

Смердов А.А., доктор технічних наук, професор
Полтавська державна аграрна академія

Соколов С.Є., старший викладач,
Смердова Т.А., кандидат технічних наук
Національний університет "Львівська політехніка"

ВИКОРИСТАННЯ ПАСИВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ (ОГЛЯД)

Рецензент – доктор сільськогосподарських наук, професор А.А. Поліщук

Наведені приклади використання вимірювання пасивних електричних параметрів (електричного опору, ємності, імпедансу, діелектричної проникливості) у сільському господарстві. Зроблено аналіз отриманих у різних дослідженнях результатів. Показано перспективність використання визначення пасивних електричних параметрів для інструментальної об'єктивної оцінки якості сільськогосподарських продуктів та вивчення стану фізіологічних характеристик сільськогосподарських тварин і рослин у експерименті й на практиці.

Ключові слова: біоелектроімпедансометрія, біодіелектрометрія, якість продуктів, фізіологічні характеристики у сільськогосподарських тварин.

Постановка проблеми. Проблема якості продуктів сільськогосподарської діяльності та діагностика стану тварин і рослин завжди актуальна. На сучасному етапі розвитку сільського господарства все більшу роль відіграє застосування об'єктивних, інструментальних методів дослідження. Визначення пасивних електричних параметрів (ПЕП) із метою діагностики в останні десятиліття займає значне місце у цьому переліку [2, 21, 35]. Це насамперед: електропровідність (ЕП), яка є коефіцієнтом пропорційності між силою струму та різницею потенціалів у законі Ома; електричний опір (ЕО) – значення, обернене електропровідності; питома електропровідність (питома ЕП) і питомий електричний опір (питомий ЕО), які пов'язані з геометрією електродів та біооб'єкта; електрична ємність (ЕЄ), яка пов'язує електричний потенціал провідника з його електричним зарядом; біоелектроімпеданс (БЕІ) – повний опір, який враховує, що біологічна тканина має як електричний опір, так і електричну ємність; діелектрична проникливість (ДП) – коефіцієнт, що характеризує середовище між двома взаємодіючими електричними зарядами. Однак як розробникам, так і користувачам не вистачає узагальнюючої інформації про сучас-

ний стан біотехнічних систем сільськогосподарського призначення, що використовують ПЕП, а також аналізу їх недоліків, проблем і перспектив.

Аналіз основних досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. ПЕП більше ста років використовується для вирішення різних задач у біології та медицині, в тому числі у практиці сільського господарства [1, 2]. Однак оглядові публікації по даній тематичі стосуються або одного типу біологічних об'єктів [7, 11, 32], або переліку електричних властивостей біологічних тканин [23].

Мета і завдання досліджень – на конкретних прикладах показати імовірні напрями розвитку використання визначення ПЕП біологічних тканин у сільському господарстві з аналізом проблем та перспектив ПЕП.

Матеріали та методи досліджень. Матеріалом (предметом) досліджень є опубліковані дані про досвід використання визначення ПЕП біологічних тканин у практиці сільського господарства. Методом дослідження служить аналіз науково-методичної літератури у розрізі досліджуваної проблеми.

Результати досліджень. Використання ПЕП можна поділити на методики, що дають змогу контролювати якість сільгосппродуктів, і методики, які дають можливість оцінки стану важливих фізіологічних характеристик тварин та рослин.

Оцінка якості.

Роботами Тарусова [31], Thomasset [41, 42] та інших було доведено, що відношення значень біоелектричного імпедансу, що вимірюється на низькій (≤ 10 кГц) та високій (≥ 100 кГц) частотах змінного струму, дають цінну інформацію про стан біологічної тканини.

У роботі Ж. Шарпаньє зі співавторами [38] розглянуто відношення електричного імпедансу, що вимірювали на частотах 1 кГц (Z_1) та 100 кГц

(Z_{100}) синусоїдального струму у зв'язку з терміном збереження м'яса. Експерименти проводилися за допомогою приладу Thomasset [42]. Було експериментально показано, що значення

відношення $\frac{Z_1}{Z_{100}}$ через добу після забою розташовуються між 2 та 5, у залежності від

орієнтації електродів по відношенню до м'язових волокон. Після десяти діб зберігання при

+6°C значення $\frac{Z_1}{Z_{100}}$ падало в усіх пробах приблизно на 50%.

При заморожуванні м'яса відразу після забою на розморожуванні через тридцять діб

$\frac{Z_1}{Z_{100}}$ складало не більше 1,24% (в середньому 1,13).

У роботі зроблені висновки, що зниження відношення низько- та високочастотного імпедансів відбувається завдяки зменшенню повного опору на низькій частоті внаслідок структурних змін, що приводять до змін ємкісної дії біологічних мембран.

Наступні дослідження [19, 37] підтвердили результати та розширили перспективи використання ЕО для вивчення якості сільськогосподарської продукції.

Було показано можливості моніторингу якості продуктів харчування за допомогою портативних електроімпедансометрів. Розроблені та впроваджені спеціалізовані технічні засоби контролю картоплі, озимих зернових культур, фруктів [14]. Наведені експериментальні дані давали високу ефективність експрес-аналізу стану картоплі у періоди спокою та активізації [19]. Відібрані за допомогою індикатора "Тигран-ДИ" насінні картоплини показали підвищення врожайності в 4-5 разів.

Вчені з Німеччини [40] довели можливість використовувати значення електричного імпедансу для об'єктивної оцінки якості овочів, фруктів та риби. З цією метою автори запропонували прилад для потреб сільського господарства, який отримав високу оцінку на Лейпцигській ярмарці. Розробники запропонували використовувати замість двохчастотного вимірювача електроімпедансу короткий електричний імпульс, що спростило прилад і зменшило похибку вимірювання.

Індикатор "Тигран-ДИ" (та його попередня модифікація "Тигран-Д") дозволяє також визначати ступінь обмороженості саджанців фруктових і декоративних дерев, виноградної лози. Ця функція, що закладена у роботу пристрою, базується на даних багаторічних досліджень попередників [12, 15, 16, 22, 24].

Osterhant, 1922; Luyet, 1932 [цит. за 36] пока-

зали, що загибель клітин і тканин супроводжується різким зменшенням їх низькочастотного опору. Цей факт покладений в основу використання вимірювача електричного опору для визначення пошкодження й загибелі рослин від різних причин, в першу чергу, під дією холоду [36]. Дослідження проводилися за допомогою серійних вимірювальних мостів (ТМ-351, УМ-3) голчатими сталевими й нікелевими електродами на частоті 1,0 кГц синусоїдального струму. Дані, що отримані на озимих пшениці, житу та виноградній лозі, показали значну кількісну різницю (до 50%) між рослинами різного рівня стійкості до впливу холоду. Крім того, у роботі [2] наведені дані, що демонструють можливість за допомогою вимірювання ЕО оцінювати вплив на рослини високої температури та недостатності води (засухостійкості). Отримані таким чином дані можуть лягти в основу оцінки та вибору нових гібридів, які служать вихідним матеріалом у створенні господарських сортів рослин.

Діелектричну постійну широко використовують для визначення вологості сипких матеріалів і деревини [5-7]. Методики вимірювання базуються на значній залежності ВП від кількості води у зерні, зернобобових, кукурудзі. Визначення ЕС конденсатора в якості діелектрика, між пластинами якого розташовують зерно, дає можливість розрахувати кількість води. Вода у біоматеріалах знаходиться у вільній та зв'язаній формах, фізичні властивості яких суттєво відрізняються. Біодіелектричний метод при проведенні аналізу з різною температурою зразка дозволяє роздільне вимірювання вільної та зв'язаної води. На цьому принципі побудовано прилад для неруйнуючого контролю вологості. Абсолютна похибка, що наведена авторами, не перевищує 0,5% [17].

У львівському НВК "Мотом" розроблений і випускається вимірювач вологості зерна "Дніпро-3" [8]. При діапазонах вимірювання:

- для зернових культур 6-40%;
- для зернобобових та кукурудзи 6-40%;
- для продуктів переробки 9-16%,

допустимі значення абсолютної похибки вимірювання

- в діапазоні вимірювання 8-17% $\pm 1,0\%$;
- в діапазоні вимірювання 17-35% $\pm 1,5\%$;
- в діапазоні вимірювання 35-40% $\pm 2,5\%$.

Тривалість вимірювання не більше трьох хвилин. Прилад забезпечений методикою перевірки. Він може використовуватися на елеваторах, заготівельних підприємствах, млинах, великих хліборобних підприємствах під час заготівлі,

збирання та зберігання зерна пшениці, ячменю, жита, гречки, проса, вівса, кукурудзи, гороху, соняшника, ріпаку, сої.

Перспективним методом вимірювання вологості сільськогосподарських продуктів автори [27] називають НВЧ – надвисокочастотну вологометрію. Функціональна схема приладу складається з послідовно з'єднаних генератора НВЧ, випромінювача НВЧ, вимірювальної камери, до якої закладають досліджувані матеріал, приймача й тракту перетворення сигналу, що пройшов крізь вимірювальну камеру. Прилад працює на частоті 10 ГГц – оптимальній для зерна хлібних культур. Вологість розраховується за значеннями згасання потужності НВЧ-сигналу при проходженні крізь біомасу. Автори дають розрахунок похибки вимірювання, яка становить $< 1,0\%$ [28].

Оскільки вологість істотно впливає на режими зберігання та переробки зерна, визначає його вартість і масу при заготовках, використання біодіелектрометрії дає вкрай важливу інформацію як для виробника, так і для користувача.

Кондуктометрію, точніше, вимірювання питомої ЕП, використовують для визначення вмісту золи у цукрі [18]. На цьому принципі побудований лабораторний кондуктометр-золомер КЛЗ-1. Вимірювання проводять у спеціальній чотирьохелектродній кондуктометричній комірці з подальшим автоматичним перерахуванням отриманих значень електропровідності у значення вмісту золи. Діапазон вимірювання маси золи у відсотках до сухої маси – від 0,0018% до 0,9%.

Оцінка стану тварин і рослин.

Вимірювання міжелектродного імпедансу може бути використане у тваринництві для дослідження кровопостачання тканин [34].

У [33] наведено детальний аналіз даних імпедансної реографії, отриманих на вівцях та кролях. Дослідження проведені за допомогою стандартних двох- і чотирьохелектродною схемами. Частота вимірювального синусоїдального струму 100 кГц, сила струму 1-3 мА, площа вимірювальних електродів 3 см².

Результати експериментів якісно відповідають загальновідомим даним, отриманим на тканинах людини. Кількісні відмінності автори відносять на рахунок анатомічних особливостей тварин.

На базі біоелектроімпедансометрії запропоновано новий метод вивчення стану мікроциркуляції у м'яких тканинах тварин [29]. Він полягає у введенні до тканини тестуючої рідини з послідувальною реєстрацією динаміки очищення тканини від нього (визначення тканинного кліренсу). Цей процес здійснюється за допомогою вимірю-

вання електроімпедансу біологічної тканини у місті введення.

Експериментами на білих щурах доведено, що електроімпедансний метод дослідження дає змогу інструментально вивчати тканинний кліренс рідин із різними фізики-хімічними властивостями без використання радіоактивних речовин. Це, у свою чергу, відкриває можливість вивчати важливіші параметри мікроциркуляції: проникливість капілярів, швидкість локального кровотоку, дозволяє вивчати дію вазоактивних речовин на локальний кровоток [29].

Лабораторна техніка широко використовується у ветеринарії [2, 21, 26]. Серед численних методів своє місце у цьому переліку займає імпедансометрія. Як у всякому непрямому методі дослідження, перша і головна проблема його використання – відповідність вимірюваного параметра фізіологічній характеристиці, що визначається. Науковцями казанської школи були проведені найбільш об'ємні дослідження питомої ЕП великої рогатої худоби, свиней, вівців, кролів та мишей. Експерименти проводили за допомогою спеціально сконструйованих кондуктометра та комірки з електродами зі сталі марки 30Х13 [20]. Показано, що питома ЕП крові залежить від значення гематокрита (Ht), але відрізняється для різних типів тварин, що підтверджено у монографії [2]. Ця залежність добре описується виразом:

$$\text{питома ЕП} = V \cdot e^{\beta \cdot Ht}, \quad (1)$$

де V і β – коефіцієнти, які визначаються типом тварин. Коефіцієнт кореляції між значеннями, що отримані кондуктометричним та центрифужним методом за допомогою центрифуги "Целокрит-2" (Швеція), знаходяться у діапазоні 0,87-0,97.

