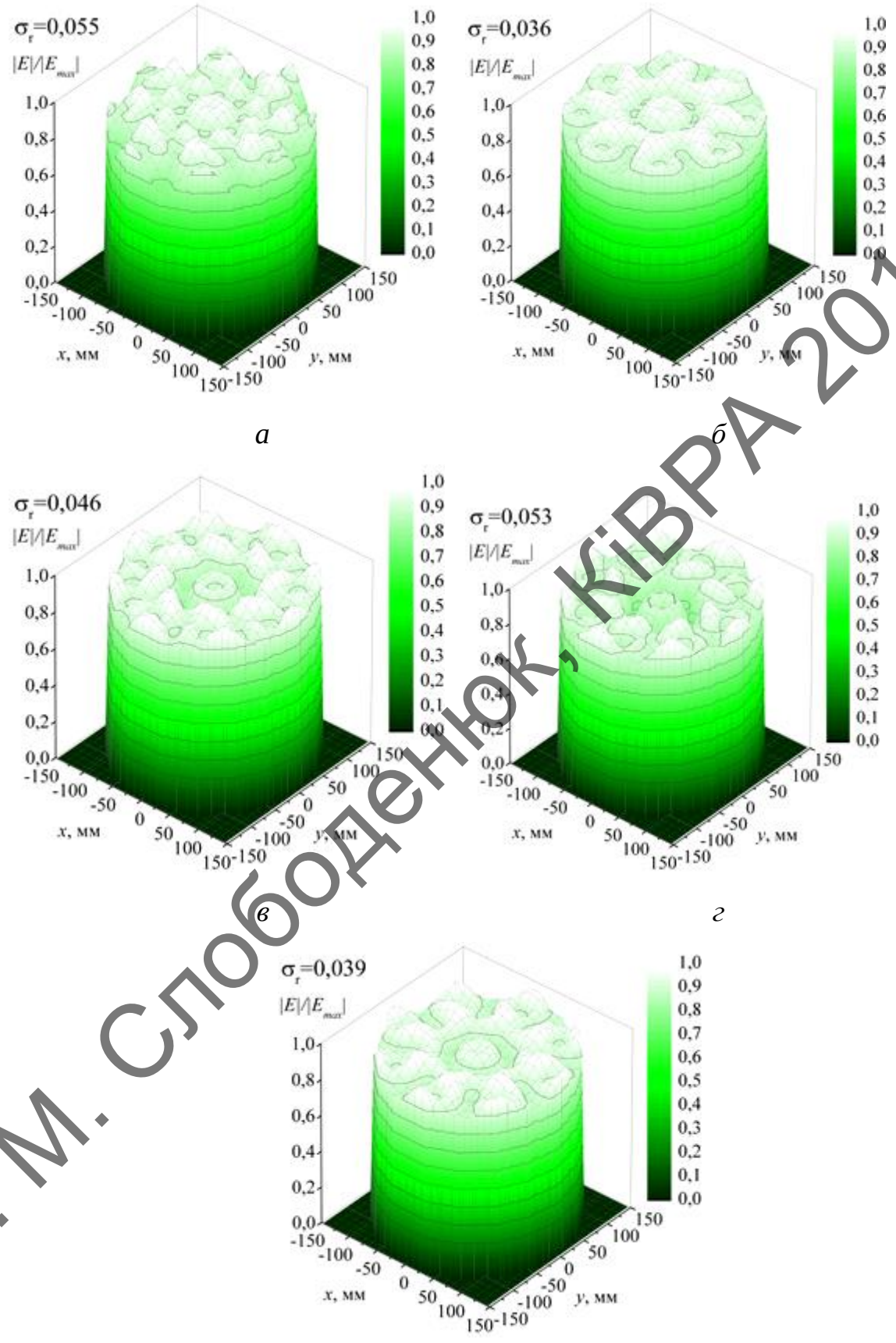
в *г*

Рисунок 4.4 — Нормовані профілі напруженості поля від однієї (*а*, *б*) та двох протилежно розташованих решіток (*в*, *г*)

Значне підвищення рівномірності поля досягається при опроміненні камери обробки від усіх випромінювачів. Сумарний профіль напруженості електричного поля по перетину камери опромінення у площині $z=0{,}5l$ при одночасному опроміненню всіма вісьмома решітками приведено на рис. 4.5.

Залежності на рис. 4.5, *а*—*д* отримані для площин $z=0$, $z=l/5$, $z=2l/5$, $z=3l/5$, $z=4l/5$ в межах одного періоду вздовж камери обробки. Коефіцієнт нерівномірності напруженості електричного поля не перевищує 6%, крім того локальні максимуми у площинах $z=0$, $z=l/5$, $z=4l/5$ переходять у

А.М. Слободенюк, КіВРА 2015



а *б* *в* *г* *д*

Рисунок 4.5 — Сумарний профіль напруженості електричного поля, створений усіма решітками у різних перетинах в межах одного періоду решітки

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

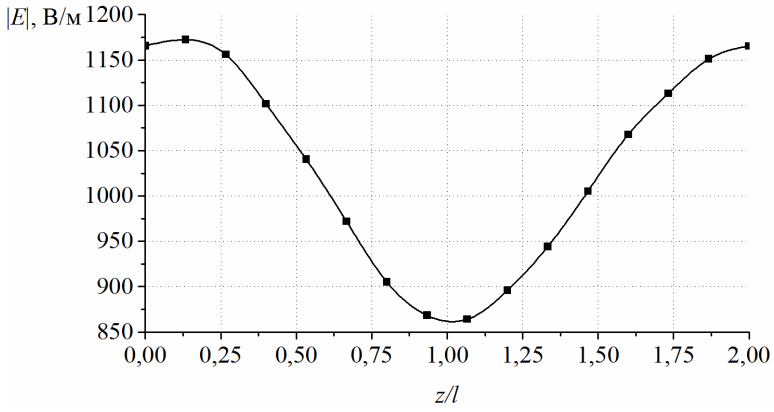


Рисунок 4.6 — Нормована напруженість електричного поля в центрі камери опромінення вздовж одного періоду решітки

мінімуми у площинах $z=3l/5$, $z=4l/5$, чим частково компенсується результуюча нерівномірність опромінення сировини. Залежність максимальної напруженості електричного поля вздовж осі z, за якою виконувалось нормування характеристик рис. 4.4, приведена на рис. 4.6 і дає змогу перейти від відносних величин до абсолютних, маючи на увазі, що графік відповідає потужності випромінювання кожної щілини 250 Вт.

Визначальною характеристикою рівномірності обробки ДСМ є розподіл інтегральної поглинутої енергії сировиною після проходження її вздовж камери обробки (або одного її періоду) по площі її перетину. Таким чином, нерівномірність розподілу модуля напруженості електричного поля вздовж камери опромінення не має суттєвого значення для опромінення сировини з метою сушіння, знезараження, передпосівної обробки, оскільки не призводить до зміни розподілу сумарної кількості енергії, поглинутої опромінюваним матеріалом після обробки. Вважаючи, що оброблюваний матеріал по всій камері обробки має однакові діелектричні властивості, нормовану характеристику кількості поглинутої енергії частинкою, що пройшла зі сталою швидкістю вздовж прямої ($x=x_M$; $y=y_M$) в межах одного періоду решітки $z=0..2l$ визначимо виразом

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

$$\frac{P(x_M, y_M)}{P_{\max}} = \frac{\int_0^{2l} |E(x_M, y_M, z)|^2 dz}{\int_0^{2l} |E(x_{\max}, y_{\max}, z)|^2 dz}, \qquad (4.3)$$

де x_M; y_M — координати у площині, перпендикулярній до осі камери обробки, з початком у її центрі, x_{max}, y_{max} — координати, за якими розподіл інтегральної потужності має максимальне значення. Результати розподілу напруженості поля, отримані у чисельних дослідженнях, представлені дискретними рядами, тому інтеграл у (4.3) замінюємо скінченною сумою за кількістю проаналізованих перетинів N_c:

$$\frac{P(x_M, y_M)}{P_{\max}} = \sum_{n=1}^{N_c} \frac{|E(x_M, y_M, z_n)|^2}{|E_{\max}(x_{\max}, y_{\max}, z_n)|^2}, \; z_n = \frac{2l}{N_c}(n-1), \qquad (4.4)$$

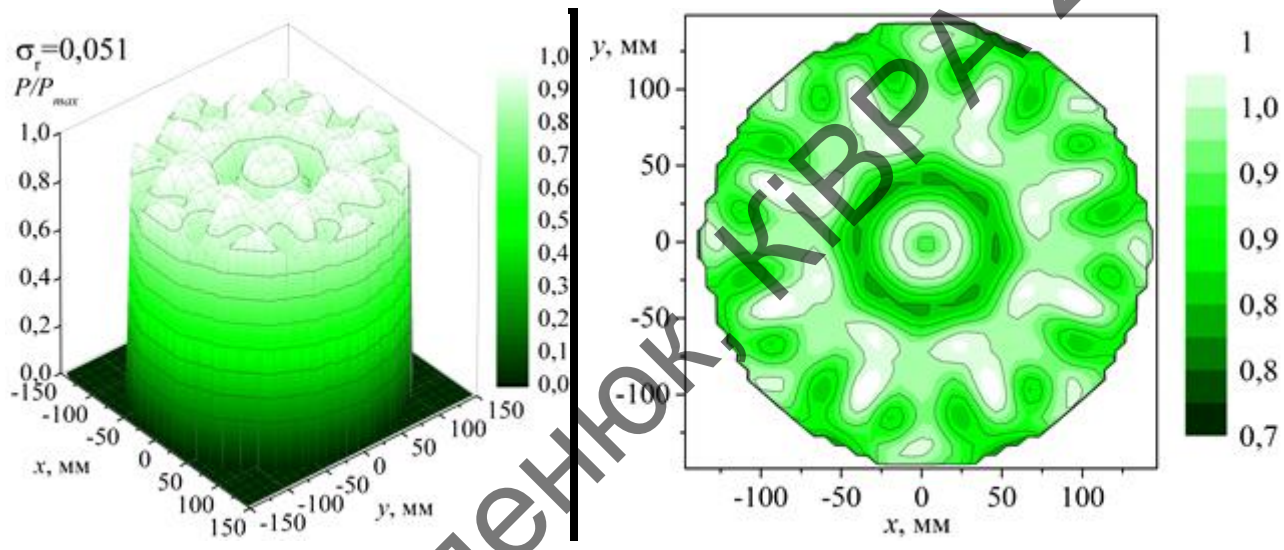
при чому, при збільшенні N_c понад 5 кількість перетинів уже практично не впливає на картина розподілу.

Розрахований за (4.4) відповідно до розглянутої моделі при вказаних вище параметрах нормований розподіл інтегральної поглинутої енергії приведено на рис. 4.7. Для даного розподілу коефіцієнт нерівномірності σ_r=0,052, для якого розкид величини поглинутої енергії частками матеріалу не перевищує 11%.

Розташовуючи навколо камери із оброблюваною сировиною різну кількість випромінювальних решіток забезпечується регулювання інтенсивності поля у камері та змінюється його розподіл, що вимагає при проектуванні робочої камери враховувати як параметри сировини, так і кількість випромінювачів, кількість яких визначається необхідним ступенем рівномірності поля, потужністю використаних генераторів та необхідною щільністю енергії у камері обробки. Вплив кількості граней з випромінювачами N_a робочої камери на коефіцієнт нерівномірності розподілу інтенсивності поля σ_r показаний у табл. 4.1. У нижньому рядку таблиці приведена середня по об'єму щільність потужності, що виділяється у

А. М. Слободенюк, КВРА 2015

оброблюваній сировині при опроміненні вказаною кількістю решіток у розрахунку, що кожна секція із чотирьох щілин рівномірно живиться від генератора потужністю 1 кВт. З таблиці видно, що для камери при вказаних параметрах характерна кількість опромінювачів, за якої досягається максимальна рівномірність поля, при збільшенні або зменшенні кількості яких рівномірність починає погіршуватись, що свідчить про необхідність оптимізації розмірів камери для кожної кількості випромінювачів для досягнення максимальної рівномірності поля.