У роботі також наведені криві взаємозалежності рівня гемоглобіну (Hb) та питомої ЕП обробленої кислотою крові.

Експериментально підтверджено, що перехід від візуального способу оцінки швидкості осідання еритроцитів (ШОЕ) до кондуктометричного відкриває можливість автоматизації та прискорення визначення ШОЕ.

У 1961 році у Литовській ветеринарній академії було розроблено спосіб визначення оптимального часу запліднення корів. Метод полягав у різниці електричного опору слизової піхви тварин. Далі метод був випробуваний у різних модифікаціях на коровах та свиноматках. Зроблено висновки, що, крім визначення часу запліднення метод може давати цінну інформацію при ранньому виявленні вагітності тварин. Причому ха-

рків'яни Ф. У. Осташко та С. В. Денисова запропонували проводити діагностику вагітності та безпліддя за електропровідністю проби цервікального секрету [32].

На жаль, більшість досліджень питомої ЕП проведена без урахування поляризаційних ефектів на низьких частотах вимірювального струму, що давало значну розбіжність результатів.

У сімдесятих роках минулого століття в інституті фізіології тварин, який займався розробками в області сільського господарства Англії, було виявлено, що визначення ЕП молока дає можливість проводити ранню діагностику маститів у корів [32]. Були розроблені спеціальні прилади для інструментальної діагностики маститів [13, 24, 25]. Показано, що електрофізичні параметри молока дають інформацію про його якість [7].

Водно-сольовий баланс організму тварин відіграє суттєву роль у підтриманні загального гомеостазу. Кількість рідини відрізняється для різних типів тканин і може значно коливатися при різних типах патології [3, 23]. Відомо, що кількість води у біологічних тканинах тісно пов'язана з їх ПЕП [35, 37].

У роботі [30] показана можливість використання визначення ЕО для оцінки ступеню гідратації підшкірної клітковини та м'язів у нормі й при штучному набряку у білих лабораторних щурів. Експерименти були проведені за допомогою голчатих електродів у широкому діапазоні частот. Результати експериментів підтвердили тісний взаємозв'язок пасивних електричних властивостей та гідратації тканин. Різниця в нормі та при штучному набряку складала, у середньому, ~ 24,5%. Аналогічні результати отримані у [4, 39].

Враховуючи можливість використання поверхневих, неінвазивних електродів і перспективу диференційованого визначення клітинної та позаклітинної води, імпедансний метод може бути корисним не лише в експерименті, а й у

практиці ветеринарії [41].

Прикладом широких можливостей практичного використання БЕІ може також служити застосування для дослідження фотосинтезу та дихання рослин у польових умовах [9, 10].

Висновки:

1. Короткий огляд свідчить, що використання ПЕП біологічних тканин можуть бути корисними у різноманітних галузях сільського господарства. Доцільною видається класифікація визначення ПЕП: методики для оцінки якості сільськогосподарської продукції; методики для визначення інформативних характеристик стану тварин і рослин в експерименті та на практиці. Практично всі ПЕП можуть бути використані для вирішення задач сільського господарства. Особливо корисними вони можуть бути при дослідженні процесів, при яких змінюється склад тканин. При цьому необхідно враховувати анатомічні, фізіологічні, біофізичні, біохімічні особливості досліджуваних біологічних об'єктів.

2. Привабливість використання ПЕП полягає у швидкості, неінвазивності, безпечності процедури вимірювання. Можливості сучасної техніки дозволяють проводити вимірювання з малою, наперед заданою похибкою. Об'єктивність отриманих даних досить важлива як у великих, так і в маленьких фермерських господарствах.

3. Впровадження спеціалізованих приладів, заснованих на ПЕП, доводять перспективність практичного застосування підходу, що обговорюється. Однак для його поширення для всіх нових приладів необхідно вибирати вимірювальні параметри, що дають змогу звільнитися від приелектродних (поляризаційних) явищ. Прилади повинні бути малогабаритними, легкими, простими у використанні та обов'язково забезпечені практичними методиками використання й перевірки.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Алейников А. Ф.* // Сб.: Приборы и системы управления и контроля сельского хозяйства. – Новосибирск, 1984. – С. 68-96.
2. *Андреев В. С.* Кондуктометрические методы и приборы в биологии и медицине. – М.: Медицина, 1973. – 336 с.
3. *Афонский С. И.* Биохимия животных. – М.: Высшая школа, 1960. – 160 с.
4. *Безуглов В. К.* О связи параметров вольтамперной характеристики тканей растений с показателями водного обмена в них // В сб.: Состояние воды и энергетический обмен растений. – Казань, 1975. – С. 102-113.
5. *Бензарь В. К.* Техника СВЧ-влагометрии. – Минск: Высшая школа, 1974. – 352 с.
6. *Берлинер М. А.* Измерения влажности. – М.: Энергия, 1973. – 402 с.
7. *Будзко И. А.* [и др.] Электрофизические параметры молока и разработка приборов для контроля качества // Вестник сельскохозяйственных наук. – 1974. – № 6. – С. 61-64.
8. Вимірювач вологості зерна "Дніпро-3". Проспект НВК "МОТОМ", Львів. <http://motom.com.ua/dnipro3.html>

9. *Вознесенский В. Л.* Кондуктометрический прибор для измерения фотосинтеза и дыхания растений в полевых условиях. – Л.: Наука, 1967. – 76 с.
10. *Вознесенский В. Л.* Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений. – М.-Л.: Наука, 1965. – 165 с.
11. *Гальмутдинов Р. Я., Тукушаитов Р. Х.* Электрические методы диагностики и терапии в ветеринарии. Методы электровоздействия в животноводстве. (Тематический указатель литературы.) – Казань, 1980. – 22 с.
12. *Голодрича П. Я., Осипов А. В.* Экспресс-метод и приборы для диагностики морозоустойчивости растений // Физиология и биохимия культурных растений. – 1972. – Т. 4. – Вып. 6. – С. 650-655.
13. *Губарь В. И., Грещенко Е. В.* Автоматический индикатор мастита у дойных коров // Сб.: Структурные методы повышения точности, чувствительности и бысродействия измерительных приборов и систем (тезисы докладов). – К., 1985. – С. 49.
14. Индикатор "Тигран-ДИ". Проспект фирмы "Медас", Москва. – 1 с.
15. *Китлаев Б. Н.* Биофизические критерии, характеризующие морозоустойчивость зерновых растений // Доклады ВАСХНИЛ. – 1971. – № 11. – С. 161-164.
16. *Китлаев Б. Н., Третьяков Г. И., Дубоносов Т. С., Айдиев А. Я.* Способ определения морозоустойчивости растений. – А. С. 488548 А61В 5/00. Бюллетень изобретений, 1975, № 39. – С. 21.
17. *Крушевский Ю. В., Сульян В. Я.* Полуавтоматический фазовый измеритель содержания капиллярной влаги в зерне // Тезисы докладов на республиканской НТК "Информатика и автоматизация в регионах". – Винница, 1988. – С. 107.
18. Лабораторный кондуктометр-золомер КЛЗ-1. Проспект фирмы "Медас", Москва. – 1 с.
19. *Лазарев И. З.* О возможности индикации периода покоя клубней картофеля и особенностей его протекания по кинетике электропроводности внутренней ткани // Физиология растений. – 1959. – Т. 6. – Вып. 5. – С. 579-584.
20. *Латыпов М. М.* Разработка кондуктометрических способов ускоренного определения ряда гематологических показателей у сельскохозяйственных животных. – Автореферат ... к.т.н. – Казань, 1990. – 20 с.
21. *Мейер Д., Харва Дж.* Ветеринарная лабораторная медицина. Интерпретация и диагностика / Пер. с англ. – М.: Софион, 2007. – 332 с.
22. *Мельницкий В. И., Бидюкова Г. Ф.* Определение относительной морозоустойчивости закаленных проростков озимой пшеницы методом регистрации электрического сопротивления // Физиология растений. – 1965. – Т. 12. – Вып. 4. – С. 688-693.
23. *Пресман А. С.* Электромагнитные поля и живая природа. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
24. *Романов В. М.* Разработка электрического метода и технических средств ранней диагностики мастита коров для молочно-промышленных ферм и молочных комплексов. – Автореферат ... канд. дис. – ВНЭСХ, 1979. – 21 с.
25. *Рязанский М. П.* Подсчет клеток в молоке с помощью скоростного автоматического счетчика // Лабораторное дело. – 1972. – № 5. – С. 312.
26. *Савицкий В. И., Рыкунов В. А., Клецев С. А.* Способ определения жизнеспособности биологических тканей. – А. С. № 942693 А61В 10/00 1980. – Бюлл. № 4. – С. 18.
27. *Синькоп Ю. С., Сатанівський В. В.* Проектування та розробка приладу вимірювача вологості сипучих матеріалів методом НВЧ // Електроніка і зв'язь. Тематичний випуск "Проблеми електроніки", Ч. 2. – 2008. – С. 183-186.
28. *Синькоп Ю. С., Сатанівський В. В.* Оцінка похибок приладу вимірювача вологості сипучих матеріалів методом НВЧ // Електроніка і зв'язь. – 2010. – № 4. – С. 96-98.
29. *Смердов А. А., Соколов С. Е., Смердова Т. А.* Електроімпедансний метод дослідження мікроциркуляції у тварин // Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2010. – № 1. – С. 151-153.
30. *Ступко А. И., Шейман Е. С., Соколов С. Е.* Вольт-амперные характеристики тканей крыс при декстрановом отеке // В кн.: Всесоюзная конференция по физиологии почек и водно-солевого обмена. – Новосибирск, 1981. – С. 257-258.
31. *Тарусов Б. Н., Кольс О. Р.* Биофизика. – М.: Высшая школа, 1968. – 468 с.
32. *Тукушаитов Р. Х., Гильмутдинов Р. Я.* Применение электрических методов для диагностики функционального состояния репродуктивных органов сельскохозяйственных животных (методические рекомендации). – Казанский ветеринарный институт – Казань, 1980.
33. *Тукушаитов Р. Х., Гарифуллин Р. Л.* Об импедансной структуре межэлектродной ткани и ее влиянии при оценке реографических показателей // Ученые записки Казанского ветеринарного института им. Н. Э. Баумана. – 1977. – Т. 128. – С. 62-66.
34. *Тукушаитов Р. Х., Новошинов Г. П.* Биофизи-

- ческие основы и техника ветеринарной реовазографии. – Казань, 1975. – 44 с.
35. *Федишин Я. І.* Фізика з основами біофізики. – Львів: Світ, 2005. – 542 с.
36. *Федорова Г. М.* Влияние отрицательных температур на низкочастотное электрическое сопротивление озимой пшеницы и ржи // Физиология растений. – 1965. – Т. 12. – Вып. 4. – С. 688-693.
37. *Хасцев Б. Д.* Основы мониторинга продуктов питания импедансными бактометрами // Медицинская техника. – 1996. – № 5. – С. 41-43.
38. *Charpentier J., Goutefongea R., Sale P., Thomasset A.* La discrimination des viandes fraiches et congelees par mesures d'impedance a deux frequences // Ann. Biol. anim. Bioch. Biophys – 1972. – № 12(1). – P. 173-178.
39. *Hart Francis X.* The extremely low frequency electrical properties of plout stems // Bioelectromagnetics, 1985, V. 6, № 3, P. 243-256.
40. In-situ Qualitätsbewertung von biologischen Geweben, Lizenzen, Karl-Marx Universität, Leipzig. Sale P. Augmentation de la conductivite electrique des viandes consecutives on processus de condelation – decondelation // C. R. Acad. Sci., Paris, 1969, 269, serie D, 2136-2139.
41. *Thomasset A.* Proprieties bioelectriques des tissus. Mesure de l'impedance en clinique // Lyon Med. – 1962 – № 28. – P. 107-109.
42. *Thomasset A.* Methode et appareil pour mesure de l'impedance des tissus biologiques. Bioelectrodes // Brevet France et étranger, № 1344-459. – P. 7.

УЗАГАЛЬНЕННЯ МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ МЕХАНІКИ ДЕФОРМУВАННЯ БРУСІВ

ПОВІДОМЛЕННЯ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ

Рецензент – доктор технічних наук, професор В.П. Дмитриков

Подано теоретичні передумови методів початкових та кінцевих параметрів, а також прямого методу граничних елементів в одновимірних задачах механіки деформування брусів. Для випадку лінійного неоднорідного рівняння n -го порядку із самоспряженим диференціальним оператором побудовано загальний розв'язок, який є спільною основою для отримання вихідних рівнянь згаданих методів розрахунку. Теоретичні співвідношення одержані, виходячи із загальних властивостей лінійних диференціальних рівнянь. Для побудови розв'язків використовуються узагальнені функції Гріна.

Ключові слова: лінійний диференціальний оператор, дельта-функція, функція Хевісайда, узагальнена функція, функція Гріна

Постановка проблеми. Визначення компонентів напружено-деформованого стану в межах численних моделей деформування брусів зводиться до розв'язання одновимірної крайової задачі. Ефективним підходом до розв'язання такого роду задач є різні аналітичні методи розрахунку, такі як метод початкових параметрів, метод граничних елементів та метод кінцевих параметрів. Тому важливою є розробка й узагальнення таких методів для нових моделей деформування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. Найбільш широко використовується метод початкових параметрів, приклади застосування якого зустрічаються практично в будь-якій літературі з опору матеріалів чи будівельної механіки. Менш розповсюджене використання одновимірного варіанту прямого методу граничних елементів, застосування якого для розв'язання задач згину брусів, описане в [1, 5]. І, практично маловідомий метод кінцевих параметрів, що описаний для першого кроку ітераційної зсувної моделі згину композитних брусів у роботі [2]. Всі ці методи є аналітичними і дають змогу отримувати точні розв'язки крайових задач. Однак відсу-

тність спільного підходу в отриманні рівнянь згаданих методів стає проблемою при спробі розробити ті чи інші методи для нових моделей деформування або для нових типів інженерних конструкцій.

Мета і завдання досліджень. Розробка загального підходу для побудови аналітичних методів розрахунку нових задач механіки деформування брусів.

Матеріали і методи досліджень. Теоретичне дослідження властивостей лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь довільного порядку з використанням апарату теорії узагальнених функцій.

Результати досліджень. У загальному випадку розв'язання різноманітних задач механіки деформування брусів може бути зведене до визначення функції переміщень. Це пояснюється тим, що з функцією переміщень пов'язана решта параметрів деформування, як кінематичних, так і статичних, тому немає необхідності визначати їх окремо. При цьому в більшості випадків визначення функції переміщень $y(x)$ зводиться до розв'язку лінійного неоднорідного диференціального рівняння з постійними коефіцієнтами [5]

$$a_0 y^{(n)}(x) + a_1 y^{(n-1)}(x) + \dots + a_n y(x) = \Omega(x),$$

або $L[y] = \Omega(x)$, (1)

де $L[\] = \frac{d^n}{dx^n}[\] + \frac{d^{n-1}}{dx^{n-1}}[\] + \dots + \frac{d^0}{dx^0}[\]$ – лінійний диференціальний оператор, породжений лівою частиною рівняння (1), $\Omega(x)$ – функція збурення, безперервна на розглядуваному проміжку (x_0, x_1) .

Зауважимо, що до розв'язання рівняння типу (1) можуть бути зведені й системи лінійних диференціальних рівнянь, як це, наприклад, зроблено у [2] для кроку m ітераційної зсувної моделі згину композитних брусів.

У контексті механіки пружних стержнів, права частина рівняння (1) є ніщо інше як зовнішнє, прикладене до бруса, навантаження, а постійні коефіцієнти при похідних шуканої функції виражають характеристики жорсткості перерізу бруса або, у відповідних задачах, характеристики пружної основи.

Розглянемо детальніше праву частину рівнянь. Розіб'ємо проміжок (x_0, x_1) точками s_i ($i = 0, 1, \dots, n$) на m рівних ділянок довжиною Δs і в межах кожної ділянки $(s_i < x < s_{i+1})$ замінимо функцію $\Omega(x)$ рівнодійною зосередженою силою

$$\Omega_i(x) = F_i p_m(x, \xi_i), \quad (2)$$

де F_i – інтенсивність рівнодійної навантаження $\Omega(x)$, розподіленого в межах ділянки (s_i, s_{i+1}) , а $p_m(x, \xi_i)$ – функція розподілу одиничного навантаження.

Функція $p_m(x, \xi_i)$ у цілому є довільною і повинна дорівнювати нулю на всьому проміжку (x_0, x_1) , окрім ε -околиці точки $x = \xi_i$, $\xi_i \in (s_i, s_{i+1})$, де є безперервною і має постійний знак. Причому:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_m(x, \xi_i) dx = 1. \quad (3)$$

Вважаємо (3) справедливим за будь-якого додатного ε , такого, що $\varepsilon \rightarrow 0$ при $\Delta s \rightarrow 0$.

Оскільки $F_i = \int_{s_i}^{s_{i+1}} \Omega(x) dx$, то, використовуючи теорему про середнє, вираз (2) перетвориться наступним чином:

$$\Omega_i(x) = p_m(x, \xi_i) \int_{s_i}^{s_{i+1}} \Omega(x) dx = p_m(x, \xi_i) \Omega(\zeta_i) \Delta s, \quad \zeta_i \in (s_i, s_{i+1}). \quad (4)$$

Тоді у деякому наближенні функція розподіленого навантаження в правій частині рівняння (1) запишеться так:

$$\Omega(x) \approx \sum_{i=1}^m \Omega_i(x) = \sum_{i=1}^m \Omega(\zeta_i) p_m(x, \xi_i) \Delta s. \quad (5)$$

Таким чином, рівняння (2) можна записати у наступному вигляді:

$$L[y] = \sum_{i=1}^m \Omega(\zeta_i) \Delta s p_m(x, \xi_i). \quad (6)$$

Відповідно до принципу суперпозиції, якщо y_i є розв'язком рівняння

$$L[y_i] = p_m(x, \xi_i), \quad (7)$$

то розв'язком рівняння (6) є:

$$y(x) = \sum_{i=1}^m \Omega(\zeta_i) \Delta s y_i(x, \xi_i). \quad (8)$$

Фізичний зміст запису (8) в опорі матеріалів відомий як принцип незалежності дії сил і полягає в тому, що розподілене за певним законом навантаження можна замінити відповідною сукупністю елементарного навантаження, а переміщення, спричинені всім цим навантаженням, розглядати як суму (суперпозицію) елементарних переміщень, спричинених кожним окремо взятим елементарним зусиллям.

Наведений вираз (8) є наближеним розв'язком рівняння (1), і ступінь його наближення до точного

зростає при збільшенні кількості ділянок m . Якщо інтегральна сума $\sum_{i=1}^m \Omega(\xi_i) \Delta s y_i(x, \xi_i)$ є збіжною на ділянці (x_0, x_1) і має похідні n -го порядку, то при $m \rightarrow \infty$ можливий граничний перехід:

$$y(x) = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^m \Omega(\xi_i) y_i(x, \xi_i) \Delta s = \int_{x_0}^{x_1} \Omega(s) y^*(x, s) ds, \quad (9)$$

де $y^*(x, s)$ – розв’язок рівняння (7), при $m \rightarrow \infty$.

Вираз (9) є вже точним розв’язком неоднорідного диференціального рівняння (2) при $x = s$.

Розглянемо рівняння (7). При $m \rightarrow \infty$, Δs прагне до нуля, тож $\varepsilon \rightarrow 0$, а $\xi_i \rightarrow s$. Тоді, з урахуванням вказаних властивостей функції $p_m(x, \xi_i)$, розв’язок $y^*(x, s)$ повинен задовольняти однорідному рівнянню

$$L[y^*] = 0 \quad (10)$$

на всьому проміжку (x_0, x_1) за винятком точки $x = s$, де він є, власне кажучи, невизначеним.

Отримання розв’язку $y^*(x, s)$, як функції Гріна лінійного диференціального рівняння другого порядку, при заданих крайових умовах показане, наприклад, у [4]. А у [5] наведений метод визначення функції Гріна, що відповідає однорідним початковим умовам Коші для рівняння n -го (1).

Більш загальним підходом визначення розв’язку $y^*(x, s)$ вважаємо розгляд рівняння (10) в сенсі узагальнених функцій. Загальним вимогам, накладеним на функцію $p_m(x, \xi_i)$, при деякій зміні системи координат, задовольняють різноманітні дельтоподібні послідовності, наведені у [3]. Тож, дослідимо дану функцію при необмеженому збільшенні кількості ділянок m .

Розглянемо згортку функції $p_m(x, \xi_i)$ з деякою безперервною функцією $\varphi(x)$. Застосовуючи теорему про середнє, з урахуванням вказаних властивостей функції $p_m(x, \xi_i)$, отримаємо:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_m(x, \xi_i) \varphi(x) dx = p_m(\eta_i, \xi_i) 2\varepsilon \varphi(\eta_i) = \varphi(\eta_i) \int_{\xi_i - \varepsilon}^{\xi_i + \varepsilon} p_m(x, \xi_i) dx = \varphi(\eta_i),$$

де $\eta_i \in (\xi_i - \varepsilon; \xi_i + \varepsilon)$.

Переходячи, до межі $\lim_{m \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_m(x, \xi_i) \varphi(x) dx = \lim_{m \rightarrow \infty} \varphi(\eta_i)$, отримаємо: $\int_{-\infty}^{\infty} p_m(x, s) \varphi(x) dx = \varphi(s)$. Да-

ний вираз є лінійним функціоналом, що за визначенням є δ -функцією Дірака зосередженою в точці s , тобто $\delta(x - s)$ [4].

Таким чином, отримання функції $y^*(x, s)$ зводиться до розв’язання рівняння

$$L[y^*] = \delta(x - s). \quad (11)$$

Загальний розв’язок такого рівняння запишеться таким чином:

$$y^* = y_0^* + y_+^*, \quad (12)$$

де y_0^* – загальний розв’язок рівняння без правої частини, y_+^* – деякий частковий розв’язок неоднорідного рівняння.

Загальний розв’язок (12) є узагальненою функцією Гріна диференціального рівняння (1), а частковий y_+^* – частковою узагальненою функцією Гріна (сингулярна частина) [4]. Відповідно до (12) існує

безліч функцій Гріна. Всі вони будуть відрізнятися на складову y_0^* , що є розв'язком відповідного однорідного рівняння, і вигляд якої залежатиме від прийнятих умов. Отже, використовуючи (11), можна отримати як загальний, так і частковий розв'язок рівняння (1), що відповідатиме прийнятим при визначенні функції Гріна крайовим умовам.

Переходячи до конкретних прикладів, легко зрозуміти фізичний зміст функції Гріна $y^*(x, s)$. Наприклад, при розгляді чистого згину брусів із прямою віссю $y^*(x, s)$ є функцією вертикальних переміщень перерізів при дії одиничного зосередженого навантаження $q(x) = 1 \cdot \delta(x, s)$, прикладеного в точці $x = s$.

Покажемо особливість функції Гріна як узагальненого розв'язку рівняння (11). Замінімо x на s у (11) $Z[y^*] = \delta(s - x)$, де $Z[\] = \frac{\partial^n}{\partial s^n}[\] + \frac{\partial^{n-1}}{\partial s^{n-1}}[\] + \dots + \frac{\partial^0}{\partial s^0}[\]$. Проте δ -функція є парною [4], тож $\delta(s - x) = \delta(-(x - s)) = \delta(x - s)$. Відповідно маємо:

$$\delta(s - x) = \delta(x - s) = Z[y^*] = L[y^*]. \quad (13)$$

Отже, відповідно до (10), розв'язок рівняння (1) в загальному випадку можна отримати його згортою з узагальненою функцією Гріна $y^*(x, s)$. Однак це буде частковий розв'язок $\tilde{y}$, що задовольнятиме крайові умови функції $y^*(x, s)$. Будь-який інший частковий розв'язок відрізнятиметься від даного на y_0 – розв'язок рівняння (1) без правої частини.

Відповідно до (9) маємо

$$\begin{aligned} \tilde{y}(x) = & \int_{x_0}^{x_1} \Omega(s) y^*(x, s) ds = \int_{x_0}^{x_1} \left(a_0 y^{(n)}(s) y^*(x, s) + a_1 y^{(n-1)}(s) y^*(x, s) + \dots \right. \\ & \left. \dots + a_n y(s) y^*(x, s) \right) ds \end{aligned} \quad (14)$$

Інтегруємо за частинами перший доданок n раз, другий – $(n - 1)$ і т.д., а останній доданок залишаємо без змін. Зводячи подібні, отримаємо:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(x) = & y^{(n-1)}(s) a_0 y^*(x, s) \Big|_{x_0}^{x_1} - y^{(n-2)}(s) \left(a_0 \frac{\partial}{\partial s} y^*(x, s) - a_1 y^*(x, s) \right) \Big|_{x_0}^{x_1} + \dots \\ & \dots + y(s) \left(a_0 \frac{\partial^n}{\partial s^n} y^*(x, s) - a_1 \frac{\partial^{n-1}}{\partial s^{n-1}} y^*(x, s) + \dots + a_n y^*(x, s) \right) \Big|_{x_0}^{x_1} + \int_{x_0}^{x_1} y(s) \bar{Z}[y^*] ds, \end{aligned} \quad (15)$$

де $\bar{Z}$ – диференціальний вираз, спряжений оператору Z .