а *б*

Рисунок 4.7 — Нормований розподіл інтегральної поглинутої енергії

Таблиця 4.1 — Середньоквадратичне відхилення розподілу енергії та її об'ємна щільність

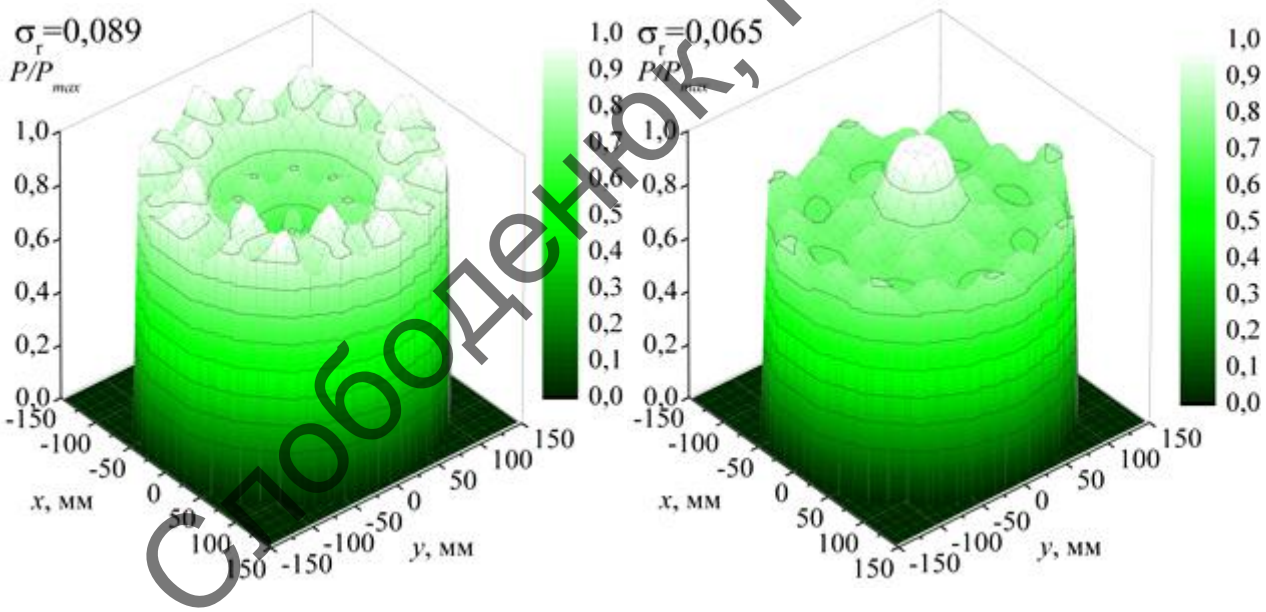
N_a	4	5	6	7	8	9	10
σ_r	0,119	0,094	0,083	0,086	0,052	0,068	0,054
P_l,Вт/дм^3	297	372	446	520	592	670	744

Основними експлуатаційними факторами, що впливають на розподіл поля у камері опромінення, змінюючи режим роботи пристрою, є флуктуація робочої частоти генератора, і зміна діелектричних властивостей

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

оброблюваної сировини як в процесі оброблення, так і при використанні матеріалів з різними діелектричними властивостями. Вплив зміщення робочої частоти на розподіл поля у камері обробки ілюстрований на рис. 4.8, де рис. 4.8, *а* відповідає частота F=2,39 ГГц і рис. 4.8, *б* — F=2,51 ГГц.

Зміна розподілу поглинутої енергії внаслідок зміни діелектричних властивостей оброблюваної сировини зображена на рис. 4.9, на якому відображено вплив діелектричної проникності ε_r та тангенсу кута діелектричних втрат tgδ матеріалу у камері опромінення. Як видно з графіків, зміна частоти і діелектричних властивостей сировини призводить до модифікації картини розподілу енергії, поглинутої матеріалом, що пройшов камерою опромінення, однак його середньоквадратичне відхилення змінюється незначним чином.



а *б*

Рисунок 4.8 — Профіль поглинутої енергії при різних робочих частотах

Для додаткового підвищення рівномірності поля у камері опромінення доцільно розташовувати усі випромінювальні решітки надаючи їм поздовжнього зсуву на крок $S_z=2l/N_a$, де $l\approx\lambda_g/2$ — відстань між сусідніми щілинами. Інтегральний нормований розподіл поглинутої енергії при проходженні сировиною вздовж одного періоду решітки для такого випадку

А. М. Свободенюк, КІВРА 2015

зображений на рис. 4.10. Інтегральний розподіл поглинутої енергії при цьому практично не змінюється, однак забезпечується суттєве зростання однорідності поля у робочій камері вздовж її осі.

Основними факторами, що визначають енергоефективність пристрою, є коефіцієнт корисної дії магнетронного генератора та ефективність віддачі випроміненої енергії у сировину. Ефективність сучасних магнетронів складає приблизно 70—80% [50], порівняно з чим втрати у хвилеводних лініях передачі є нехтовно малими. Ефективність робочої камери опромінення визначається втратами, спричиненими неузгодженням випромінювачів із камерою обробки, і втратами енергії, що виділяється на стінках та елементах конструкції, при чому останнім фактором можна знехтувати, вважаючи його відносно незначним. Величину неузгодженості випромінювача з навантаженням, а, відповідно, і втрати енергії характеризуємо коефіцієнтом відбиття енергії $|K_в|^2$.

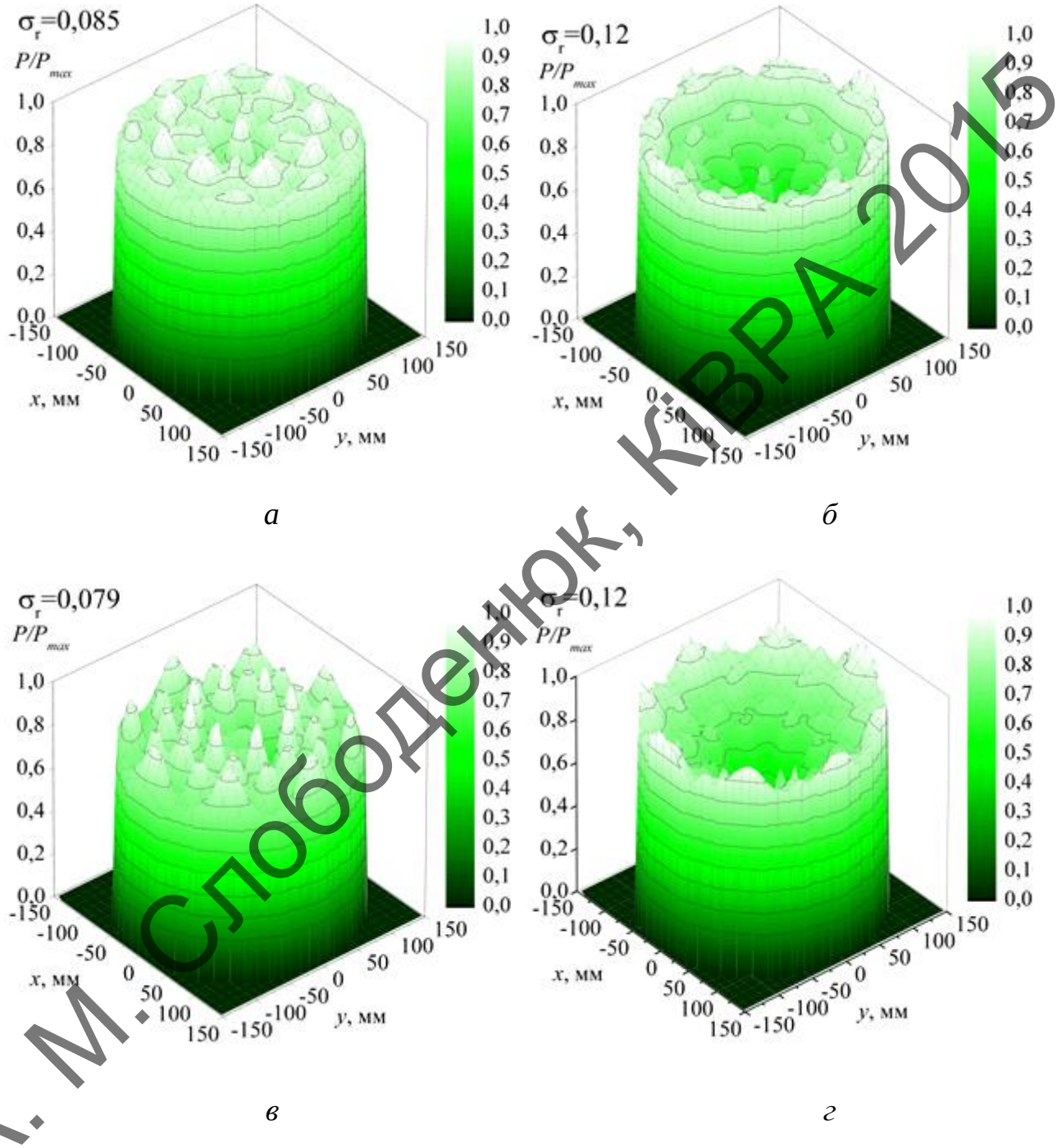
Розміщення узгоджувальної діелектричної оболонки (див. рис. 4.3, поз. *4*) за відповідних її параметрів дає змогу забезпечити практично повне узгодження випромінювача з навантаженням.

Для моделі рис. 4.3 коефіцієнт відбиття енергії R_P становив 0,057 при частоті F=2,45 ГГц і діелектричних характеристиках оброблюваного матеріалу ε_r=2,65 і tgδ=0,11. Результати дослідження впливу зміни робочої частоти та діелектричних властивостей матеріалу на коефіцієнт відбиття приведено у табл. 4.2, з якої видно, що варіювання діелектричних характеристик матеріалу, що заповнює камеру опромінення, як і робоча частота, впливають на величину коефіцієнта відбиття значно менше, ніж на характер рівномірності поля у камері обробки. Як наслідок, основним параметром, що потребує основних заходів щодо оптимізації є коефіцієнт рівномірності опромінення сировини.

Основним обмеженням до використання зустрічнорефлекторної робочої камери є необхідність забезпечення діелектричних властивостей

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

оброблюваного матеріалу і робочої частоти у вузькому діапазоні для збереження показника рівномірності опромінення сировини.



а *б*

в *г*

Рисунок 4.9 — Зміна розподілу поглинутої енергії при різних діелектричних властивостях сировини. *а* — ε_r=2,4, tgδ=0,08; *б* — ε_r =2,65, tgδ=0,15; *в* — ε_r =3,1, tgδ=0,11; *г* — ε_r =3,1, tgδ=0,15

А. М. Слободенюк, КВРА 2015

Використання сировини у ширшому діапазоні діелектричних характеристик і генератора з більшими флуктуаціями частоти забезпечує роторефлекторна камера, основною перевагою якого є зниження рівня стоячих хвиль завдяки використанню роторефлектора. Модель роторефлекторної камери з виконаним діаметральним перетином, розроблена у HFSS, зображена на рис. 4.11; зовнішні стінки камери *1* утворюють *n*-гранник, на бокових гранях якого розташовані випромінювальні щілинні решітки *2*. Матеріал, що підлягає обробці, знаходиться у порожнистій циліндричній камері *3*, в центрі якої розташований циліндричний роторефлектор *6*.