Розглянемо випадок, коли порядок рівняння (1) – парний, а коефіцієнти при непарних похідних дорівнюють нулю: $a_1, a_3, \dots, a_{n-1} = 0$. Тоді рівняння (1) матиме наступний вигляд:

$$a_0 y^{(n)}(x) + a_2 y^{(n-2)}(x) + \dots + a_n y(x) = \Omega(x). \quad (16)$$

Ліва частина такого рівняння є самоспряженим диференціальним виразом, особливістю якого є рівність спряжених операторів $\bar{L} = L$ [4].

Для рівняння (16) з урахуванням (15) можемо записати:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(x) = & y^{(n-1)}(s) a_0 y^*(x, s) \Big|_{x_0}^{x_1} - y^{(n-2)}(s) a_0 \frac{\partial}{\partial s} y^*(x, s) \Big|_{x_0}^{x_1} + \dots \\ & \dots + y(s) \left(a_0 \frac{\partial^n}{\partial s^n} y^*(x, s) + \frac{\partial^{n-2}}{\partial s^{n-2}} y^*(x, s) + \dots + a_n y^*(x, s) \right) \Big|_{x_0}^{x_1} + \int_{x_0}^{x_1} y(s) \bar{Z}[y^*] ds. \end{aligned} \quad (17)$$

Зважаючи на (13), можемо записати $Z[y^*] = \delta(s - x)$. Оскільки $\bar{Z} = Z$, інтеграл у правій частині

виразу (17) буде дорівнювати: $\int_{x_0}^{x_1} y(s) \delta(s-x) ds = y(x)$.

Таким чином маємо

$$y(x) - \tilde{y}(x) = -y^{(n-1)}(s) a_0 y^*(x, s) \Big|_{x_0}^{x_1} + y^{(n-2)}(s) a_0 \frac{\partial}{\partial s} y^*(x, s) \Big|_{x_0}^{x_1} + \dots \\ \dots + y(s) \left(a_0 \frac{\partial^n}{\partial s^n} y^*(x, s) + \frac{\partial^{n-2}}{\partial s^{n-2}} y^*(x, s) + \dots + a_n y^*(x, s) \right) \Big|_{x_0}^{x_1}. \quad (18)$$

Однак різниця загального та часткового розв'язку лінійного диференціального рівняння, є розв'язок відповідного однорідного рівняння $y_0(x) = y(x) - \tilde{y}(x)$.

Маючи деякий частковий розв'язок у вигляді (9) та розв'язок однорідного рівняння у вигляді (19), можемо побудувати загальний розв'язок рівняння (1):

$$y(x) = \sum_{j=1}^n (-1)^j y^{(n-j)}(s) \left(\sum_{i=1}^j \theta((-1)^{i-1}) a_{i-1} \frac{\partial^{j-i}}{\partial s^{j-i}} y^*(x, s) \right) \Big|_{x_0}^{x_1} + \int_{x_0}^{x_1} \Omega(s) y^*(x, s) ds, \quad (19)$$

де $\theta((-1)^{i-1})$ – функція Хевісайда, яка виключає складові, що відповідають непарним похідним у рівнянні (1) і приводить розв'язок у відповідність до рівняння (16).

У такому вигляді (19) відповідає вихідному виразу прямого методу граничних елементів для рівняння (16). Як бачимо, вираз (19) містить $2n$ невідомих у вигляді значень функції та її похідних у точках із координатами x_0, x_1 , але при підстановці відповідної узагальненої функції Гріна $y^*(x, s)$ кількість невідомих у (19) можна зменшити до n , залежно від крайових умов, прийнятих при її визначенні. Із безлічі варіантів функцій Гріна, що можуть бути отримані при розв'язанні відповідного рівняння (11), можна виокремити декілька особливих випадків.

Якщо при розв'язуванні рівняння (11) були прийняті однорідні умови на кінці проміжку, то при підстановці такої функції Гріна до виразу (19) буде отриманий загальний розв'язок рівняння (16), залежний лише від умов на початку проміжку, що відповідає методу початкових параметрів. Якщо при визначенні функції Гріна прийняті однорідні умови на початку проміжку, то буде отримано вираз, залежний лише від умов на кінці проміжку, що відповідає методу кінцевих параметрів.

Висновки. Розроблено загальний підхід до розв'язання задач механіки деформування брусів для класу задач, що зводяться до розв'язання диференціальних рівнянь із самоспряженими диференціальними операторами. До цього класу задач відносяться практично всі види деформацій призматичних брусів. Загальний розв'язок у вигляді виразу (19) є базовим для отримання вихідних рівнянь того чи іншого аналітичного методу розрахунку. Застосування даного підходу до рівнянь, що містять похідні непарного порядку (із не самоспряженими диференціальними операторами), приводить до інтегральних рівнянь. Тому для задач, що зводяться до розв'язання рівнянь із не самоспряженими диференціальними операторами, потрібні інші підходи.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Бенерджи П. Методы граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
2. Горик О.В. Механіка деформування композитних брусів / О.В. Горик, В.Г. Піскунов, В.М. Чередніков. – Полтава-Київ: АСМІ, 2008. – 402с.
3. Кеч В. Введение в теорию обобщенных функций с приложениями в технике / В. Кеч, П. Теодореску; пер. с рум. О.Е. Булгару; под ред. Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1978. – 518 с.
4. Неймарк М.А. Линейные дифференциальные операторы / М.А. Неймарк. – М.: Наука, 1969. – 528с.
5. Строительная механика. Специальный курс. Применение метода граничных элементов / В.А. Баженов, В.Ф. Оробей, А.Ф. Дашенко [и др.] – Одесса: Астропринт, 2001. – 288 с.

УДК 621.548

© 2011

*Смердов А.А., доктор технічних наук, професор,
Бульба Є.М., асистент, здобувач**

Полтавська державна аграрна академія

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШВИДКОСТІ ВІТРУ В РЕГІОНІ м. ПОЛТАВИ

Рецензент – доктор технічних наук, професор Г.М. Кожушко

Проведено аналіз проблематики впровадження відновлюваних джерел енергії в аграрно-промисловий комплекс. Обґрунтована доцільність використання вітрових установок малої та середньої потужностей для задоволення сільськогосподарських потреб. Розглянутий датчик напрямку та швидкості вітру ДВ-160 і програмне забезпечення для роботи з ним. Проведена статистична оцінка характеристик швидкості вітру за липень-серпень 2009 року. Обрахована середня швидкість вітру на висоті 30 м та визначений її зв'язок зі швидкістю вітру на висоті флюгера. Розраховані коефіцієнти для розподілу Вейбула, що дає змогу оцінити вітровий потенціал регіону м. Полтава.

Ключові слова: швидкість вітру, датчик вітру, вітрогенератор, аграрно-промисловий комплекс, розподіл Вейбула, відновлювані джерела енергії.

Постановка проблеми. Аграрно-промисловий комплекс України тяжіє до використання ресурсоемних технологій, тому наразі постає питання про впровадження нетрадиційних джерел енергії. Одним із таких джерел може бути вітроенергетика. В системі відновлюваних джерел енергії вітроенергетика посідає одне з провідних місць, набуваючи в останні роки все більших масштабів у країнах Європи. Головним критерієм впровадження вітроелектричних установок (ВЕУ) та застосування їх на місцевості є оцінка вітрового потенціалу даного регіону – визначення статистичних характеристик швидкості вітру за певний період часу. Таким чином, постає проблема точного вимірювання швидкості вітру та аналізу вітрового потенціалу не тільки для певного регіону в цілому, а й локально – для конкретних господарств.

Аналіз основних публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. Кабінетом Міністрів України прийнята програма з розширення аграрно-промислового комплексу; в бюджет закладені додаткові кошти на розвиток продукції

сільського господарства та тваринництва. Це, в свою чергу, вимагає значних затрат енергетичних ресурсів. Тому актуальним стає питання про доцільність впровадження відновлюваних джерел енергії в аграрний і промисловий комплекси [2]. Україна має значний вітровий потенціал, саме тому значну увагу варто приділити розвитку вітроенергетики [1]. Назріло питання доцільності побудови вітрогенераторів та їх ефективне застосування [3]. Крім того в Україні прийнятий закон для стимулювання розвитку вітроенергетики [4]. Таким чином, значна увага приділяється нині оцінці вітрового потенціалу місцевості для ефективного впровадження вітрогенераторів [5].

Мета і завдання роботи. Мета роботи полягає у визначенні швидкості вітру та його статистичних характеристик для м. Полтава на основі комп'ютерної системи збору даних. Завдання роботи полягає у розрахунку параметрів та коефіцієнтів для статистичної оцінки даних розподілом Вейбула.

Апаратура і метод дослідження. У Полтавській державній аграрній академії (49°35'44,32" широти, 34°33'13,13" довготи) була встановлена вітроенергетична установка FA-3.1/200 з датчиком вітру ДВ-160. Вітрогенератор розрахований на вироблення енергії при номінальній потужності 800 Вт в обсязі 120-250 кВт·Ч у місяць. Датчик вітру має діапазон вимірюваних швидкостей від 0,2 до 60,0 м/с із дискретністю вимірювання 0,1 м/с, дозволяє виставляти крок вимірювання 2-120 с та дає змогу передавати дані на персональний комп'ютер за допомогою розробленого програмного забезпечення.

Використання подібних установок малої потужності дає можливість задовольнити потреби невеликих аграрних господарств і, як свідчить аналіз публікації, цей напрям є перспективним і ефективним. Для аналізу статистичних характеристик вітру необхідно використовувати функції математичної статистики [7, 8].

* Кривник – доктор технічних наук, професор А.А. Смердов

Для вимірювання швидкості вітру був узятий датчик вітру ДВ-160, апаратно поєднаний із персональним комп'ютером, на якому встановлена програма збору та первинної обробки даних. Прямим аналогом датчика ДВ-160 виступає датчик вітру М-127, що має схожі характеристики й будову. Датчик вітру (ДВ) встановлений на щоглі на даху учбового корпусу, що в сумі дорівнює висоті 30 м. На даній висоті, з урахуванням особливостей рельєфу місцевості, умови отримання даних близькі до ідеальних, оскільки немає сторонніх перешкод. Вимірювання швидкості вітру, як правило, проводять на висоті флюгера $h_{\phi} = 10 \text{ м}$ [7].

Програма-монітор призначена для візуалізації поточних параметрів потоку, зчитування накопичених даних і управління параметрами датчика. Інтерфейс програми для збору даних представлено на рис. 1.

У лівому верхньому кутку вікна відображаються поточний напрям і швидкість вітру. Праворуч від цього поля розташований пливучий графік швидкості вітру за період в 1 хв. Нижче відображається поточний час на комп'ютері і на датчику. Між ними розташована кнопка для синхронізації часу.

Середня частина вікна служить для роботи з накопичуваними даними. При натисненні кнопки «Рахувати дані», на комп'ютер зчитується значення сумарної енергії потоку, встановлені на датчику межі швидкості і накопичені в пам'яті датчика записи.

При натисненні кнопки «Зберегти», зчитаний список записів можна зберегти в текстовий файл, придатний для відкриття програмою Microsoft Excel.

Кнопка «Обнулити» витирає з пам'яті датчика всі записи й обнуляє лічильник сумарної енергії потоку.

Кнопка «Задати» копіює значення меж швидкості з комп'ютера в пам'ять датчика.

Результати дослідження. Згідно [7], для вітроенергетики є законом вважати райони з середньою швидкістю вітру менше 5 м/с малоприслужними для розміщення вітроустановок, а зі швидкістю більшою ніж 8 м/с – досить сприятливими. З цього маємо, що вимірювана швидкість вітру протягом року повинна лежати в межах від 5 до 8 м/с. Це буде достатньою умовою для побудови вітроустановок малої та середньої потужностей.