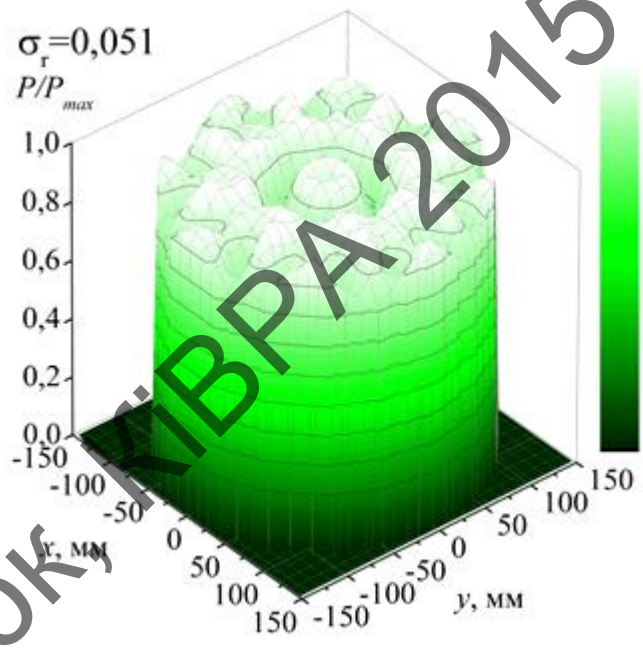


Рисунок 4.10 — Розподіл поглинутої енергії при зміщеному розташуванні випромінювачів

Пластини роторефлектора орієнтовані перпендикулярно до осі камери, а вісь поляризації поляризаційного дзеркала співпадає з поляризацією випромінювальних щілин, завдяки чому при відбитті ЕМХ від ТПВ відбувається повертання площини її поляризації на 90º.

Таблиця 4.2 — Вплив параметрів моделі на коефіцієнт відбиття

F	2,39	2,51	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
ε_r; tgδ	2,65; 0,11	2,65; 0,11	2,4; 0,08	2,65; 0,11	2,65; 0,15	3,1; 0,11	3,1; 0,15
R_P	0,08	0,045	0,086	0,057	0,084	0,113	0,12

Приведена модель характерна тим, що при опроміненні одночасно всіма випромінювачами, картина розподілу інтенсивності поля по перетину

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

сировини ідентична для усіх ділянок оброблюваного матеріалу в межах усіх секторів робочої камери, що спираються на стінку *n*-кутника з випромінювачем. Відповідно, аналіз поля виконаємо для одного сектора як частини камери обробки.

Камера обробки, що відповідає розробленій моделі роторефлекторної робочої камери має зовнішній та внутрішній радіус відповідно 300 мм і 200 мм, кількість опромінювачів навколо камери становила 12. Діелектричні властивості оброблюваної сировини аналогічні до попередньої моделі: ε_r=2,65, tgδ=0,11.

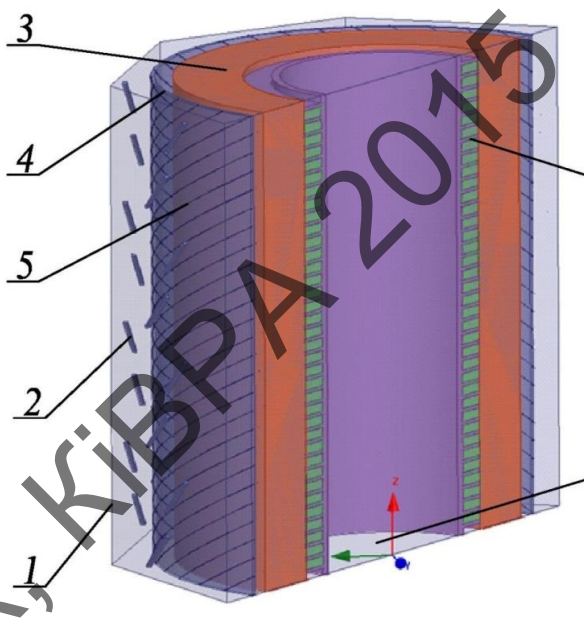


Рисунок 4.11 — Модель роторефлекторної робочої камери

При збудженні лише одної випромінювальної решітки, що прилягає до досліджуваного сектора камери обробки, нормований розподіл електричного поля має вигляд як зображено на рис. 4.12. Порівнюючи приведений розподіл поля із відповідним для зустрічнорефлекторної камери (див. рис. 4.4, *а*, *б*) видно, що завдяки нижчому коефіцієнту стоячої хвилі у камері розподіл поля має більш рівномірний характер, а коефіцієнт нерівномірності σ_r менший майже утричі.

При одночасному збудженні усіх випромінювачів накладання полів від сусідніх джерел забезпечує суттєве підвищення рівномірності поля у оброблюваному матеріалі, а повертання площини поляризації хвилі після відбиття від ТПВ знижує рівень стоячих хвиль.

А.М. Слободенюк, КіВРА 2015

Профіль розподілу щільності інтенсивності поля у площині z=0,5l зображено на 4.13, *а*, *б* у об'ємному та плоскому вигляді відповідно, де площина z=0 проходить через центр щілини з номером $n=N_s/2$ перпендикулярно до осі камери.

На рис. 4.14 приведені залежності розподілу сумарної поглинутої енергії, розраховані відповідно до (4.4), для оброблюваної сировини з різними діелектричними властивостями.

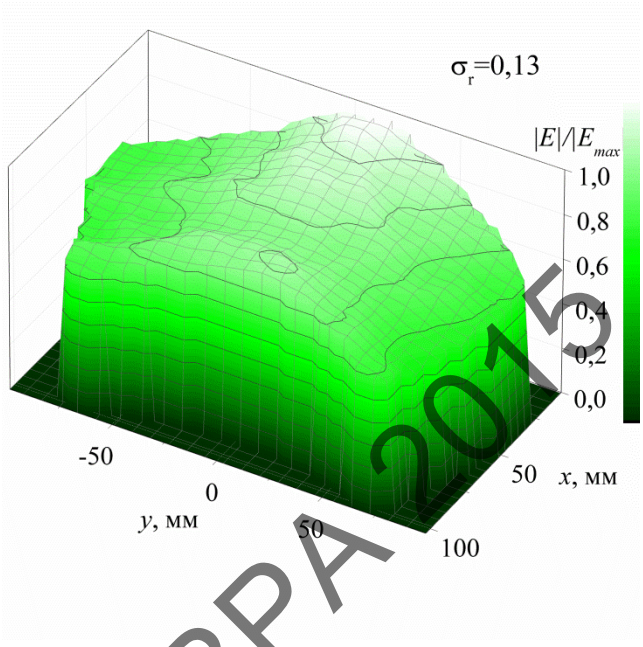
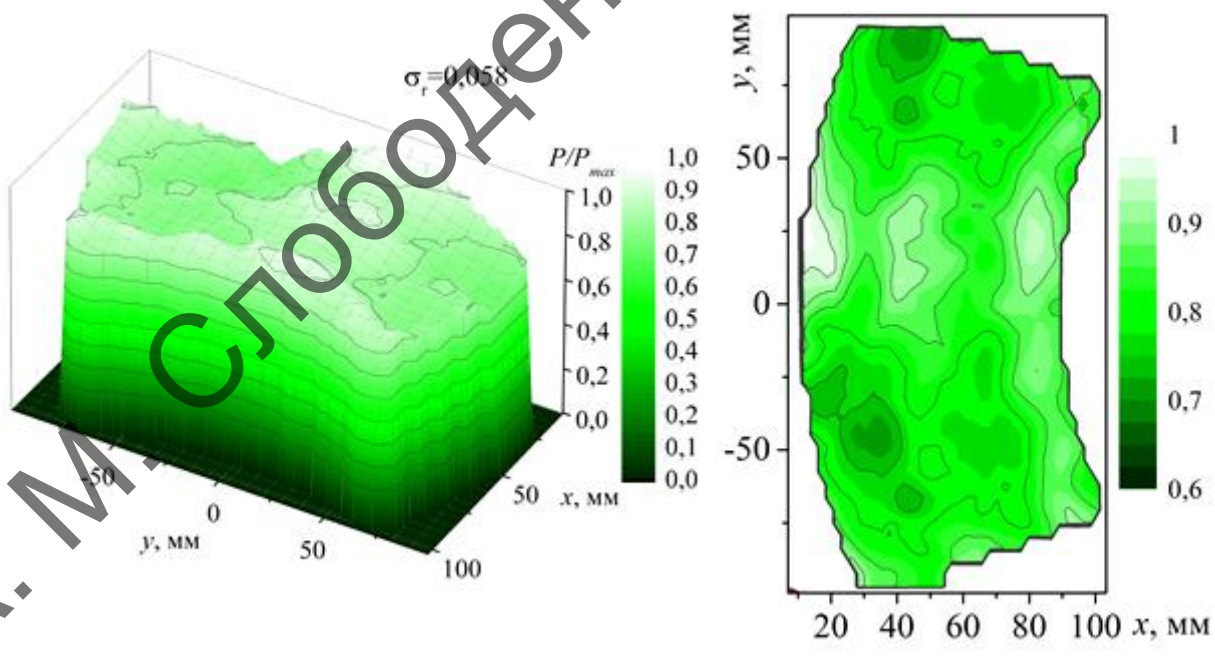


Рисунок 4.12 — Нормований розподіл напруженості електричного поля в межах одного сектора камери обробки



а *б*

Рисунок 4.13 — Нормований розподіл щільності енергії

А. М. Слободенюк, КВРА 2015

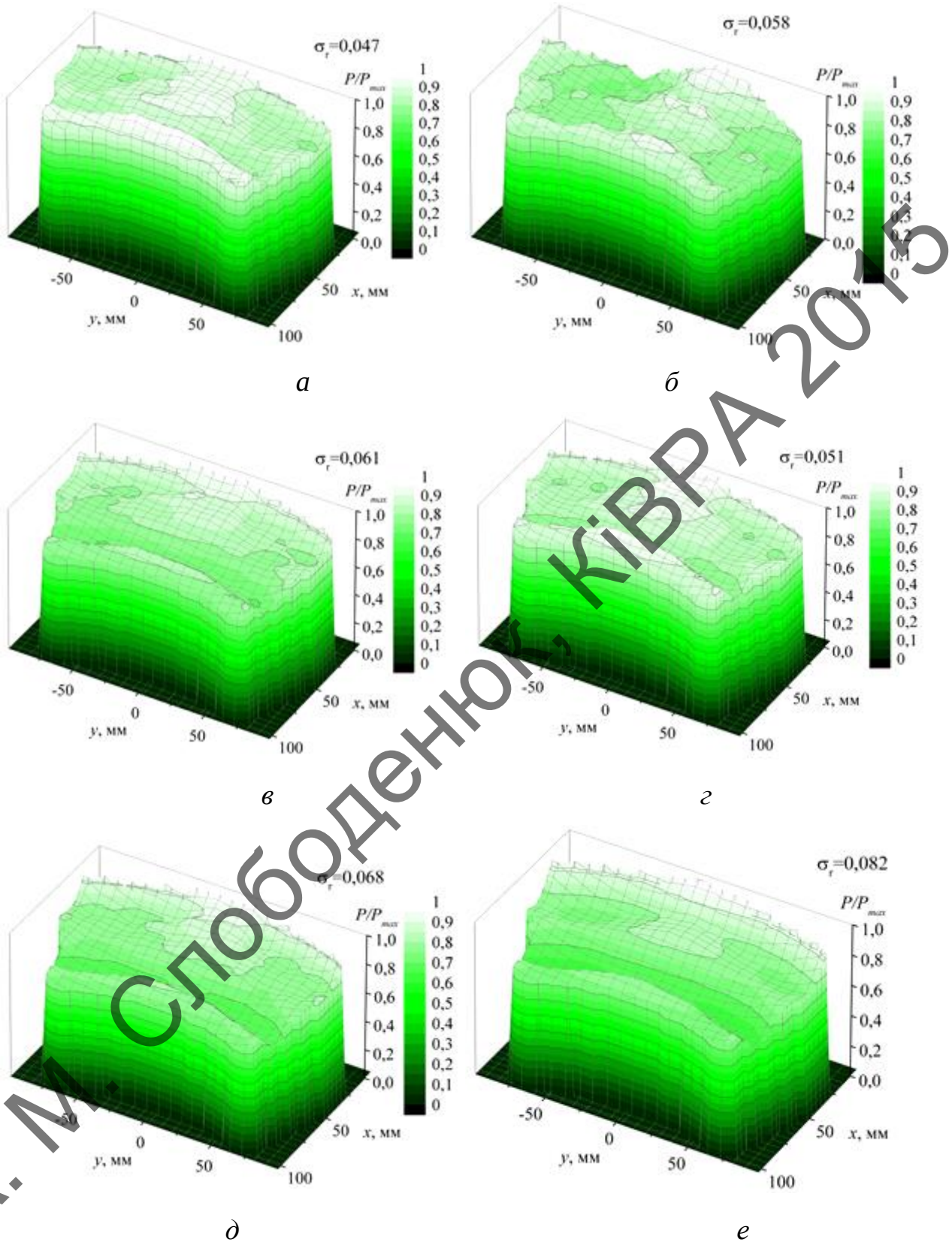
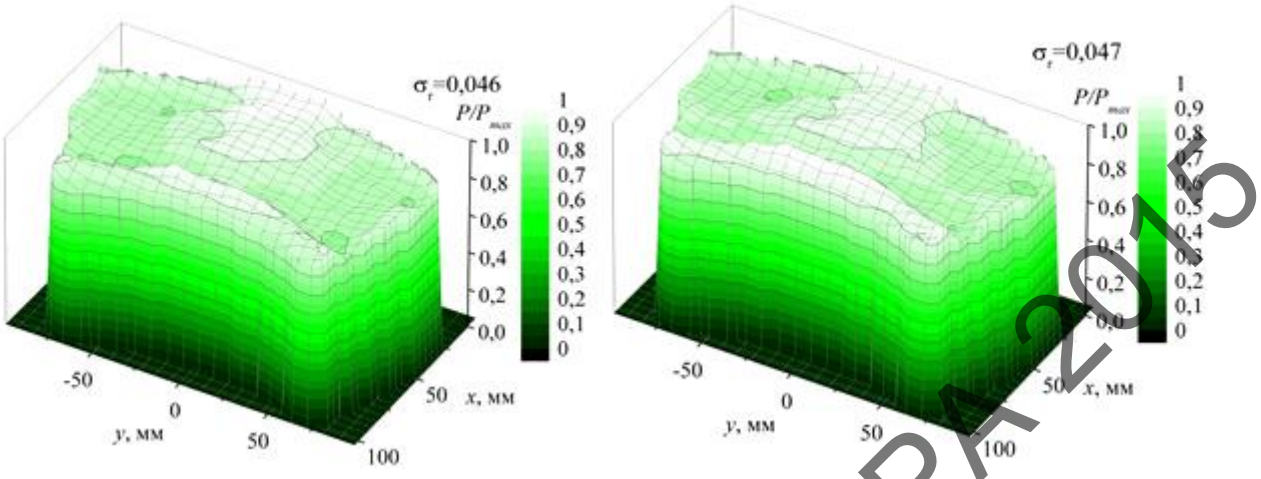


Рисунок 4.14 — Розподіл поглинутої енергії у камері обробки при різних діелектричних характеристиках сировини.

а — $\varepsilon_г$=2,65, tgδ=0,11; *б* — $\varepsilon_г$=2,4, tgδ=0,08; *в* — $\varepsilon_г$ =2,65, tgδ=0,15; *г* — $\varepsilon_г$ =3,1, tgδ=0,11; *д* — $\varepsilon_г$ =3,1, tgδ=0,15; *е* — $\varepsilon_г$ =3,5, tgδ=0,18

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

Вплив зміни робочої частоти на параметри розподілу поглинутої енергії зображений на рис. 4.15.



а *б*

Рисунок 4.15 — Розподіл поглинутої енергії у камері обробки при відхиленні робочої частоти. *а* — *F*=2,39 ГГц; *б* — *F*=2,51 ГГц

Аналізуючи картини розподілу поглинутої енергії в межах одного сектора робочої камери із сировиною, можна бачити, що у порівнянні з аналогічними характеристиками для зустрічнорефлекторної камери, приведених на рис. 4.14 і рис. 4.15, зміна як діелектричних властивостей оброблюваного матеріалу, так і робочої частоти викликає значно меншу зміну розподілу поля, що вказує на можливість використання такої конструкції для обробки матеріалів зі значно ширшим діапазоном властивостей. Результати дослідження впливу зміни частоти, діелектричної проникності та тангенсу кута втрат у оброблюваній сировині приведені у табл. 4.3. Порівнюючи результати у табл. 4.2 і табл. 4.3 видно, що для роторефлекторної робочої камери властива вища стабільність коефіцієнта відбиття при зміні частоти опромінення і характеристик матеріалу у камері обробки.

Результати досліджень розроблених моделей робочих камер підтверджують доцільність застосування запропонованих пристроїв формування поля — поляризаційних дзеркал, трансполяризаційних

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

(роторефлекторних) відбивачів, діелектричних узгоджувальних пластин — при побудові робочої камери для опромінення діелектричних сипучих матеріалів електромагнітним полем НВЧ для реалізації запропонованого методу багаторазового проходження електромагнітної хвилі крізь сировину і забезпечення високого ступеню рівномірності розподілу інтенсивності опромінення, збереження функціональних характеристик пристрою при обробці матеріалів з різними діелектричними властивостями.

Таблиця 4.3 — Вплив частоти і характеристик сировини на коефіцієнт відбиття енергії

F	2,39	2,51	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
ε_r; tgδ	2,65;0,11	2,65;0,11	2,4;0,08	2,65;0,11	2,65;0,15	3,1;0,11	3,1;0,15	3,5;0,18
R_P	0,062	0,04	0,068	0,048	0,067	0,084	0,1	0,12

Висновки до розділу

1. Враховуючи результати одержані в розділі 3, проведені розрахунки розподілу напруженості електричного поля НВЧ сигналу безпосередньо в центральній зоні активної камери, що є сумою електромагнітних полів від декількох опромінюючих структур. Розрахунки проводились методом чисельного моделювання електродинамічних структур за допомогою програмних середовищ HFSS.

2. В даному розділі об’єм розрахунків дещо розширено. Так крім структур, що мають осеву симетрію порядку N розглянуті прямокутні камери і опромінення їх з двох сторін з урахуванням відбитих хвиль. В даному випадку формуючі розподіл поля структури, такі як дзеркала і лінзи відсутні. Сипучий діелектричний матеріал опромінюється безпосередньо хвилеводно-щілиним опромінювачем.

3. Результати розрахунків показали наступне: для плоско–паралельних камер шириною 300 нм з вісьмома опромінювачами забезпечено

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

нерівномірність розподілу щільності енергії електромагнітного поля менше 4%. Для циліндричної камери з зовнішнім і внутрішнім діаметрами 600 мм і 400 мм відповідно з дванадцятьма опромінювачами забезпечено нерівномірність розподілу енергії електромагнітного поля не менше 5%, конструкція характеризується значно вищою стабільністю параметрів при змінні властивостей сировини та робочої частини.

4. Отримані параметри рівномірності розподілу поля в об'ємі активної камери значно перевищують відомі результати, досягнуті в відомих існуючих пристроях.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Враховуючи той факт, що тема даної магістерської дисертації є ”Система концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону від N джерел в одному об’ємі” що потребує використання засобів обчислювальної техніки, то в цьому розділі буде доцільним розглянути питання пов’язані із забезпеченням комфортних та безпечних умов праці користувача відео дисплейних терміналів (ВДТ) персональної електронно обчислювальної машини (ПЕОМ).

В першу чергу, передбачається, з урахуванням вимог ДСанПіН 3.3.2.007 та ДНАОП 0.00-1.31-99, визначити потенційно небезпечні і шкідливі фактори, що виникають при експлуатації ВДТ ПЕОМ, вплив цих факторів на користувачів ВДТ, визначити принципи їх нормування, та запропонувати відповідні технічні рішення та організаційні заходи щодо запобігання шкідливого впливу цих факторів на людину. Також в цьому розділі необхідно розробити відповідні технічні рішення та організаційні заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях (НС).

5.1 Визначення основних потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виконанні науково-дослідної роботи.

При виконанні даної роботи, основними шкідливими та небезпечними виробничими факторами, які пов’язані з використанням ПЕОМ є наступні:

- електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону ВДТ;
- випромінювання оптичного діапазону (ультрафіолетове, інфрачервоне і випромінювання видимого діапазону) ВДТ;
- недостатня освітленість робочої зони;
- можливість ураження електричним струмом;
- підвищений рівень шуму та вібрації на робочих місцях;
- значна напруга зорових органів і пов’язане з цим перевтомлення користувача ПЕОМ;

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

- значне навантаження на пальці і кисті рук, що при відсутності профілактики і медичного контролю, може викликати професійні захворювання,
- тривале перебування в одному й тому ж самому положенні сидячи, що викликає застійні явища в організмі людини;
- наявність іонізуючого рентгенівське випромінювання (НРВ);
- електростатичне поле;
- відблиски на екрані монітора.

5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Електробезпека

Електроустаткування в науково-дослідницькій лабораторії можна віднести до I (системні блоки) та II (ВДТ) класів щодо електрозахисту (ГОСТ12.2.007.0-75). Вимірювальні прилади мають 0I клас за електрозахистом.

Враження людей електричним струмом в лабораторії по рівню небезпеки згідно ОНТП 24-86 та ПБЕ можна віднести, до помешкань без підвищеної небезпеки, тому що:

- відносна вологість повітря не перевищує 75%;
- матеріал підлоги (паркет) є діелектриком;
- температура повітря не досягає значень, більших 35 °С;
- відсутня можливість одночасного доторку людини до з'єднаних із землею металоконструкцій будівлі, технологічних апаратів, механізмів і т.п., з одного боку, і до металевих корпусів електроустаткування - з іншого боку;
- відсутні хімічно агресивні середовища.

Електромережа трьохфазна з глухо заземленою нейтраллю, із зануленням і повторним заземленням нульового проводу відповідно до вимог ПБЕ та ПУЕ. Мережа обладнана автоматом струмового захисту, розрахованого на струм 10А. Час спрацювання автомату 0,1с.

А.М. Слободенюк, КіВРА 2015

Для того, щоб не допустити ураження людини електричним струмом при виникненні аварійних ситуацій необхідно заземлити все обладнання, що працює від мережі 220В, 50Гц. Опір нульового проводу повинен бути таким, щоб при замиканні на корпус або нульовий провід виникав струм короткого замикання, сила якого повинна перевищувати в 1,4 рази номінальний струм спрацювання автомата струмового захисту (при струмі короткого замикання менше 100А).

$$I_{кз} = \frac{U_ф}{R_0 + R_ф + Z_{Т/З}},$$

де $U_ф$ – напруга фази мережі,

R_0 – опір нульового дроту на ділянці від фазного трансформатора до розетки "Вхід мережі" (~2.2Ом),

$R_ф$ – опір фазного дроту на тій же ділянці (~3 Ом).

$Z_{Т/З}$ – еквівалентний опір транзистора (0.12 Ом)

$$I_{кз} = \frac{220}{2.2 + 3 + 0.12} = 41.35 \text{ А}$$

Визначили кратність $I_{кз}$ до $I_{ном.стр.авт}$ максимального струму захисту ($I_{ном.стр.авт} = 10$А).

$$\frac{I_{кз}}{I_{ном.стр.авт}} = \frac{41.35}{10} = 4.135$$

Таким чином струм короткого замикання при виникненні аварійної ситуації в 4,135 рази перевищує номінальний струм спрацювання автомата, що задовольняє встановленим нормам.

Опір заземлюючих пристроїв не перевищує значень встановлених ГОСТ12.1.030-81.

Виконано всі необхідні заходи щодо електробезпеки відповідно до ГОСТ12.3.019-80 та ПУЕ. Додаткових заходів по електробезпеці впроваджувати не потрібно.

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

5.2.2 Вимоги щодо організації робочих місць обладнаних ВДТ ПЕОМ

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я професійна діяльність користувача ПК може в окремих випадках приводити до порушення функцій зорових аналізаторів, кістково - м'язової системи (примусова поза) і порушень, зв'язаних зі стресовими ситуаціями і нервово - емоційною напругою при роботі.

Комп'ютерна техніка, яка встановлена в приміщенні лабораторії, є сучасною технікою, виконаною з урахуванням багатьох вимог охорони праці. Зокрема, ВДТ ПЕОМ мають тип LR/NI. Тип (Low Radiation) має низький рівень випромінювання екрана монітора, а тип NI (Non - Interlaced) має порядкове розгорнення, що сприяє меншому стомленню очей при роботі з відео монітором.