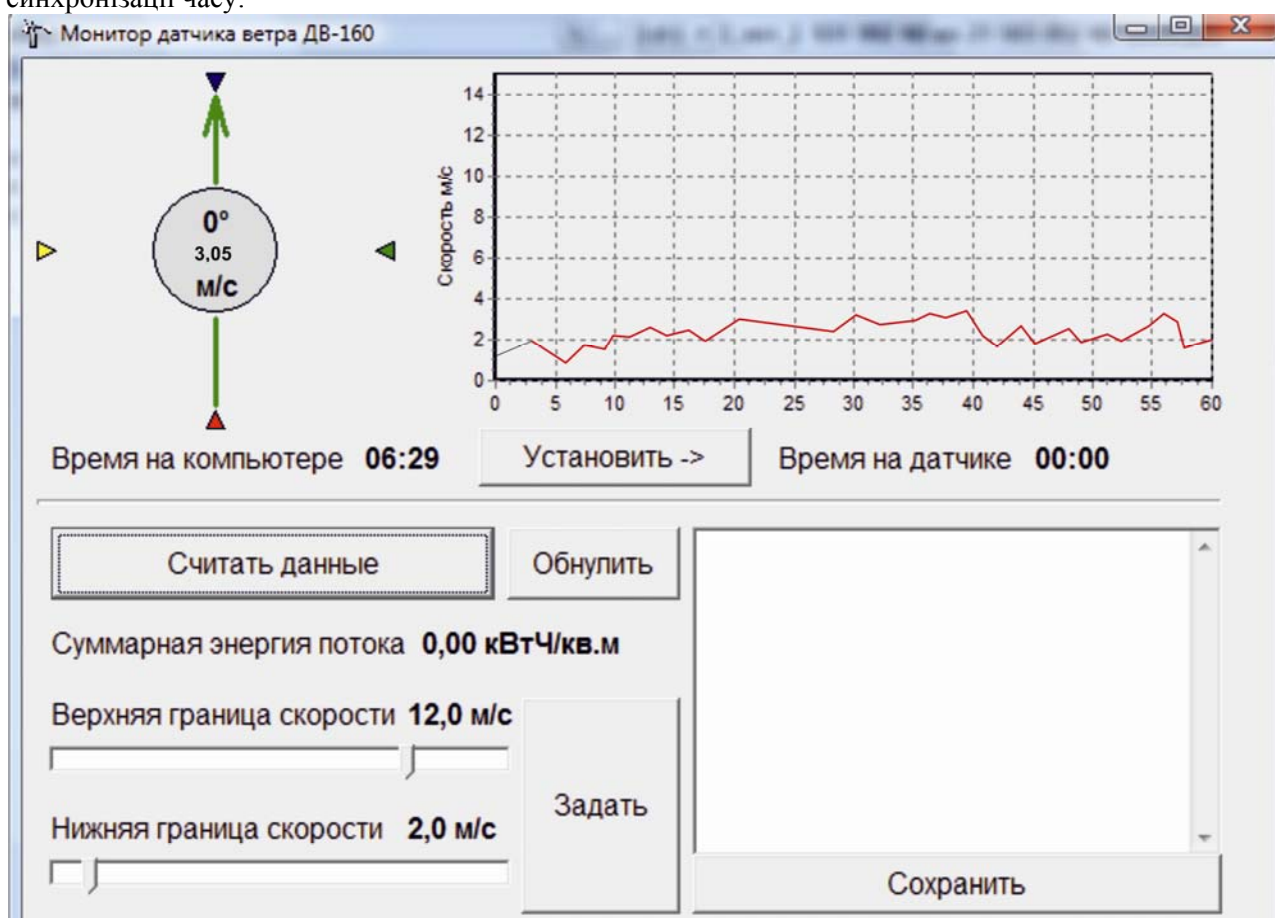


Рис. 1. Головне вікно програми для реєстрації швидкості вітру датчика ДВ-160

Датчик працював протягом липня-вересня 2009 р., а для обробки були взяті дані за 30 календарних днів, починаючи з 15.07.09 по 14.08.09. Дискретність вимірювання даних складає 1 хв, проте такий крок не є необхідним, оскільки рекомендовано проводити вимірювання швидкості вітру один раз на годину, або навіть 4 рази на день [7]. Для прикладу: на рисунку 2а представлена залежність швидкості вітру протягом доби, а на рисунку 2б – розподіл потужності ВЕУ протягом дня. (Дані взяті за 8.08.09, починаючи з 0.00 годин до 24.00 годин, що становить 1440 хвилин).

Таким чином, на графіках число 1 по осі абсцис відповідає часу 0.01, а, наприклад, число 1429 – відповідає часу 23.49.

Дані діаграми свідчать, що швидкість вітру протягом доби суттєво змінюється: зазвичай вночі вона найменша, а протягом дня зростає. На рисунку 2а видно, що швидкість вітру починає зростати з 8.00 й коливається аж до 19.00; з 0.01 до 8.00 годин та з 19.00 до 24.00 годин швидкість вітру спадає і незначно змінюється. Середня швидкість вітру за добу становить 2,81 м/с. Проте ці дані наведені

лише за один день, отже, за допомогою їх не можна робити загальний висновок. За 30 днів середня швидкість вітру склала 2,91 м/с. З рисунка 2б видно, що вироблена потужність вітрогенератором, так само як і швидкість вітру протягом доби, змінюється, набуваючи максимальних значень із 8.00 до 19.00 годин.

Електрична потужність, що генерується ВЕУ з номінальною потужністю $N_{ном}$, залежно від швидкості U , дорівнює [8]:

$$N(U) = N_{ном} \cdot \varphi(U), \quad (1)$$

де $\varphi(U)$ – робоча характеристика ВЕУ. Для установок із постійною частотою обертання вітроколеса в номінальному режимі вона має вигляд:

$$\varphi(U) = \begin{cases} 0, & U < U_0 \\ \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^3, & U_0 \leq U \leq U_{ном} \\ 1, & U_{ном} < U \leq U_{max} \\ 0, & U > U_{max} \end{cases}, \quad (2)$$

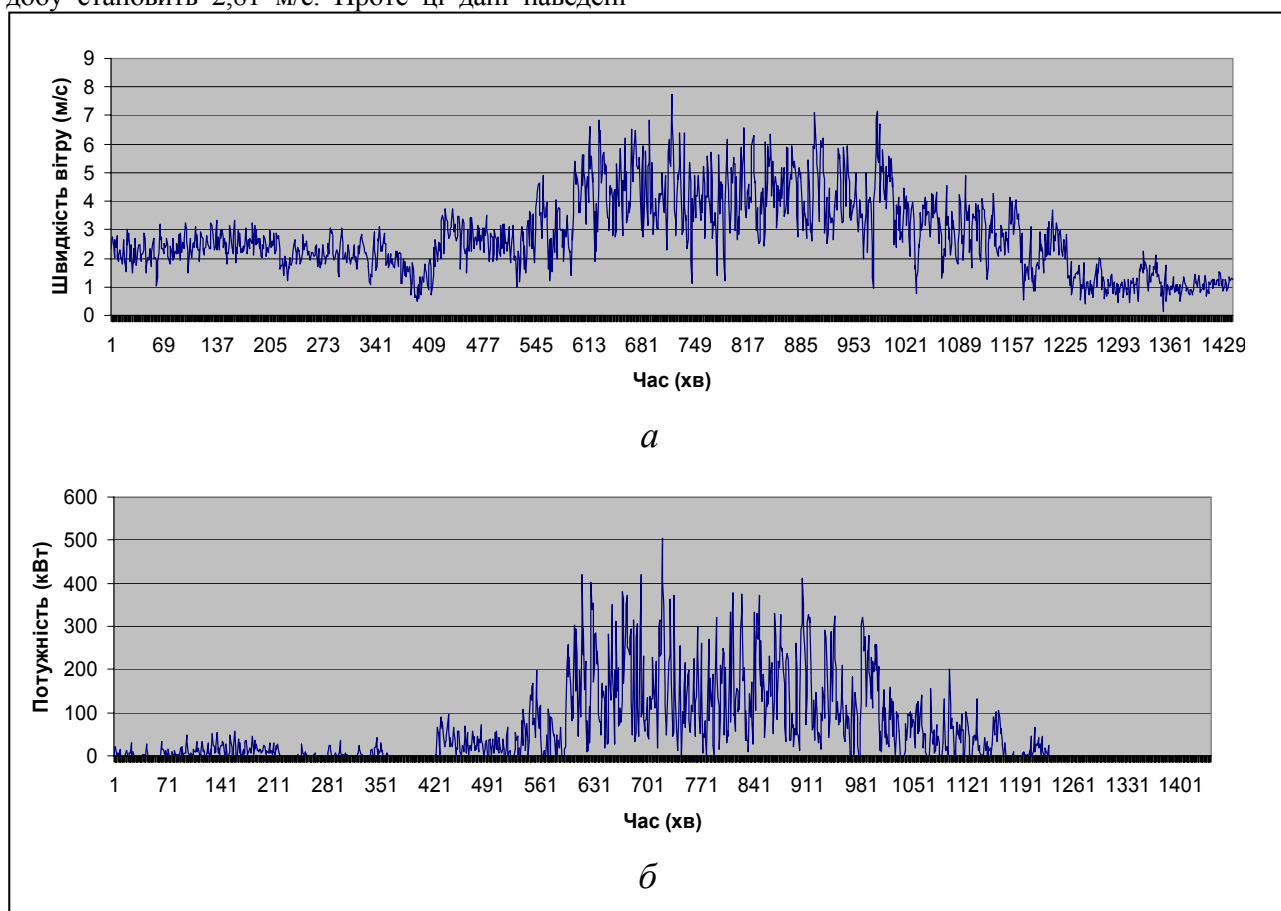


Рис. 2. Приклади отриманих даних: а – розподіл швидкості вітру протягом доби на висоті 30 м; б – розподіл потужності, виробленої вітрогенератором упродовж дня

де U_0 – початкова швидкість, при якій вітроколесо починає обертатися; $U_{ном}$ – номінальна швидкість ВЕУ; U_{max} – максимальна швидкість, при якій ВЕУ виводиться з робочого режиму.

Для апроксимації експериментальних даних швидкості вітру необхідно використовувати функцію розподілу Вейбула [7]:

$$F(U) = 1 - e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^k}, \quad (3)$$

де: k – параметр форми, а c – параметр, близький до середньої швидкості вітру.

Густина розподілу Вейбула дорівнює

$$f(U) = \frac{dF(U)}{dU} = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^k}, \quad (4)$$

а середня швидкість вітру (математичне очікування) становить

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U \cdot f(U) \cdot dU = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right), \quad (5)$$

де $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \cdot e^{-t} \cdot dt$ – гамма-функція.

Метеорологічні служби реєструють параметри вітру на стандартній висоті флюгера – $h_{\phi} = 10$ м. Осі вітроколес сучасних ВЕУ знаходяться на висоті h від 10 до 100 м. Для визначення середньої швидкості вітру на цих висотах використовують наближену емпіричну формулу:

$$\bar{U}_h = \bar{U}_{\phi} \cdot \left(\frac{h}{h_{\phi}}\right)^b, \quad (6)$$

де $\bar{U}_{\phi}$ – середня швидкість вітру на висоті флюгера. Параметр b для відкритих місць дорівнює $b = 0,14$ [2].

Із Полтавської метеорологічної станції були отримані такі дані швидкості вітру $\bar{U}_{\phi}$:

червень 2009 р. – $\bar{U}_{\phi} = 2,6$ м/с;

липень 2009 р. – $\bar{U}_{\phi} = 2,2$ м/с;

серпень 2009 р. – $\bar{U}_{\phi} = 2,6$ м/с;

вересень 2009 р. – $\bar{U}_{\phi} = 2,8$ м/с.

Використовуючи формулу (6) можна знайти параметр b для м. Полтава, спираючись на дані датчика вітру ДВ-160. Оскільки виміри про-

дилися у липні-серпні 2009 р., то $\bar{U}_h = 2,91$ м/с – середня швидкість за липень-серпень на висоті 30 м, а $\bar{U}_{\phi} = 2,4$ м/с – середня швидкість за липень-серпень на висоті флюгера. Підставивши ці значення у формулу (6), отримаємо $b = 0,18$ для регіону м. Полтава; проте слід враховувати, що дані були взяті за 30 днів, а не за рік.

Однак вітри на території області не відзначаються постійністю характеристик. У теплий період року частіше діють західні та північно-західні вітри, в холодний період переважають вітри східного та південно-східного напрямків. Середня швидкість вітру за рік становить 3-5 м/с [6].

Середня питома потужність вітрового потоку (потужність на одиницю площі вітроколеса) дорівнює:

$$\bar{P}_0 = \frac{\rho}{2} \cdot \int_0^{\infty} U^3 \cdot f(U) \cdot dU = \frac{\rho \cdot c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{2}, \quad (7)$$

де ρ – густина повітря. Номінальна потужність вибраної ВЕУ повинна приблизно відповідати значенню $N_{ном} \approx \eta \cdot S \cdot \bar{P}_0$, де S – площа вітроколеса, а η – загальний коефіцієнт корисної дії ВЕУ. Для більшості ВЕУ $\eta \approx 0,3$ [7].

Середня продуктивність ВЕУ за період часу T складе [8]:

$$\bar{W} = N_{ном} \cdot T \cdot \bar{\varphi}, \quad (8)$$

де $\bar{\varphi}$ – середнє значення робочої характеристики, яке можна інтерпретувати як коефіцієнт використання потужності ВЕУ. При використанні функції розподілу Вейбула отримаємо:

$$\bar{\varphi} = \frac{c^3}{U_{ном}^3} \cdot \left[\gamma\left(1 + \frac{3}{k}, U_{ном}\right) - \gamma\left(1 + \frac{3}{k}, U_0\right) \right] + e^{-\left(\frac{U_{ном}}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{U_{max}}{c}\right)^k}, \quad (9)$$

де $\gamma(a, x) = \int_0^x t^{a-1} \cdot e^{-t} \cdot dt$ – неповна гамма-

функція.

Таким чином, оцінка продуктивності ВЕУ зводиться до визначення коефіцієнта використання потужності $\bar{\varphi}$, тобто до статистичної оцінки параметрів функції Вейбула k і c при заданих швидкостях $U_0, U_{ном}$ і U_{max} вибраної ВЕУ.

Нехай n – число вимірювань швидкості вітру

за даний період, що приймається рівним 100, що є середнім за багато років спостережень; m – число інтервалів для швидкості вітру; U_{1i} – ліва межа i -го інтервалу; U_{2i} – права межа i -го інтервалу; U_i – середина i -го інтервалу; n_i – частота попадання швидкості вітру в i -й інтервал; $w_i = n_i / n$ – відносна частота. Тоді вибіркова середня швидкість вітру і вибіркова дисперсія обчислюються за формулами:

$$\bar{U}_e = \sum_{i=1}^m w_i \cdot U_i, \quad D_e = \sum_{i=1}^m w_i \cdot (U_i - \bar{U}_e)^2 \quad (10)$$

Прирівнюючи $\bar{U}_e$ і D_e із (10) математичному очікуванню і дисперсії розподілу Вейбула, отримаємо систему двох рівнянь

$$\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)} = \frac{D_e}{\bar{U}_e^2} + 1, \quad c = \frac{\bar{U}_e}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)}, \quad (11)$$

вирішуючи яку, можна знайти параметри k і C . Варто зауважити, що збільшення висоти

$h > h_\phi$ не змінює параметр k , а призводить тільки до збільшення параметра C на фактор $(h/h_\phi)^{0,14}$.

Для регіону м. Полтава за липень-серпень коефіцієнт $k = 2,2$, оскільки середня швидкість за цей період склала $\bar{U}_h = 2,91$.

Висновки:

1. Для регіону м. Полтава була обрахована середня швидкість вітру за липень-серпень 2009 р., що склала 2,91 м/с.

2. Розрахований параметр b , який зв'язує середню швидкість вітру на висоті флюгера – 10 м із середньою швидкістю вітру на вимірюваній висоті – 30 м. Для м. Полтава параметр b складає 0,18 – у порівнянні з параметром для відкритих місць – 0,14.

3. Для оцінки вітрового потенціалу регіону необхідно використовувати функцію розподілу Вейбула, з допомогою якої був отриманий коефіцієнт $k = 2,2$ для регіону м. Полтава.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Анализ развития ветроэнергетики в Украине / В.С. Подгуренко // Энергетика и электриф. – 2000. – № 10. – С. 40-51.
2. Возможности использования нетрадиционных источников энергии в Украине и Донбассе / И.А. Александров, Ю.Н. Сокальская // Энергосбережение. – 2001. – № 5. – С. 15-21.
3. До питання про доцільність будівництва вітрових електростанцій в Україні / М.М. Жовмір, С.В. Шульга // Энергетика и электриф. – 2000. – № 4. – С. 36-40.
4. Закон України. Про внесення змін до деяких законів України щодо стимулювання розвитку вітроенергетики України: від 8 червня 2000 р., № 1812-III // Відомості Верховної Ради України. – 2000. – № 38. – С. 742-743.
5. Метод оцінки виробітку електроенергії вітроелектричною установкою за даними електронної реєстрації характеристик вітру / Б.Г. Тучинський // Нетрадиц. енергетика в XXI веке: Докл. II Междунар. конф., Крым (Ялта), 17-22 сент. 2001 г. – К., 2001. – С. 95-98.
6. Полтавська область: природа, населення, господарство. Географічний та історико-економічний нарис. / За ред. Маца К.О. – П.: Полтавський літератор, 1998 р. – С. 40-41.
7. Твайделл Д., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Manwell J. F. Wind energy explained : theory, design, and application / James Manwell, Jon McGowan, Anthony Rogers. WILEY, – 2nd ed., 2009. – 700 p.

УДК 621.577.6:658.264

© 2011

Ришард Титко

Об'єднання шкіл електричних №1 (м. Краків, Польща)

Калініченко А.В., доктор сільськогосподарських наук, професор,

Калініченко В.М., кандидат сільськогосподарських наук

Полтавська державна аграрна академія

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ ТИПУ «ПОВІТРЯ – ВОДА» У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Рецензент – доктор сільськогосподарських наук, професор П.В. Писаренко

Представлено результати дослідження ефективності використання теплового насоса типу «повітря – вода» в системах теплопостачання при різних режимах роботи. Дослідження проводилися на лабораторній дослідній установці з автоматичною фіксацією параметрів роботи обладнання на комп'ютері. Показано результати вимірювання температури робочої рідини в обігрівальному циклі теплового насоса. На основі експериментальних досліджень визначено залежність коефіцієнта потужності теплового насоса від температури зовнішнього повітря й від робочої температури системи опалення.

Ключові слова: тепловий насос, коефіцієнт потужності, система теплозабезпечення, низько потенційне джерело тепла, робочий цикл.

Постановка проблеми. Використання альтернативних екологічно чистих джерел енергії може запобігти назріваючій енергетичній кризі в Україні. Перспективним напрямом відновлюваної енергетики є використання енергії, що накопичується у водоймищах, ґрунті, геотермальних джерелах, технологічних викидах (повітря, вода, стоки та ін.). Проте температура цих джерел досить низька (0-25°C), і для ефективного їх використання необхідно здійснити перенесення цієї енергії на вищий температурний рівень (50-100 °C). Реалізується таке перетворення тепловими насосами (ТН), які, по суті, являються пароконпресійними холодильними машинами.

У системах мікроклімату широко використовуються теплові насоси типу «повітря – повітря» та «повітря – вода» [6]. Зовнішнє повітря продувається через випарник, а тепло, що відводиться від конденсатора, нагріває повітря в приміщенні. Перевагою таких систем є доступність зовнішнього низькопотенційного джерела тепла – повітря. Проте температура повітря змінюється у значному діапазоні, досягаючи негативних значень. При цьому ефективність теплового насоса значно знижується. Так, зміна температури зов-

нішнього повітря з 7°C до мінус 10°C призводить до зниження продуктивності теплового насоса в 1,5-2 рази, а при ще більшому зниженні зовнішньої температури робота теплового насоса взагалі може бути неефективною [4]. Тому для порівняння експлуатаційних витрат теплового насоса з традиційними джерелами теплопостачання важливим є визначення коефіцієнта ефективності теплового насоса.

Аналіз основних досліджень та публікацій, в яких започатковано розв'язання проблеми. Основними перевагами теплових насосів є економичність, екологічність, універсальність (можливість робити як опалювальний пристрій, так і у режимі кондиціонера), безпечність [2].

Теплові насоси використовують у різних галузях промисловості, житловому і громадському секторах [3]. Нині у світі експлуатується понад 14 млн. теплових насосів різної потужності, – від десятків кіловат до мегават. Щорічно парк ТН поповнюється приблизно на 1 млн. штук [6]. Підвищена популярність цього екологічного джерела енергії зумовила появу значної кількості літератури як із загальним описом принципу дії та конструкції, так і з розрахунками для підбору потужності ТН для об'єктів теплопостачання. Однією з найважливіших характеристик ТН є коефіцієнт потужності, який залежить від температури зовнішнього джерела живлення й від температури, на яку розрахована система опалення [5, 6]. Досліджень таких залежностей у сучасній науковій літературі досить мало.

Мета досліджень – дослідження коефіцієнта ефективності теплового насоса типу «повітря – вода» фірми «FONKO» в умовах Кракова.

Матеріали і методи досліджень. Лабораторний комплекс для дослідження теплового насоса, до складу якого входить власне тепловий насос, теплообмінник, система контрольно-вимірювальних приладів із лічильниками тепла та електроенергії, що підключена до комп'ютера.

Результати дослідження. У лабораторії відновлюваних джерел енергії Об'єднання шкіл електричних №1 у Кракові було проведено дослідження для визначення коефіцієнта потужності теплового насоса типу «повітря – вода». Насос використовується для опалення або охолодження приміщень, а також у системі гарячого водопостачання. На рисунку 1 показана функціональна схема комплексу лабораторного обладнання, що використовується у навчальному процесі з вивчення відновлюваних джерел енергії.

Тепловий насос розміщено у приміщенні лабораторії, а повітря надходить до нього й відводиться після робочого циклу за допомогою труб ПВХ із діаметром умовного проходу 100 мм².

Прилад оснащений двома вентиляторами, які пропускають повітря через мідний колектор вхідного контуру джерела тепла й водночас є випарником, в якому безпосередньо відбувається випаровування. Технічна характеристика, що надає фірма-виробник насосу, подана у таблиці 1.

Робоча рідина подається на теплообмінник у баку-акумуляторі ємністю 300 літрів, підігрівачу води в ньому. Пристрої зв'язані в контур за допомогою мідних труб. Циркуляція води відбувається за допомогою циркуляційного насоса, який є елементом теплового насоса. У циркуляційній системі опалення знаходиться водний розчин етилового гліколю з концентрацією 50%.