ВДТ ПЕОМ є пристроєм для візуального зображення інформації, збереженої електронним засобом. Він складається з дисплейного екрана, системного блока обробки виведеної інформації, і клавіатури.

ВДТ ПЕОМ є джерелом як електромагнітних випромінювань (м'якого рентгенівського, ультрафіолетового, інфрачервоного та радіочастотного діапазону) так і електростатичного поля.

Класифікація ВДТ стосовно до проблеми їхнього впливу на здоров'я базується головним чином на конструктивних особливостях і визначених параметрах самого дисплея (наприклад, можливість одержання багатокольорового, позитивного, негативного зображення).

Тривала робота за комп'ютером при неправильному, з фізіологічної точки зору, положенні тіла може викликати в організмі людини такі види захворювань, як сколіоз - дугоподібне викривлення хребта, чи остеохондроз - дистрофічний процес у кістковій та хрящовій тканині. Частіше всього користувачі комп'ютерної техніки скаржаться на біль у руках, плечових суглобах, шиї, у верхній частині ніг та у спині. Основні симптоми захворювань, що пов'язані з постійним інтенсивним використанням клавіатури, це больові відчуття у суглобах та м'язах кистей рук, оніміння та

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

дуже повільна рухливість пальців, судоми м'язів кистей рук, поява ниючого болю в ділянках зап'ястка.

Саме праця за клавіатурою потребує найбільш інтенсивної динамічної роботи кістково-м'язового апарату кистей рук і одночасно статичного напруження м'язів передпліччя і плеча. Виконання однотипних, фізично неважких рухів кистей, що здаються зовсім необтяжливими для людини, можуть призвести навіть до функціональних змін в її організмі, при цьому розвиватися вони можуть непомітно протягом кількох років.

Виникненню захворювань кістково-м'язового апарату кистей рук сприяє неправильне положення тіла щодо клавіатури, значне відхилення ліктів від тулуба нераціональне взаємне спрямування передпліччя та кистей рук.

Слід зауважити, що не тільки робота за клавіатурою призводить до виникнення порушень у кістково-м'язовому апараті рук. Як вже було сказано вище, використання в роботі такого пристрою як „миша", також несприятливо впливає на організм користувача комп'ютерної техніки. Маніпулюючи „мишею" людина здійснює велику кількість дрібних однотипних рухів, що призводить до постійного навантаження на кисть руки, передпліччя та плече. Все це обумовлює появу неприємних, а згодом і болісних відчуттів у ділянці зап'ястка, у ліктьовому і особливо плечовому суглобах.

Таким чином, можна констатувати, що основне перенапруження опорно-рухової системи людини при роботі з комп'ютерною технікою спричиняється, в першу чергу, багатогодинною напруженою роботою в одноманітному положенні сидячи, а значить і обмеженою загальною руховою активністю (гіподинамією), а також однотипними інтенсивними циклічними навантаженнями, які мають місце при роботі з клавіатурою та з пристроєм типу "миша".

Крім того, праця користувачів персональних комп'ютерів супроводжується активізацією уваги й інших вищих психічних функцій, а

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

також може супроводитися порушеннями режиму праці і відпочинку.

5.2.3 Вимоги до приміщень в яких розміщені ЕОМ

Облаштування робочих місць, обладнаних ЕОМ, ВДТ, повинно забезпечувати:

- належні умови освітлення приміщення і робочого місця, відсутність відблисків;
- оптимальні параметри мікроклімату (температура, відносна вологість, швидкість руху, рівень іонізації повітря);
- належні ергономічні характеристики основних елементів робочого місця;

Будівлі та приміщення, в яких експлуатуються ЕОМ та виконуються їх обслуговування, налагодження і ремонт, повинні відповідати вимогам: СНиП 2.09.02-85 “Производственные здания”, СНиП 2.09.04-87 “Административные и бытовые здания”, “Правил устройства электроустановок”, затверджених Головдерженергонаглядом СРСР 1984 р. (ПВЕ), “Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей”, затверджених Головдерженергонаглядом СРСР 21.12.84 (ПТЕ, СНиП 2.08.02-89 “Общественные здания и сооружения” з доповненнями, затвердженими наказом Держкоммістобудування України від 29.12.94 № 106, СН 512-78 “Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин”, затверджених Держбудом СРСР, ДСанПіН 3.3.2.-007-98 ‘‘Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин‘‘, затверджених МОЗ України 10.12.98.

Заборонено розміщувати робочі місця з ВДТ, ЕОМ у підвальних приміщеннях, на цокольних поверхах, поряд з приміщеннями, в яких рівні шуму та вібрації перевищують допустимі значення (поряд з механічними цехами, майстернями тощо), з мокрими виробництвами, з

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

вибухопожежонебезпечними приміщеннями категорій А і Б, а також над такими приміщеннями або під ними.

Приміщення мають бути обладнані системами водяного опалення, кондиціонування або припливно-витяжною вентиляцією відповідно до СНиП 2.04.05-91.

Згідно з ДНАОП 0.00-1.31-99 площу приміщень визначають із розрахунку, що на одне робоче місце вона має становити не менше ніж 6 м^2, а об'єм не менше ніж 20 м^3 з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні. Приміщення являє собою кімнату розміром 7 х 5 м., висотою 4 м. Розмір дверного прорізу 1,5м.

Площа й об’єм приміщення знаходимо по формулах:

$$S = a \cdot b,$$

$$V = S \cdot h,$$

де a – довжина, b – ширина, h – висота приміщення.

Маємо:

$$S=7 \cdot 5=35 \text{ м}^2, V=35 \cdot 3,5=122,5 \text{ м}^3.$$

Зведемо нормативні та фактичні дані приміщення в таблицю 5.1.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що геометричні розміри приміщення цілком відповідають нормативним вимогам.

Таблиця 5.1. Параметри приміщення

Назва характеристики	**Нормативне**	**Фактичне**
Площа приміщення з розрахунку	>6 м^2	35 м^2
Об’єм приміщення з розрахунку на 1	>20 м^3	122,5 м^3
Висота приміщення	3,5 – 4 м	3,5 м
Розміри дверей	≥1,1х1.8м	1,5х2 м
Відстань від стіни зі світловими прорізами до ВДТ	≥1м	1,5 м

Оздоблюють стіни, стелю, підлогу приміщення з матеріалів, які

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

дозволені органами державного санітарно-епідеміологічного нагляду. Заборонено застосовувати полімерні матеріали (деревостружкові плити, шпалери, що можна мити, рулонні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик, тощо), що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини. За розміщенням робочих місць з ВДТ, ЕОМ потрібно витримувати такі відстані: від стін зі світловими прорізами не менше 1 м; між бічними поверхнями ВДТ не менше 1,2 м; між тильною поверхнею одного ВДТ та екраном іншого не менше 2,5 м; прохід між рядами робочих місць не менше 1 м. Робочі місця з ВДТ щодо світлових прорізів розміщують так, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва. Екран ВДТ і клавіатура мають розміщуватися на оптимальний відстані від очей користувача, але не ближче 600 мм з урахуванням розміру алфавітно-цифрових знаків і символів. Розміщення екрана ВДТ має забезпечувати зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом ± 30° від лінії зору працівника.

Усі вище перераховані вимоги відповідають робочому приміщенню, де проводяться дослідження.

5.2.4 *Відповідність санітарним нормам параметрів мікроклімату в робочій зоні*

Для підвищення працездатності і збереження здоров'я важливо створити для людини стабільні метеорологічні умови – мікроклімат повітряного середовища, у поняття якого входять температура, відносна вологість, швидкість руху повітря та інтенсивність теплового опромінення.

Стан повітряного середовища визначається метеорологічними умовами в лабораторії, виробничим мікрокліматом, а також запиленістю повітря і його загазованістю.

Мікроклімат виробничого приміщення визначається поєднаннями температури, вологості, швидкості руху повітря та інтенсивності теплового випромінювання, що впливають на організм людини.

А. М. Слободенюк. КІВРА 2015

Для того, щоб фізіологічні процеси в організмі людини протікали нормально, температура його тіла повинна бути постійною. Надлишкова теплота повинна виділятися в навколишнє середовище. Відповідність між цією теплотою та охолоджувальною здатністю навколишнього середовища визначає комфортні умови.

При відхиленні параметрів мікроклімату від комфортних в організмі людини відбуваються процеси, спрямовані на терморегулювання. Розрізняють хімічну і фізичну терморегуляцію організму. Хімічна відбувається зниженням рівня обміну речовин, а фізична – за допомогою теплопровідності, конвекції, випромінювання і випарювання.

Значні відхилення параметрів мікроклімату від оптимальних можуть стати причиною ряду простудних захворювань.

Робочою зоною вважається простір, обмежений конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги чи площадки, на яких знаходяться місця постійного чи непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього виробничих факторів, що утворюються в процесі трудової діяльності людини.

Для нормальної життєдіяльності людини важливий парціальний тиск кисню – 21331 Па (160 мм рт. ст.) і необхідно, щоб у повітрі приміщень містилось не менш 19,5 - 20% кисню.

Вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони не має перевищувати ГДК. Відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 вміст озону – не більше 0,1 мг/м^3, вміст оксидів азоту – не більше 5 мг/м^3, вміст пилу – не більше 4 мг/м^3.

Важливо, щоб повітря мало визначений іонний склад. У повітрі містяться негативні і позитивні іони, що по рухливості розділяють на легкі, середні і важкі. На життєдіяльність організму людини благотворно впливають негативні іони кисню. Вміст легких іонів у повітрі виробничих і громадських приміщень, повітряне середовище яких піддається спеціальній обробці в системах кондиціонування, приведено в таблиці 5.2. Іонний склад

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

повітря має відповідати вимогам СН 2152-80.

Таблиця 5.2. Припустимий вміст легких іонів у повітрі робочої зони.

Рівні	Кількість іонів у 1 $см^3$ повітря позитивних, n^+	негативних, n^-	Коефіцієнт полярності, π
Мінімально необхідний	400	600	-0. 2
Оптимальний	1000 - 3000	3000 - 5000	- 0.67... 0
Максимально припустимий	50000	50000	-0. 05... +0.05

Норми метеорологічних умов при розробці пристрою регламентуються ДСН 3.3.6.042-99. Значення оптимальних, припустимих і фактичних параметрів мікроклімату на постійному робочому місці розробника пристрою для категорії виконуваних їм робіт в холодний і теплий період року приведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Нормовані значення параметрів мікроклімату в робочій зоні розробника

Період року	Параметр мікроклімату	Нормовані значення параметрів мікроклімату		Фактичні значення параметрів мікроклімату
		оптимальні	допустимі	
Холодний	Температура, °С	22-24	21-25	21-22
	Відносна вологість, %	40-60	75	65-75
	Швидкість руху, м/с	не більше 0,1	не більше 0,1	не більше 0,1
Теплий	Температура, °С	23-25	22-28	22-28
	Відносна вологість, %	40-60	55, при 28 °С 75, при 22 °С	70-75
	Швидкість руху, м/с	не більш 0,1	0,1-0,2	не більш 0,2

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Як видно з таблиці, фактичні значення параметрів мікроклімату в приміщенні лабораторії відповідають допустимим значенням цих параметрів

5.2.5 Освітлення робочих місць користувачів ВДТ ЕОМ

Штучне освітлення, а саме відсутність у спектрі ламп денного світла й ламп накалювання біологічно активної ультрафіолетової складової при тривалому впливі може призвести до ультрафіолетової недостатності, при якій знижуються бактерицидні властивості шкіри та імунітет.

Істотне значення для збереження тривалої працездатності, підвищення продуктивності праці має забезпечення норм освітленості на робочому місці. Величина освітленості регламентується нормами ДБН В.2.5-28-2006. Робоче приміщення належить до I групи – приміщення, у яких розрізнення об'єктів зорової роботи здійснюється при фіксованому напрямку лінії зору працюючих на робочу поверхню.