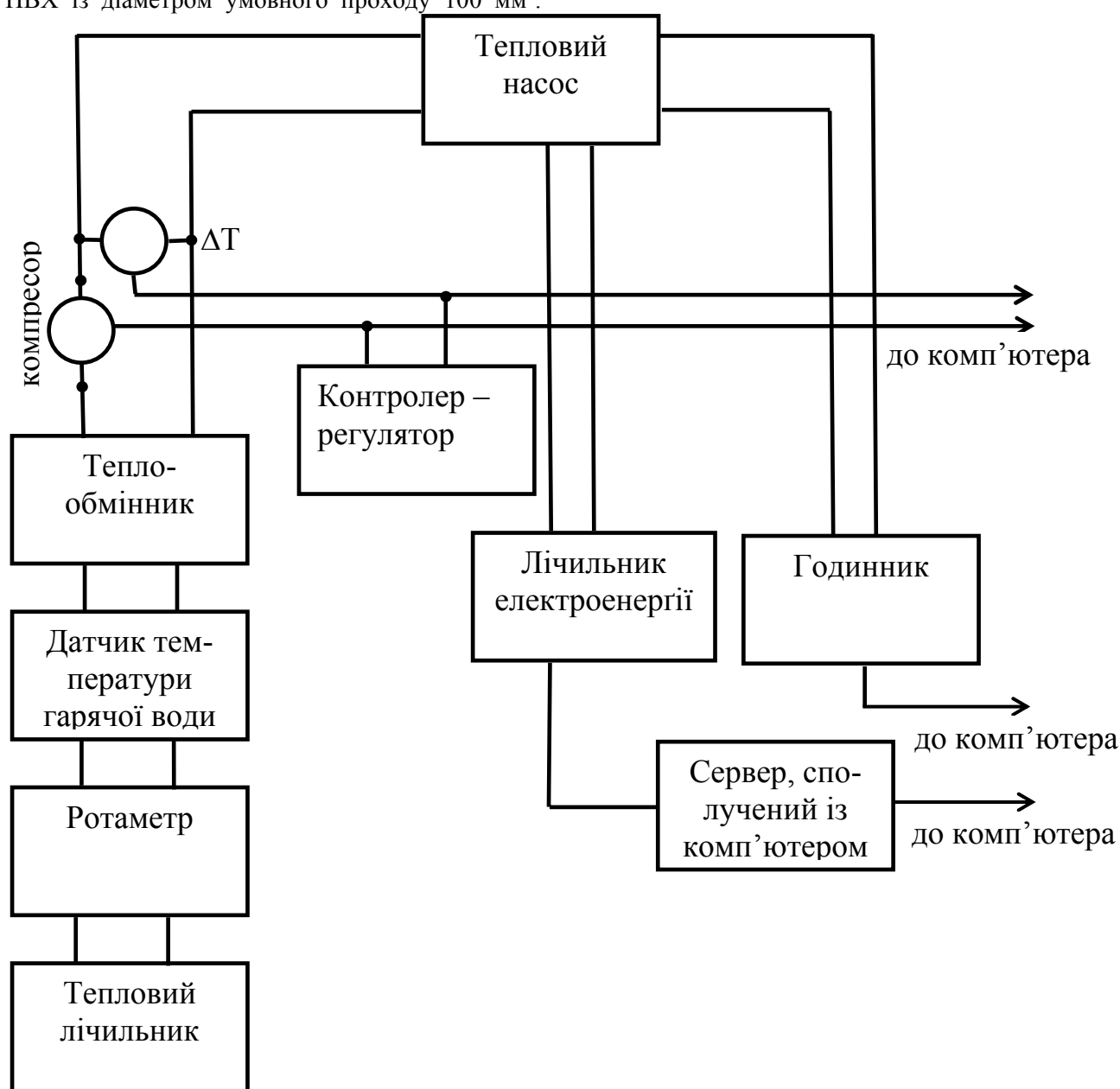


Рис. 1. Функціональна схема дослідної установки теплового насоса

1. Технічні характеристики теплового насоса DXA60LGA фірми FONKO

Тип	Повітря / гліколь
Джерело тепла	атмосферне повітря
Обігрівальна потужність	18,1 [кВт]
Потужність охолодження	15,08 [кВт]
Споживча потужність	7,727 [кВт]
Вхідний струм	400 В-50 Гц, трифазовий
Вага установки	175 [кг]
Розмір	1025x1580x425 [мм]
Температура повітря	-10[°C] в трубі нагріву +60 [°C] в трубі охолодження
Макс. температура води с.о.	+55 [°C]
Мінім. різниця рівнів інсталяції	15 [м]
Макс. різниця рівнів інсталяції	30 [м]
Робоча рідина	R410A

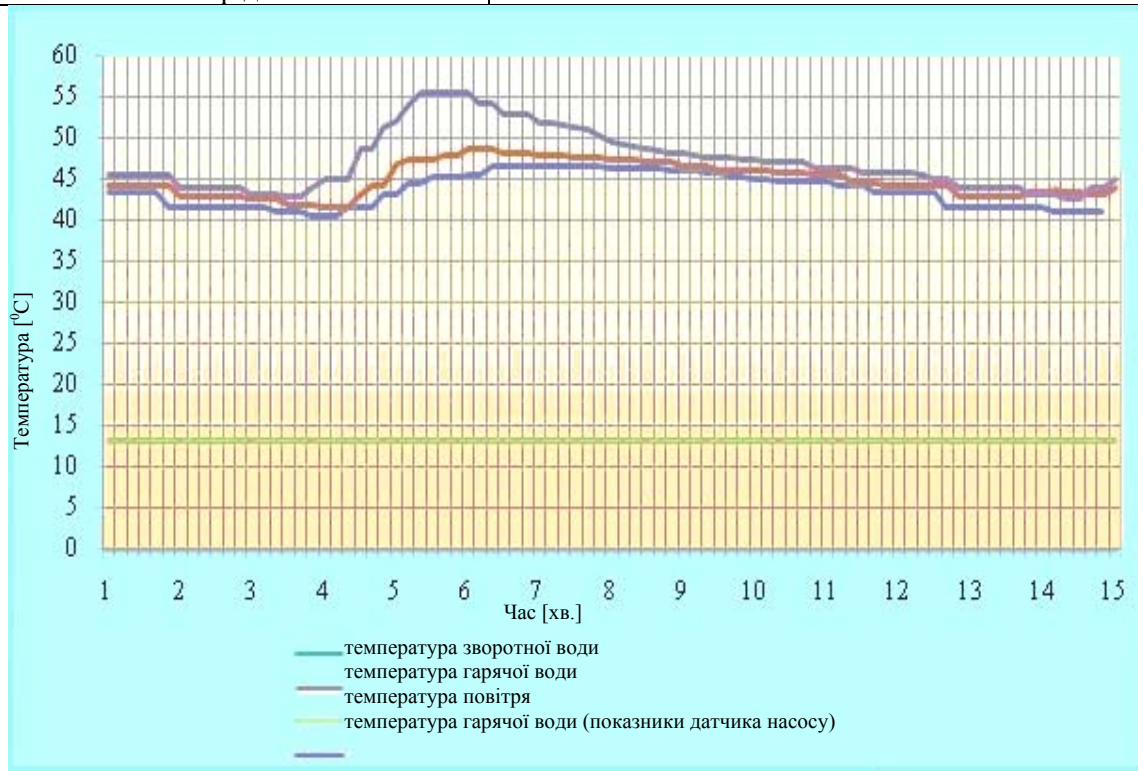


Рис. 2. Фрагмент діаграми коливань температури рідини в обігрівальному циклі

Для визначення кількості отриманої теплової енергії використовуються термометри, встановлені безпосередньо за або перед тепловим насосом, які контролюють зміни температури в циклі опалення. Крива змін температур разом зі зміною температури повітря чи даних із комп'ютера системи відображена на діаграмі (рис. 2), де подано один повний цикл роботи теплового насоса.

Кількість електроенергії, що витрачається тепловим насосом, реєструється за допомогою електричного лічильника, а кількість теплової енергії

розраховується з використанням даних ротаметра й температурних датчиків.

Подібно до всіх інших холодильних машин, тепловий насос використовує механічну (електричну або іншу) енергію для реалізації термодинамічного циклу. Ця енергія витрачається на привід компресора. Основною характеристикою теплового насоса є коефіцієнт потужності (коефіцієнт ефективності).

Коефіцієнт потужності (ε) – це співвідношення теплової енергії, що відводиться із системи джерела тепла вхідного контура, та електроенер-

гії E , що споживається тепловим насосом.

$$\varepsilon = \frac{Q}{E}$$

$$Q = m \cdot C_v \cdot \Delta T [\text{кВт} \cdot \text{год}],$$

де: Q – тепло, отримане з системи [Дж];
 E – отримана електроенергія [Дж]; c_v – **питома масова теплоємність** рідини в циклі опалення [Дж / кг · К]; m – маса теплоносія, [кг]; ΔT – різниця температур теплоносія до і після віддачі теплової енергії [К].

$$E = U \cdot I \cdot t [\text{кВт} \cdot \text{год}],$$

де: U – напруга [В]; I – струм [А]; t – час [год].

На основі представленого фрагмента коливань температури виділено один повний цикл роботи насоса. Час тривання циклу становить 10 хв. безперервної роботи компресора, 70 секунд роботи вентиляторів. Вимірювання проводилися при температурі повітря (зовнішнього низькопотенційного джерела тепла) 5 °С.

За допомогою вищезазначених формул розраховано:

$$Q = 2859436 [\text{Дж}] = 0,794288 [\text{кВт} \cdot \text{год}]$$

$$E = 0,2365 [\text{кВт} \cdot \text{год}]$$

$$\varepsilon = 3,36.$$

Тобто, при температурі зовнішнього повітря 5 °С на кожний кіловат електричної енергії ми отримуємо 3,36 кВт теплової енергії.

Відомо, що коефіцієнт потужності залежить від температури зовнішнього джерела тепла [6].

Теплові насоси, де верхнім джерелом живлення є повітря, найбільше залежать від погодних умов у порівнянні з ґрунтовими теплонасосами або тими, що використовують у якості джерела живлення ґрунтові води. Крім того, коефіцієнт потужності більший при менших температурах у вторинному колі. Отже, найвигідніше ТН використовувати з низькотемпературними системами опалення типу теплі поли, теплі стіни і т. ін., де температура у вторинному колі не перевищує 40 °С.

Нами було досліджено ефективність теплового насоса за різних значень температури зовнішнього джерела тепла – повітря (рис. 3).

Графік ілюструє чітку залежність показників ефективності теплового насоса типу «повітря-вода» від зовнішньої температури й від характеру системи опалення. З графіків видно, що при зменшенні зовнішньої температури з 0 до -12 коефіцієнт потужності (ε) зменшується практично у два рази. І, навпаки, при збільшенні лише на 10 градусів із 0 до +10 ε збільшується також практично вдвічі.

Вибір системи опалення навіть більше впливає на ефективність ТН, ніж температура повітря. При мінусових температурах використання ТН із традиційними високотемпературними системами опалення неефективне. Натомість при заміні традиційних систем опалення на низькотемпературні ефективність теплових насосів різко зростає. Тому при проектуванні систем опалення з використанням теплового насоса необхідно обов'язково враховувати і цей фактор.

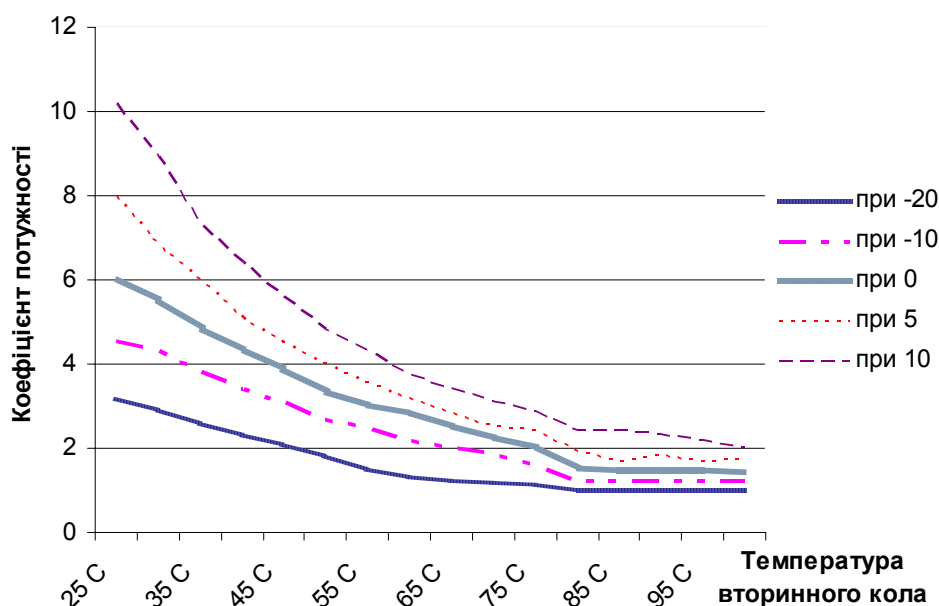


Рис. 3. Залежність коефіцієнта потужності від зовнішньої температури й типу системи опалення

Висновки. Тепловий насос є надійним, високоефективним, безпечним та екологічним джерелом відновлюваної енергії для використання у системах опалення та гарячого водопостачання.

Ефективність теплового насоса типу «повітря – вода» значною мірою залежить від температури зовнішнього повітря.

ри зовнішнього повітря.

На ефективність теплового насоса суттєвий вплив має температура, на яку розрахована система опалення. Найбільш ефективними для роботи з ТН є низькотемпературні системи опалення: тепла підлога, теплі стіни і т ін.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <www.ukrenergo.energy.gov.ua>
2. Офіційний сайт Агентства по відновлюваній енергетиці [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <<http://www.rea.org.ua/>>
3. Стратегія енергозбереження в Україні: аналіт. довід. матеріали / за ред. В.А. Жовтянського,

М.М. Кулика, Б.С. Стогнія. – К. : Академперіодика. – Т. 1. – 2006. – 510 с.

4. *Górecka R.*, Teoria i technika eksperymentu , Skrypt Politechniki Krakowskiej. – Kraków, 1995. – Str. 25-26.

5. www.fonko.pl

6. *Zalewski.* Pompy ciepła podstawy teoretyczne i przykłady zastosowania P.K. Kraków. – 1995. – 365 с.