Нормування штучного освітлення також здійснюється згідно ДБН В.2.5-28-2006. Для загального освітлення використовують головним чином люмінесцентні лампи, що обумовлено їхніми перевагами. Для розрахунку штучного освітлення застосовують метод коефіцієнта використання потоку:

$$\Phi = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{N \cdot C},$$

де Φ – світловий потік; E – нормована мінімальна освітленість; K – коефіцієнт запасу; S – освітлювана площа; Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення; C – коефіцієнт використання випромінюваного світильниками світлового потоку на розрахунковій площі; N – число світильників.

Згідно ДБН В.2.5-28-2006 визначаємо норму освітленості:

$E = 300$ лк; $K = 1{,}5$; $S = 5 \cdot 4 = 20$ м^2; $Z = 1{,}2$.

Необхідна кількість люмінесцентних ламп визначається по формулі:

$$N = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{\Phi \cdot C}$$

Найбільш прийнятними для приміщення є люмінесцентні лампи ЛД (денного світла) потужністю 40 Вт. Нормальний світловий потік лампи ЛД-

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

40 дорівнює $\Phi = 2340$ лм. Величиною i, індексом приміщення можна встановити залежність від площі приміщення й висоти підвісу:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)},$$

де $A = 7$м – довжина приміщення; $B = 5$м – ширина приміщення; h – висота підвісу;

$$h = H - h\text{р} - h\text{с},$$

де $H = 3{,}5$м – висота приміщення; $h\text{р} = 0{,}8$м – висота робочої поверхні;

$h\text{с} = 0{,}4$м – висота від стелі до нижньої частини лампи;

$h = 3{,}5 - 0{,}8 - 0{,}4 = 2{,}3$ м;

$$i = \frac{7 \cdot 5}{2{,}3 \cdot (7 + 5)} = 1{,}27$$

Коефіцієнт використання світлового потоку на розрахунковій площі $C = 0{,}3$. У підсумку число світильників вийде рівним:

$$N = \frac{300 \cdot 1{,}5 \cdot 20 \cdot 1{,}2}{2340 \cdot 0{,}3} = 1{,}5$$

Для штучного освітлення в робочому приміщенні достатньо використати 2 люмінесцентні лампи денного світла ЛД – 40, зі світловим потоком $\Phi = 2340$ лм кожна.

5.3 Заходи щодо нормалізації умов праці

Для усунення шкідливого впливу НРВ на організм інженерів-програмістів можна рекомендувати скоротити час перебування за екраном дисплея до 4 годин у зміну, причому після 2 годин безупинної роботи радиться 30-хвилинна перерва (бажано на відкритому повітрі).

З метою автоматичної підтримки параметрів мікроклімату в необхідних межах протягом всіх сезонів року, очищення повітря від пилюки і шкідливих речовин, зниження рівня іонізації в помешканні лабораторії провадиться вентиляція за допомогою двох витяжних вентиляторів типу АИСИ-4 і щоденне вологе прибирання.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Світильники розташовані в два ряди і під'єднані до різних фаз електромережі для усунення мерехтіння світлового потоку (коефіцієнт пульсацій менше 10%).

Для ослаблення шкідливого впливу електростатичних полів у лабораторії застосовуються захисні скляні фільтри (екрани) з електропровідним покриттям, що має відвід для заземлення, що прикріплюються на екран монітора.

Для зниження рівня шуму в лабораторії використовується шумопоглинаюче облицювання з перфорованим покриттям: гіпсові плити товщиною 7-9 мм із заповненням із склотканини.

5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в НС регламентується ПЛАС (ДНАОП 0.00-4.33-99). Основними складовими частинами ПЛАС є розробка технічних рішень та організація заходів щодо оповіщення, евакуації та дій персоналу при виникненні НС, а також визначення основних заходів з пожежної безпеки.

5.4.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи систем оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації

Розміри зон оповіщування, черговість оповіщування та час початку оповіщування людей в окремих зонах визначаються, виходячи з умов забезпечення безпечної та своєчасної евакуації людей у разі виникнення НС.

Оповіщування про НС та управління евакуацією людей здійснюється одним з наступних способів або їх комбінацією:

- поданням звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;

- трансляцією текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямок руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;

- трансляцією спеціально розроблених текстів, спрямованих на запобігання паніці й іншим явищам, що ускладнюють евакуацію;

- розміщенням знаків безпеки на шляхах евакуації згідно з ДСТУ ISO

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

6309;

- ввімкненням евакуаційних знаків "Вихід";

- ввімкненням евакуаційного освітлення та світлових покажчиків напрямку евакуації.

Кількість оповіщувачів, їх розміщення та потужність повинні забезпечувати необхідну чутність у всіх місцях постійного чи тимчасового перебування людей.

У місцях, де є небезпека механічного ушкодження оповіщувачів, повинен бути забезпечений їх захист, що не порушує працездатності оповіщувачів. Встановлення звукових та мовних оповіщувачів у виробничих приміщеннях повинно виключати можливість концентрації та нерівномірного розподілу звуку.

Оповіщувачі повинні підключатися до мережі без роз'ємних пристроїв і не мати регуляторів гучності. Сигнали оповіщення про пожежу повинні відрізнятися від сигналів іншого призначення. Комунікації системи оповіщення людей про пожежу можуть проектуватися суміщеними з радіотрансляційної мережею будівлі.

Електропостачання, заземлення, занулення, вибір та прокладання мереж оповіщення приймаються згідно з вимогами до систем пожежної сигналізації за ДБН В.2.5-13-98 (ДБН В.2.5-56-2010)"Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд".

Управління системою оповіщення слід передбачати з приміщення пожежного поста, диспетчерської або іншого спеціального приміщення. Вимоги до такого приміщення приймаються за аналогією з вимогами до приміщень чергового персоналу з ДБН В.2.5-56-2010.

5.4.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС

У разі виявлення ознак НС працівник, який їх помітив повинен:

- негайно повідомити про це засобами зв'язку органи МНС та пожежної охорони, вказати при цьому адресу, кількість поверхів, місце

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

виникнення пожежі, наявність людей, а також своє прізвище;

- повідомити про НС керівника, адміністрацію, пожежну охорону підприємства;
- організувати оповіщення людей про НС;
- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;
- вжити заходів щодо ліквідації наслідків НС з використанням наявних засобів.

Керівник та пожежна охорона установки, яким повідомлено про виникнення пожежі, повинні:

- перевірити, чи викликані підрозділи МНС;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію, та їх рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації НС;
- перевірити здійснення оповіщення людей про НС;
- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть участь у ліквідації НС;
- організувати зустріч підрозділів МНС та Державної пожежної охорони, надати їм допомогу у локалізації і ліквідації НС.

Після прибуття на НС підрозділів МНС та пожежної охорони повинен бути забезпечений безперешкодний доступ їх до місця, де виникла НС.

5.4.3 Пожежна безпека

Відповідно до НАПБ Б.07.005-86 (ОНТП24-86) робоче приміщення лабораторії відноситься до категорії В по вибухопожежній небезпеці. Відповідно до ПУЕ-87 та ДНАОП 0.00-1.32-01 клас робочих зон приміщення лабораторії по пожежонебезпеці - П-IIа. Можливими причинами пожежі в приміщенні є несправність електроустаткування, коротке замикання проводки, і порушення протипожежного режиму (використання побутових нагрівальних приладів, паління).

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

У зв'язку з цим, відповідно до вимог ПБЕ та ПУЕ, необхідно передбачити наступні заходи.

- постійний контроль стану засобів пожежогасіння;
- застосування автоматичних установок пожежної сигналізації;
- організація за допомогою технічних засобів, включаючи автоматичні, своєчасного оповіщення та евакуації людей.
- контроль за станом ізоляції струмоведучих дротів;
- заборонено паління в приміщенні;
- неприпустимість знаходження у приміщенні горючих і вибухонебезпечних речовин;
- допуск до роботи осіб, які в установленому порядку пройшли навчання, інструктаж і перевірку знань з пожежної безпеки.

Для гасіння пожежі в робочому приміщені лабораторії (клас пожежі „E"- наявність електрообладнання під напругою) використовуються вогнегасники ОП-1 — "Момент" (2 шт.). Додатково в коридорі розташовані вогнегасники ОХП-10. Також на сходовій клітці розташований пожежний кран. Така кількість первинних засобів пожежогасіння відповідає вимогам ДСТУЗБ 75-98 та ISO3941-77, якими передбачене обов'язкова наявність двох вогнегасників до 100 $м^2$ площі підлоги для приміщення типу конструкторське бюро.

Згідно вимог ДБН В.2.5-13-98 робоче приміщення лабораторії необхідно оснастити системою автоматичної пожежної сигналізації.

Будинок має два евакуаційних виходів: через головний хід і додатковий евакуаційний вихід. Шляхи евакуації відповідають установленим нормам. Двері відкриваються назовні. Коридор веде до двох сходових кліток, одна з яких виходить безпосередньо на вулицю, а друга має вихід на вулицю через вестибюль і головний вхід. Сходова клітка виконана з не пальних матеріалів. Сходи мають природне бічне освітлення і штучне евакуаційне освітлення. Сходові площадки ширше

А.М. Слободенюк, КІВРА 2015

коридорів. Усі співробітники ознайомлені з планом евакуації.

Дотримано усі вимоги ДБН В.1.1-7-2002 СНиП 2.09.02-85 по вогнестійкості будинку і ширині евакуаційних проходів і виходів із приміщень назовні. Значення основних параметрів шляхів евакуації приведені в табл.5.4.

У приміщенні є план евакуації. Мінімальний час евакуації в разі виникнення пожежі відповідає вимогам СНиП 2.01.02-85, а максимальне видалення робочих місць від евакуаційних виходів вимогам СНиП 2.09.02-85.

У приміщенні виконуються усі вимоги по пожежній безпеці відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2004 “Правила пожежної безпеки в Україні”.

Табл.5.4. Характеристики і норми еваковиходів

Параметр	Фактичне значення	Норма
Висота дверних прорізів	2,0 м	Не менше 2 м
Ширина дверних прорізів	0,8 м	Не менше 0,8 м
Ширина проходу для евакуації	Більше 1,5 м	Не менше 1 м
Ширина коридору	2 м	Не менше 2 м
Число виходів з коридору	2	Не менше 2
Ширина сходового маршу	1,2 м	Не менше 1 м
Висота поруччя сходів	1 м	Не менше 0,9 м

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

ВИСНОВОК

1. Використання електромагнітного поля високих та надвисоких частот для сушіння зерна та іншої сільськогосподарської продукції – це значний крок вперед в удосконаленні сушильних технологій, завдяки чому можна значно зменшити енергозатрати, скоротити час сушіння, підвищити якість продукту, повністю автоматизувати весь технологічний процес, мати високомобільне обладнання, яке можна використовувати будь-де, в тому числі безпосередньо на зернозбиральних комбайнах

2. Всі НВЧ сушарки, що пропонуються сьогодні вітчизняними та зарубіжними розробниками, умовно діляться на чотири групи: пристрої, в яких для нагрівання об’єкту сушки використовується лише електромагнітне поле при атмосферному тиску в активній зоні, вакуумні електромагнітні сушарки, комбіновані пристрої, в яких використовується електромагнітне поле та інші джерела тепла, при атмосферному тиску в робочій камері та комбіновані вакуумні сушарки. Найбільш економічними вважаються пристрої, що відносяться до останньої групи.

3. Зважаючи на сучасний стан розвитку НВЧ генераторів доцільно розвивати багатогенераторні пристрої, що працюють на спільне навантаження при мінімальному взаємному впливі.

4. Всі розглянуті конструкції сушарок мають недоліки: низька продуктивність, низька енергетична ефективність, так як більша частина енергії електромагнітного поля, що пройшла через шар насіння розсіюється в об’ємі робочої камери і поглинається її стінками, невеликий коефіцієнт корисної дії робочої камери.

5. Для підвищення коефіцієнта корисної дії робочої камери та однорідності розподілу щільності енергії електромагнітного поля необхідно забезпечити багаторазове проходження електромагнітної хвилі через об’єкт сушки.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

6. У вакуумних сушарках значного вдосконалення потребує система герметизації портів завантаження і розвантаження, які забезпечать безперервну подачу матеріалу в робочу камеру та мінімальний об'єм відкачки.