УДК 631.53.027.34:528.811

© 2011

*Петровський О.М., викладач,
Волков С.І., кандидат хімічних наук
Полтавська державна аграрна академія*

ВИЗНАЧЕННЯ НАЙБІЛЬШ ПРИДАТНОГО ДІАПАЗОНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ

Рецензент – кандидат технічних наук А.А. Ландар

На основі попередніх публікацій, а також теоретичних і експериментальних досліджень показано позитивний ефект від передпосівного опромінення насіння електромагнітними полями різних частотних діапазонів. Із точки зору екологічної безпеки визначені фактори впливу електромагнітних випромінювань на людину. Запропоновано методику оцінки інтенсивності впливу опромінення на насіння при різних параметрах електромагнітного поля. Знайдено найбільш придатний, з практичної точки зору, діапазон, в якому доцільно проводити опромінення насіння сільськогосподарських культур.

Ключові слова: опромінення, частота, інтенсивність, насіння, екологічна безпека, генератор.

Постановка проблеми. Відомо, що при обробці насіння сільськогосподарських культур електромагнітним випромінюванням можна одержати позитивний результат [2, 4]. Зокрема обробка полями ВЧ і НВЧ діапазонів позитивно впливає на схожість і ріст рослин, приводить до зменшення часу вегетації. Це, в свою чергу, дає змогу зменшити норму висіву насіння, при чому врожайність сільськогосподарських культур, по відношенню до контрольної партії, не обробленої електромагнітним полем, збільшується. Відмічається, що позитивний ефект досягається у широкому діапазоні частот електромагнітних полів від статичного (квазістатичного) електричного поля до електромагнітного випромінювання оптичного і більш високочастотних діапазонів [1, 2, 5, 6, 8, 9]. Однак, оскільки техніка одержання, транспортування та узгодження електромагнітних хвиль різних діапазонів суттєво відрізняється, як і їх вплив на обслуговуючий персонал, то виникає проблема визначення частот (і, відповідно, довжин хвиль) електромагнітного випромінювання, які найбільш придатні для передпосівної обробки насіння.

Аналіз основних досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання проблеми. У даній роботі ми обмежилися тільки розглядом електромагнітних полів, що відповідають радіочастотному діапазону ($10...10^4$ МГц). Весь діапа-

зон радіочастот, згідно з міжнародним регламентом, поділяється на низькі (НЧ), середні (СЧ), високі (ВЧ), дуже високі (ДВЧ), ультрависокі (УВЧ), надвисокі (НВЧ), крайнє високі (КВЧ) і гіпервисокі (ГВЧ) частоти [3]. При обговоренні питань дії радіохвиль на біологічні об'єкти зручніше користуватися назвами діапазонів, що прийняті у гігієнічній практиці: високі (ВЧ) – $0,2...20$ МГц ($\lambda = 10...1000$ м), ультрависокі (УВЧ) – $20...3000$ МГц ($\lambda = 0,1...10$ м), надвисокі (НВЧ) – $3...300$ ГГц ($\lambda = 0,1...10$ м) [7].

Екологічні проблеми, що пов'язані з використанням електромагнітного випромінювання, достатньо серйозні. При опроміненні радіохвилями відмічаються суб'єктивні порушення: загальна слабкість, підвищена втомлюваність, сонливість, порушення сну тощо. Крім того реєструються об'єктивні показники, які свідчать про порушення роботи серцево-судинної системи. Відбувається зміна показників білкового і вуглеводного обміну. При цьому активність дії електромагнітного поля різних діапазонів частот відрізняється: вона значно зростає зі збільшенням частоти й досить сильно відчувається в НВЧ діапазоні [4, 6].

За раніше діючим стандартом, інтенсивність опромінення на УВЧ і НВЧ діапазонах упродовж робочого дня не повинна перевищувати 10 мкВт/см². Згідно з нині діючими нормами оцінка електромагнітного поля, у діапазоні від 60 кГц до 300 МГц, проводиться роздільно по електричній і магнітним складовим. Гранично допустимі рівні на протязі робочого дня по електричній складовій не повинні перевищувати напруженість 50 В/м, знижуючись поступово до 5 В/м, у міру збільшення частоти [9].

Для одержання електромагнітного випромінювання використовують різноманітні прилади. В якості генератора сантиметрових радіохвиль (діапазон НВЧ) можуть використовуватися магнетрони, клістриони тощо [4, 9]. Підведення енергії до випромінювача здійснюється в цьому діапазоні за допомогою хвильоводів. Випромінювачі – антени

різноманітних конструкцій, зокрема рупорні.

У діапазоні метрових хвиль використовуються переважно лампові генератори, а підведення енергії до випромінювача здійснюється за допомогою коаксіальних фідерів.

Мета і завдання досліджень – запропонувати методику оцінки інтенсивності впливу опромінення на насіння при різних параметрах електромагнітного поля. На основі теоретичного аналізу й експериментальних даних знайти найбільш доцільний, з практичної точки зору, діапазон опромінення насіння сільськогосподарських культур.

Матеріали і методи досліджень. Для опромінення насіння використовували прилади УВЧ-50 і УВЧ60-Мед ТеКо. Ефективність опромінення визначалася шляхом оцінки схожості насіння після опромінення. Висів опроміненого й неопроміненого (контрольна партія) насіння здійснювався в чашках Петрі та в закритому ґрунті.

При оцінці електромагнітного випромінювання використовують різні величини: напруженість електричного поля, магнітна індукція і напруженість магнітного поля, інтенсивність випромінювання (густина потоку енергії) тощо. Оскільки в приладах УВЧ-50 і УВЧ60-Мед ТеКо контролюється тільки потужність, що виділяється у вторинному контурі, то для того, аби мати можливість порівнювати результати, одержані різними авторами, проведено аналіз взаємного зв'язку різних характеристик опромінення.

Кількість теплоти, що виділяється в одиниці об'єму за одиницю часу при обробці УВЧ полем,

$$\text{дорівнює } q = \frac{E^2}{\rho}, \quad (1)$$

де: q – кількість теплоти, що виділяється в одиниці об'єму за одиницю часу, Дж/с·(м)³;

E – напруженість електричного поля, В/м;

ρ – питомий опір середовища, Ом·м.

З іншого боку, ця величина пов'язана з потужністю, що виділяється у вторинному контурі

$$q = \frac{P}{S \cdot d}, \quad (2)$$

де: P – потужність, Вт;

S – площа конденсаторних пластин, м²;

d – відстань між пластинами, м.

Прирівнюючи праві частини рівнянь (1) і (2) і зробивши відповідні перетворення, знаходимо співвідношення, яке пов'язує напруженість електричного поля з потужністю опромінення

$$E = \sqrt{\frac{P \cdot \rho}{S \cdot d}}. \quad (3)$$

Густина потоку енергії випромінювання (інтенсивність випромінювання) визначається як енергія, що переносить випромінювання в одиницю часу через одиницю площі поверхні

$$J = \frac{W}{S \cdot t},$$

де: J – інтенсивність випромінювання, Вт/м²;

W – енергія, Дж;

t – час, с.

Густина енергії електромагнітного поля (кількість енергії в одиниці об'єму)

$$w = \varepsilon \varepsilon_0 E^2,$$

де: w – густина енергії електромагнітного поля, Дж/м³;

ε – діелектрична проникливість;

ε_0 – електрична стала, Ф/м;

E – напруженість електричного поля, В/м.

Швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в середовищі

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}},$$

де: v – швидкість хвилі в середовищі, м/с;

c – швидкість хвилі у вакуумі, м/с;

μ – магнітна проникливість середовища.

Внаслідок цього інтенсивність випромінювання

$$J = w \cdot v = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2 \cdot c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}.$$

Для діа- і парамагнетиків

$$J = \varepsilon_0 E^2 c \cdot \sqrt{\varepsilon}.$$

Для повітря

$$J = \varepsilon_0 E^2 \cdot c. \quad (4)$$

Формули (3) і (4) дозволяють обчислити величини, що характеризують електромагнітне випромінювання, якщо відома хоча б одна із них: потужність, інтенсивність, напруженість електричного поля.

При цьому треба мати на увазі, що у випадку, коли насіння знаходиться між конденсаторними пластинами, то воно перебуває в індукційній зоні (зона випромінювання), а не у хвильовій зоні. Тому зміст інтенсивності в цьому випадку означає те, що умови опромінення відповідають умовам опромінення з відповідною інтенсивністю у хвильовій зоні.

Результати досліджень. У таблиці наведені результати, одержані в цій роботі і роботах інших авторів [1, 2, 4-6, 8]. Аналіз одержаних результатів вказує на те, що при однакових інтенсивностях опромінення немає принципової різниці при використанні електромагнітних полів різних діапазонів.

Вплив ЕМП різних діапазонів на схожість насіння

Спосіб обробітку	Культура	Частота ЕМП, Гц	Покращання схожості насіння, %
У полі коронного розряду	пшениця	0	5 – 17
	цибуля	0	12 – 38
	картопля	0	5,4 – 21,6
В УВЧ полі	пшениця	$27,12 \times 10^6$	10 – 20
	огірки	$27,12 \times 10^6$	10 – 15
	томати	$27,12 \times 10^6$	8 – 12,5
У НВЧ полі	пшениця	$37,25 \times 10^9$	9,3 – 17
	огірки	$37,25 \times 10^9$	10 – 20
	томати	$37,25 \times 10^9$	8 – 18,3

Як уже відмічалось, з точки зору екологічної безпечності, треба використовувати електромагнітні поля більш низької частоти. Крім того використання частотного діапазону з довжиною хвилі близько 10м дозволяє, на відміну від більш короткохвильових діапазонів, значно спростити конструкцію обладнання для генерування, транспортування енергії й узгодження генератора і споживача. Вказаний варіант дозволяє використовувати прості транзисторні схеми генераторів, а підвід енергії здійснювати за допомогою звичайних високовольтих дрозів. Опромінення зерна в цьому випадку відбувається між конденсаторними пластинами. Узгодження між генератором і споживачем зводиться до одержання резонансу у вторинному контурі на частоті генератора.

Таким чином, аналіз діапазонів частот радіохвиль, із точки зору екологічної безпеки, як і у випадку аналізу простоти і зручності викорис-

тання, приводить нас до застосування діапазону з довжиною хвилі близько 10 м.

Частоти 27,12 МГц, 40,6 МГц, 81 МГц виділені для застосування в медичній практиці (УВЧ-терапія). Вони не використовуються в засобах зв'язку. Тому застосування електромагнітного поля з частотою 27,12 МГц (довжина хвилі $\lambda = 11,06$ м) є, з нашого погляду, найбільш доцільним для передпосівної обробки насіння.

Висновки. Аналіз проведених досліджень вказує на те, що для передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур електромагнітним полем найбільш доцільним є використання частоти 27,12МГц. На цій частоті просто реалізується генерування електромагнітного поля, підведення енергії до споживача й електричне узгодження між генератором і споживачем. Крім того, застосування цієї частоти екологічно безпечно і не створює завад засобам радіозв'язку.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Илларионов В.Е. Основы лазерной терапии. – М.: РЕСПЕКТ, 1992. – 122 с.
2. Интенсификация тепловых процессов подготовки семян к посеву энергией ВЧ и СВЧ (рекомендации). – М.: Агропромиздат, 1989. – 40 с.
3. Медицинская и биологическая физика: Учеб. для вузов / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. – 5-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2004. – 560 с.
4. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы // (Сб. науч. ст. (науч. ред. акад. информ. МАИ Каменец Л.Г.) Международная акад. информ. Украинский научно-технологический центр. – К.: ТЕС, 2002. – Вып. 4. – 220 с.
5. Мараквелидзе М.А. Результаты производственных испытаний предпосевной обработки семян в поле коронного разряда / М.А. Мараквелидзе, М.И. Гольдбаум, З.Р. Одикадзе. // Сб. науч. тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1977. – №121. – С. 104-106.
6. Никифорова Л.С. Обзор существующих способов повышения урожайности овощево́й продукции в защищенном грунте / Л.С. Никифорова. // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. «Проблеми енергозбереження в АПК України». – Х.: ХДТУСГ, 2004. – Вип. 27, Т. 2. – С. 85-89.
7. Сакало С.М., Семенець В.В., Азархов О.Ю. Надвисокі частоти в медицині (терапія і діагностика): Навч. посіб. – Х.: ХНУРЕ; Колегіум, 2005. – 264 с.
8. Черенков А.Д. Применение информационных электромагнитных полей в технологических процессах сельского хозяйства / А.Д. Черенков, Н.Г. Косулина // Світлотехніка та електроенергетика. Міжнародний науково-технічний журнал. – Х.: ХНАМГ, 2005. – №5. – С. 77-80.
9. Электромагнитные поля в биосфере (в двух томах). – Т. 2. Биологическое действие электромагнитных полей / Под ред. доктора физико-математических наук Н.В. Красногорской. – М.: Наука, 1984. – 326 с.