7. Так як фактично всі розглянуті сушарки мають суттєві недоліки не використання повного випромінювання електромагнітного поля і нерівномірний розподіл енергії поля, то необхідна розробка нових пристроїв в яких ці недоліки будуть вирішені.

8. Приведено принцип побудови трьох варіантів мікрохвильових установок для сушіння сипучих діелектричних матеріалів з концентрацією енергії електромагнітного поля в активній зоні від декількох (більше двох) джерел (магнетронів).

9. Для формування фронту хвилі і закону розподілу напруженості електричного поля (щільності енергії) по фронту хвилі в ближній зоні використовуються дзеркальні або лінзові пристрої. Так як активна камера має осьову симетрію N порядка, то дзеркальні відбивачі і прохідні лінзи мають циліндричну форму (коловий циліндр, параболічний циліндр, еліптичний циліндр і, відповідно, циліндричні лінзи).

10. Форма дзеркал і лінз в поперечному перетині впливає на розподіл напруженості електричного поля (щільності потужності) в поперечній площині фронту хвилі. Підбираючи форму дзеркала або необхідної лінзи можно досягти зазначеного розподілу енергії в поперечному перетині активної камери при відомій характеристиці спрямованості опромінювача (першоджерело електромагнітної хвилі).

11. Для можливості розрахунків розподілу напруженості електричного поля в розкриві дзеркала розглянуто теорію параболічних дзеркал і розрахунків основних параметрів їх.

12. Опромінююча структура є основним вузлом активної камери від якого залежить характер розподілу напруженості електричного поля і відповідно

А. М. Слободенюк. КІВРА 2015

щільності енергії як в поздовжньому (осьовому) напрямку, так і в поперечній площині.

13. В якості первинного випромінювача (опромінювача дзеркала або лінзи) вибрано прямокутний хвилевід з щілинами розташованими під кутом 45^{o} до осі хвилевода. Така форма щілин обумовлена тим, що поляризація електромагнітної хвилі, що входить в центральну частину активної камери, де розташований об'єкт опромінення, майже повністю відбивається від протилежної стінки камери, так як оболонка центральної частини активної камери виконана як відповідний поляризаційний діелектрик.

14. В процесі виконання розрахунків було з'ясовано, що для забезпечення циліндричного фронту хвилі (рівнофазність в напрямку паралельному осі хвилевода) і однорідності розподілу амплітуди напруженості електричного поля в цьому напрямку необхідно змінювати параметри щілин, а саме: довжину щілин, відстань між щілинами, відстань кожної окремої щілини від центра і інших конструктивних параметрів.

15. Виконуючи зміни зазначених вище конструктивних параметрів щілин і проводячи розрахунки параметрів фронту хвилі було досягнуто заданих параметрів фронту електромагнітної хвилі і, відповідно, зафіксовані конструктивні параметри опромінювача.

16. Розраховані таким чином характеристики спрямованості в поперечній площині опромінюючої структури використані для розрахунку розподілу поля в розкриві дзеркальних антен, дзеркала яких мають форму параболічного циліндра.

17. Проведені розрахунки розподілу напруженості електричного поля НВЧ сигналу безпосередньо в центральній зоні активної камери, що є сумою електромагнітних полів від декількох опромінюючих структур. Розрахунки проводились методом чисельного моделювання електродинамічних структур за допомогою програмних середовищ HFSS.

18. Крім структур, що мають осьову симетрію порядку N розглянуті прямокутні камери і опромінення їх з двох сторін з урахуванням відбитих

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

хвиль. В даному випадку формуючі розподіл поля структури, такі як дзеркала і лінзи відсутні. Сипучий діелектричний матеріал опромінюється безпосередньо хвилеводно-щілиним опромінювачем.

19. Результати розрахунків показали наступне: для плоско–паралельних камер шириною 300 нм з вісьмома опромінювачами забезпечено нерівномірність розподілу щільності енергії електромагнітного поля менше 4%. Для циліндричної камери з зовнішнім і внутрішнім діаметрами 600 мм і 400 мм відповідно з дванадцятьма опромінювачами забезпечено нерівномірність розподілу енергії електромагнітного поля не менше 5%, конструкція характеризується значно вищою стабільністю параметрів при змінні властивостей сировини та робочої частини.

20. Отримані параметри рівномірності розподілу поля в об’ємі активної камери значно перевищують відомі результати, досягнуті в відомих існуючих пристроях.

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

Список використаних джерел

1. Юсупова Г.Г. Методология косплексной системы обеззараживания зерна и продуктов его переработки: дис. докт. биолог. наук: 03.00.16 / Г.Г. Юсупова. – Красноярск, 2004. – 239с.
2. Коман О.А. Биологическая эффективность обеззараживания продуктов переработки зерна электромагнитным полем: дис. канд. биолог. наук: 03.00.16 /О.А. Коман. – Красноярск, 2004. – 138с.
3. Головина Т.А. Влияние энергии СВЧ-поля на фитопатогенный комплекс и качественные показатели зерна пшеницы: дис. канд. биолог. наук: 03.00.16 / Т.А.Головина. – Красноярск, 2004. – 158с.
4. Василенко А.В. Комплексная оценка влияния микроволнового нагрева на фитосанитарное состояние зерна ячменя / А.В. Василенко: дис. канд. с.-х. наук. 03.00.16. – Красноярск: 2009.
5. Касьяненко В.П. Обеззараживание зерна и комбикормов в поле СВЧ / В.П. Касьяненко: Автореф. канд. тех. наук. 05.18.12. – М.: 2002.
6. Goldblith, S.A., and D.I. C. Wang. 1967. Effect of microwaves on Escherichia coli and Bacilus subtilis // Appl. Environ. Microbiol. 15:1371-1375.
7. I. Woo, I. Rhee and H. Park. Differential damage in bacterial cells by microwave radiation on the basis of cell wall structure // Appl. Environ. Microbiol. – 2000. – Vol. 66(5). – pp. 2243-2246.
8. B. A. Welt, C. H. Tong, J. L. Rossen and D. B. Lund. Effect of microwave radiation on inactivation of Clostridium sporogenes (PA 3679) spores // Appl. Environ. Microbiol. – 1994, Vol. 60(2). – pp.482-488.
9. Kumar A. Nonthermal effects of electromagnetic fields at microwave frequencies // IEEE CCECE 2003. –2003. – Vol.1. – pp.285-288.
10. Рустам М., Чернов А. Для тривалого утримання зерна слід дезінфікувати електромагнітною обробкою // Хліб і зерно. – 2011. – №2. – с.23.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

11. Рожкова Т.О., Татаринова В.І., Дмитрівська А.О., Хоменко О. Порівняння ефективності методів фіто експертизи насіння озимої пшениці // Вісник СНАУ. Агрономія і біологія. – 2010. – Вип.4(19). С.56-60.
12. Dreyfuss M. S., Chipley J. R. Comparison of Effects of Sublethal Microwave Radiation and Conventional Heating on the Metabolic Activity of Staphylococcus aureus // Appl. Environ. Microbiol. – 1980. – Vol. 39. – No.1. – pp.13-16.
13. Shamis Y., Taube A., Mitik-Dineva N., Croft R., Crawford J., Ivanova E. Specific electromagnetic effects of microwave radiation on Escherichia coli // Appl. Eniron. Microbiol. – 2011. – Vol. 77. – No.9. – pp. 3017-3022.
14. Кузнецова Е. А., Корячкина С. Я., Хмелева Е. В. Применение хмелевого экстракта для повышения микробиологической безопасности зерна в процессе подготовки к производству зерновых хлебобулочных изделий // Фундаментальные исследования. – 2010. – №12. – с.100.
15. R. Yusupov, G. Yusupova. Влияние электромагнитного поля СВЧ на микроскопические грибы и их метаболиты // Motorization and energetics in agriculture. – Lublin. – 2004. – Vol. 6. – pp. 303-308.
16. Черепнев А., Черепнев И., Ляшенко Г. Использование импульсного электромагнитного излучения для обеззараживания зерновой смеси // Зб. наук. праць ХУПС. – 2008. – Вип. 2. – №17. – с. 53-55.
17. Rajagopal V. Disinfestation of stored grain insects using microwave energy: a thesis… of doctor of philosophy / V. Rajagopal. – Manitoba, 2009. – 197p.
18. Nelson S. O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control // Transactions of the ASAE. – 1996. Vol. 39. No. 4. – pp. 1475-1484.
19. Mishenko A., Malinin O., Rashkovan V., Basteev A., Bazyma L., Mazalov Yu., Kutovoy V. Complex high-frequency technology for

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

protection of grain against pests // JMPEE. – 2000. – Vol. 35. – No. 3. – pp. 179-184.

20. Ponamaryova I., Oyarzabal L., Sanchez E. Interaction of radio-frequency, high-strength electric fields with harmful insects // JMPEE. – 2009. – Vol. 43. – No. 4.
21. Цугленок Н. В. Формирование и развитие структуры электротермических комплексов подготовки семян к посеву: дис. докт. техн. наук: 05.20.02, 05.20.01 / Н.В. Цугленок. – Красноярск, 2000. – 378 с.
22. Шувар А. М. Вплив мікрохвильового опромінення насіння льону-довгунця у реалізації генетичного потенціалу сорту // Збірник наукових праць НУБПУ. – 2011. – №2 (162). – с. 71-74.
23. Чирков Л.И. Использование СВЧ-энергии для предпосевной обработки семян / А.И. Чирков, В.П. Богун // Нива Поволжья. – 2010. — №2 (15). — с. 36-39.
24. Цугленок Г.И. Исследование режимов предпосевной обработки семян эспарцета и козлятника / Г. И. Цугленок, Р. А. Зубова // Вестник КрасГАУ. – 2010. – №4. – с. 234-244.
25. Никифорова Л.Є. Електрофізичні способи підвищення врожайності в рослинництві / Л.Є. Никифорова, І.В. Кізім, ІО.О. Богатирьов та ін. // Праці ТДАТУ. — 2010. – Т. 10. – Вип. 10. – с.110-116.
26. Кушніренко О. Насіннєва продуктивність соняшнику залежно від передпосівної обробки мікрохвильовим полем // Вісник ЛНАУ. Агрономія. — 2009. — №9. — с. 230-233.
27. Полевик Н.Д. Влияние предпосевной СВЧ-обработки семян голозерных сортов ячменя на их продуктивность / Н.Д Полевик, В.М. Попов, В.А. Бидянов // Вестник КрасГАУ. – 201I. – №8. – с.223-226.
28. Курдюмов В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин // Ульяновск : УГСХА имени П.А. Столыпина, 2013.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

29. Пахомов, В.И. Параметры процесса сушки зерна с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты колебаний : дис. ... канд. техн. наук:05.20.01.–Зерноград,1988.–220с.

30. Патент №32568 Україна, МПК H05B 6 / 64 A01C 1/00. Пристрій для знезараження комбікормів та передпосівної обробки насіння у полі НВЧ [Текст] / Лобода О.І., Діордієв В.Т. – Бюл. №10, 2008 р.; опубл. 26.05.2008.

31. Патент №19550 Україна, МПК A01C 1/00. Мікрохвильовий пристрій передпосівної обробки насіння [Текст] / Калінін Л.Г., Моісєєва В.Ф., Маліновський В.В., Бошкова І.Л. Бюл. №12, 2007 р., опубл. 25.90.2007.

32. Патент №20271 Україна, МПК A01C 1/00. Пристрій для передпосівної мікрохвильової обробки насіння [Текст] / Іванченко В.О., Захрабов М.Н., Дзюба В.П., Федяєв С.М., Моргун Г.М. – Бюл. №1, 2007 р., опубл. 15.01.2007.

33. Патент №2158493 РФ, МПК[7] A01C 1/00. Устройство для предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур [Текст] / Юнусов Р.А., Воробьев Н.Г. опубл. 10.11.2010.

34. Патент № 2312479 РФ, МПК[7] A01C 1/00. Электротехнологическая установка [Текст] / Шахматов С.Н., Цуглёнок Г.И., Зубова Р.А.; - Бюл. №35, 2007 г., опубл. 20.12.2007.

35. Патент № 2083072 РФ, МПК[7] A01C 1/00. Устройство для СВЧ предпосевной обработки семян [Текст] / Роман О.А., пономарев Л.И., Попов В.В., Дергачев В.Ф. ЗАО «НИПО»; опубл. 10.07.1997.

36. Патент №2187920 РФ, МПК[7] A01C 1/00. Устройство для обработки семян [Текст] / Морозов Г.А., Воробьев Н.Г., Морозов О.Г., Седельников Ю.Е., Стахова Н.Е.; опубл. 27.08.2002.

37. Патент № 2143794 РФ, МПК[7] A01C 1/00. Способ для дезинсекции и дезинфекции материалов зернового происхождения и устройство для его осуществления [Тест] / Лысов Г.В.; - опубл. 10.01.2000.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

38. Пат. 4430806 США, МПК A24B 1/00 . Microwave agricultural drying and curing apparatus [Text] / Hopkins H.; – 06/319900; заяв. 10.11.1981; опубл. 14.02.1984.

39. Пат. 4468865 США, МПК A23L 3/54. Cold air microwave drying apparatus [Text] / Inagaki M. – № 06/304985; заяв. 23.09.1981; опубл. 4.09.1984.

40. Пат. 4637145 США, МПК F26B 5/04. Low pressure microwave drying apparatus [Text] / Sugisawa K., Matsumura Y., Taga K. – № 06/554861; заяв. 23.11.1983; опубл. 20.01.1987.

41. Пат. 22660 Україна, МПК F26B 3/00. Пристрій сушіння зерна [Текст] / Поспєлов Л.А. – № u200612954; заяв. 08.12.2006; опубл. 25.04.2007 бюл. № 5/2007.

42. Пат. 78343 Україна, МПКH05B 6/64. Надвисокочастотний пристрій для сушіння зерна [Текст] / Дохов О.І., Галеєв Е.Р., Лук'яненко М.Ю. – № a200501304; заяв. 14.02.2005; опубл. 15.03.2007, бюл. № 3/2007.

43. Пат. 4332091 США, МПК H05B 6/78. Microwave drying device for drying products in form of grains [Text] / Bensussan A., Azam G. – № 06/156465; заяв. 4.07.1980; опубл. 1.07.1982.

44. Пат. 4746968 США, МПК A23L 3/54. Combined microwave and thermal drying apparatus [Text] / Wear F., Heil G., Howard F. – № 07/031354; заяв. 30.03.1987; опубл. 24.05.1988.

45. Патент №65629 Україна, МПК A01C 1/00. Мікрохвильовий пристрій для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна та інших сипучих матеріалів [Текст] / Сидорук Ю.К. Бюл. №23, 2011 р., опубл. 12.12.2011.

46. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973.—416 с.

47. Геруни П. М. Вопросы расчета сферических двухзеркальных антенн//Радиотехника и электроника. — 1964. —Т. IX, № 1, С. 3—-12.

А. М. Слободенюк. КіВРА 2015

48. Лыков, А.В. Исследование процесса сушки в поле высокой частоты / А.В. Лыков, Г.А. Максимов // Тепло -и массообмен в капиллярно - пористых телах. - Л., М.: Госэнергоиздат, 1957. - С. 133-142.

49. Соколов В. А. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы/ В. А. Соколов, К. В. Яцеев // Lightwave. Russian Edition. — № 4. — 2006.— С. 44—46.

50. Nelson S. O. Measurement of microwave dielectric properties of particulate materials / S. O. Nelson // J. of Food Engineering. — 1994. — Vol. 21. Pp. 365—384.

51. Customer's acceptance specifications. 2M214-21GKH: Datasheet, Rev. 0. LG: 02.01.2008. Режим доступу: www.tda2000.ru/pic/foto/d/1/2M214-21.pdf.

А. М. Слободенюк, КіВРА 2015

ДОДАТКИ

А. М. Слободенюк, КВРА 2015

Додаток А

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

ПОГОДЖЕНО

Науковий керівник, доцент кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури НТУУ «КПІ»

_____ Ю.К.Сидорук

к.т.н., доцент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури НТУУ «КПІ»

_____ Є.А.Нелін

д.т.н., професор

Т Е Х Н І Ч Н Е З А В Д А Н Н Я

2 грудня 2014 р.

на виконання магістерської дисертації

з теми: «Система концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону від N джерел в одному об’ємі»

«The system concentration of electromagnetic fields from microwave N sources in one volume»

Київ 2014

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

1. Підстава для виконання роботи

Завдання на магістерську дисертацію

2. Термін виконання

Початок – 01.09. 2013 р.

Кінець – 1.05.2015 р.

3. Галузь використання

Агропромислові комплекси для сушки, знезараження і дезінсекції зерна.

4. Об'єкт дослідження

Система концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону від N джерел в одному об'ємі.

5. Предмет дослідження.

Система концентрації енергії від N джерел в одному об'ємі.

6. Мета роботи

Полягає в розробці і дослідженні систем концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону.

7. Приблизний зміст магістерської дисертації

Вступ

1. Огляд пристроїв для сушки сипучих матеріалів.
   1.1 Використання енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону для сушки різних матеріалів.
   1.2 Особливості процесу сушки сипучих матеріалів електромагнітним полем НВЧ діапазону.
   1.3 Існуючі пристрої для сушки зерна електромагнітним полем ВЧ та НВЧ діапазону.
   1.4 Критика існуючих пристроїв для сушки зерна електромагнітним полем та обґрунтування необхідності розробки нових пристроїв.

   Висновки до розділу 1.

2. Принципи побудови систем концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону.
   2.1 Основні переваги систем концентрації енергії від N малопотужних джерел.
   2.2 Розв'язка джерел, як основна вимога при побудові суматорів енергії електромагнітного поля.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

2.3 Можливі ваиріанти побудови систем концентрації енергії електромагнітного поля.

Висновки до розділу 2.

3. Теоретичні дослідження систем концентрації енергії електромагнітного поля .
   3.1 Теоретичний аналіз поляризаційних фільтрів.
   3.2 Теоретичний аналіз опромінюючих структур.
   3.3 Розрахунок систем розподілу поля.
   3.4 Розрахунок поля в зоні концентрації енергії електричного поля НВЧ діапазону.

   Висновки до розділу 3.

4. Конструктивна розробка систем концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону.
   4.1 Конструктивна розробка систем концентрації енергії з дзеркальними відбивачами.

Загальні висновки

8. Очікувані результати

В результаті проведення теоретичного аналізу поляризаційних фільтрів, теоретичного аналізу опромінюючих структур, розрахунку систем розподілу поля, розрахунку поля в зоні концентрації енергії електричного поля НВЧ діапазону розробили спрощену конструкцію системи концентрації енергії з дзеркальними відбивачами.

.9. Вихідні дані для проведення роботи та обґрунтування теми

Дана робота виконується вперше та проводиться за допомогою програмного середовища Ansoft HFSS.

При виконанні магістерської дисертації використовуються:

- фонди на паперових носіях та електронні повнотекстові бази (Науково-технічна бібліотека ім.Г.І.Денисенка НТУУ ”КПІ”)

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

10. Технічні вимоги до магістерської дисертації.

Дослідна робота проводиться за допомогою програмного середовища Ansoft HFSS.

Матеріали і розробки за темою мають бути виконані на достатньому науковому рівні та придатні для практичного використання у науково-технічній галузі, у тому числі в сфері агропромисловості.

Магістерська дисертація та інші текстові документи подаються на електронному і паперовому носіях за встановленими формами та відповідають сучасним нормам української наукової лексики і оформлюється відповідно до ДСТУ 3008-95 "Документація. Звіти у сфері науки і техніки".

11. Актуальність виконання дослідження

Все зібране зерно підлягає сушінню і контролю вологості протягом всього терміну зберігання. Існуючі способи і обладнання даного технологічного процесу, які широко застосовуються в агропромисловому комплексі України ґрунтуються на використанні гарячого повітря як носія тепла і природного газу, як палива. При цьому, передача тепла в кожній окремій зернівці відбувається від її поверхні до середини, і, відповідно, температура поверхневих шарів завжди більша ніж внутрішніх, а тиск пари направлений з зовні у середину, що значно ускладнює виділення вологи з внутрішньої частини зернівки, і неодмінно призводить до перегріву оболонки та зародку з одного боку, та збільшення енергозатрат з другого. До того ж, сушіння газом вимагає наявності газової мережі, дорогого і дефіцитного палива, має значну теплову інертність, що значно ускладнює контроль та автоматизацію технологічного процесу.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Альтернативним є спосіб, в якому в якості носія енергії використовується електромагнітне поле високої (ВЧ) або надвисокої (НВЧ) частоти. Енергія електромагнітного поля високої або надвисокої частоти перетворюється в тепло безпосередньо в середовищі, що підлягає сушінню. При цьому температура вища там, де більша вологість, в даному випадку в середині зернівки, тому і тиск пари в середині вищий, що обумовлює витіснення вологи з середини зернівки на зовні і, відповідно, підвищує ефективність процесу сушіння. Це ж стосується і всієї маси зерна, в якій енергія електромагнітного поля розподіляється у відповідності з розподілом вологості.

Подальшого зниження енергозатрат можна досягти, якщо опромінювати зерно при зниженому тиску повітря. Відомо, що при зниженні тиску до 0,1 атмосфери температура кипіння води знижується до ~ 49°С. При цьому енергозатрати на відкачування повітря з робочої камери значно менші ніж на процес сушіння, відсутні перегрів зерна та окислювальні процеси, які можливі при сущці гарячим повітрям. Останнє особливо важливе при сушінні ягід, фруктів, овочів, олійних культур та інших.

Електромагнітні сушарки мають високу мобільність. Вони можуть використовуватись скрізь, де є електромережа, а де її немає – з використанням дизельгенераторів, в тому числі і безпосередньо на комбайнах для попереднього зниження вологості зібраного зерна. Їх продуктивність може бути різноманітною – від найменших до найпотужніших, що використовуються на сучасних елеваторах. Завдяки відсутності інерції при зміні щільності потужності електромагнітного поля ефективність контролю і автоматизованого керування технологічним процесом значно підвищується, що робить його простим і зручним в експлуатації. Електромагнітні сушарки, як наукоємний продукт, безумовно мають велику перспективу і потенціал в розробці та удосконаленні..

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

12. Етапи магістерської дисертації і терміни їх використання

Шифр етапів	Назва етапів виконуваного завдання	Термін виконання		Чим закінчується етап
		початок	кінець	
01	Огляд пристроїв для сушки сипучих матеріалів. Принципи побудови систем концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону	15 вересня 2013 р.	15 квітня 2014 р.	Звіт магістра, 1 публікація
02	Теоретичні дослідження систем концентрації енергії електромагнітного поля	5 вересня 2014 р.	15 грудня 2014 р.	Звіт магістра, 2 публікації
03	Конструктивна розробка систем концентрації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону	15 лютого 2015 р.	1 травня 2015 р.	Звіт магістра
04	Представлення та захист результатів НДР	1 травня 2015 р.	30 червня 2015 р.	Магістерська дисертація

Термін виконання НДР: 01.09.13-1.05.15.

13. Перелік технічної документації, яка подається в кінці роботи

За темою науково-дослідної роботи магістрант має підготувати не менш 2-х публікацій (тез доповідей на науково-технічних конференціях або статей у фаховому журналі).

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

14. Порядок розгляду та приймання магістерської дисертації

Визначають порядок приймання магістерської дисертації:

- Написання магістерської дисертації
- Узгодження та затвердження магістерської дисертації із науковим керівником;
- Затвердження магістерської дисертації у завідуючого кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури;
- Представлення магістерської дисертації на попередній захист;
- Захист магістерської дисертації.

А. М. Слободенюк, КІВРА 2015

Виконавець
магістерської дисертації
студент гр. РВ-31м _____ Слободенюк А.М.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)