

МІКРОХВИЛЬОВА ОБРОБКА РОСЛИННОГО СУБСТРАТУ ДЛЯ ДЕРЕВОРУЙНУЮЧИХ ГРИБІВ

Бошкова І.Л., Волгушева Н.В., Бошков Л.З.

Одеська національна академія харчових технологій

вул. Дворянська, 1/3, 65082, м. Одеса

boshkova.irina@gmail.com

natvolgusheva@gmail.com

Вивчається ефективність застосування мікрохвильового нагріву рослинного субстрату, призначеного для культивування дереворуйнівних грибів. Наведено результати експериментальних досліджень на пшеничній соломі, попередньо замоченій або спочатку сухій. Визначено режими, при яких мікрохвильова обробка призводить до пригнічення патогенної мікрофлори й посилення росту гриба глива, що культивується. Встановлено оптимальний алгоритм мікрохвильової підготовки субстрату, застосування якого дає змогу істотно знизити витрати енергії. Стверджується, що метод мікрохвильової обробки субстрату має істотні переваги, як порівняти з традиційними технологіями пастеризації і стерилізації. *Ключові слова:* культивування грибів, енерговитрати, солома, глива, мікрохвильове нагрівання, стерилізація, теплота.

Микроволновая обработка растительного субстрата для дереворазрушающих грибов. Бошкова И.Л., Волгушева Н.В., Бошков Л.З. Изучается эффективность применения микроволнового нагрева растительного субстрата, предназначенного для культивирования дереворазрушающих грибов. Приведены результаты экспериментальных исследований на пшеничной соломе, предварительно замоченной или изначально сухой. Определены режимы, при которых микроволновая обработка приводит к угнетению патогенной микрофлоры и усилению роста культивируемого гриба вешенка. Установлен оптимальный алгоритм микроволновой подготовки субстрата, применение которого позволяет существенно снизить затраты энергии. Утверждается, что метод микроволновой обработки субстрата имеет существенные преимущества в сравнении с традиционными технологиями пастеризации и стерилизации. *Ключевые слова:* культивирование грибов, солома, вешенка, энергозатраты, микроволновый нагрев, стерилизация, теплота.

Microwave treatment of vegetable substrates for wood-destroying mushrooms. Boshkova I., Volhusheva N., Boshkov L. The efficiency of microwave heating of a plant substrate intended for the cultivation of wood-destroying fungi is studied. The results of experimental studies on wheat straw, previously soaked or initially dry, are presented. The regimes under which microwave treatment leads to the inhibition of pathogenic microflora and to the growth of cultivated oyster mushroom are determined. An optimal algorithm for microwave preparation of the substrate has been established, the use of which can significantly reduce energy costs. It is claimed that the microwave method of substrate treatment has significant advantages in comparison with traditional technologies of pasteurization and sterilization. *Key words:* cultivation of mushrooms, straw, oyster mushrooms, energy consumption, microwave heating, sterilization, heat.

Постановка проблеми. Сьогодні їстівні гриби належать до найбільш перспективних продуктів харчування людини через високий вміст білків, баластових речовин, деяких вітамінів (РР, С і групи В), низький вміст жирів і низьку калорійність [1; 2; 3]. Для вирощування грибів можна використати різні рештки сільськогосподарських рослин. Це частини стебел сояшника та кукурудзи, відходи дерева, практично всі види відходів сільського господарства. Зазвичай використовують різні види термічної обробки субстрату: стерилізація, пастеризація та інше. Термічно оброблені субстрати є дуже сприятливими для росту різноманітних конкурентів грибів – різних видів пліснявих грибів і бактерій. Їхній розвиток зменшує вихід плодових тіл їстівних грибів, інфікуючи їх. Це призводить до надмірного використання різних хімічних реагентів для захисту грибів. Існуючі технології термічної підготовки субстрату є дорогими та тривалими. Приготування субстрату для вирощування їстівних грибів є найбільш енергоємним і важливим процесом у їхньому культивуванні. Існуючі методи базуються на способі нагрівання субстрату

водою або парою протягом 3–7 днів у пастеризаційному або стерилізаційному процесах. Метою цих операцій є знищення патогенів на рослинних рештках, які використовують як субстрат для вирощування грибів. При цьому виникають такі основні проблеми: неоднакове нагрівання маси субстрату через нерівномірність завантаження та різну теплопровідність у пастеризаційній або стерилізаційній установці, високі енерговитрати, висока вартість створення установок для приготування субстрату. Отож культивування грибів є однією з найбільш енерго- і капіталоемних областей сільського господарства, що гальмує розвиток галузі виробництва дереворуйнуючих грибів і заважає достатньою мірою проводити утилізацію рослинних решток.

Актуальність дослідження. Енергетична криза і збільшення попиту на продукцію покращеної якості викликали необхідність розвитку нових технологій. У цьому напрямі метод нагрівання в мікрохвильовому електромагнітному полі (МХ ЕМП) діелектричних матеріалів давно зарекомендував себе як високоефективний, застосування якого визнано

доцільним для модернізації ряду технологічних схем виробництва й обробки матеріалів. Як показали дослідження, застосування мікрохвильової технології для термообробки матеріалів рослинного походження має значні переваги, порівняно із традиційними способами термообробки [4; 5; 6]. До таких переваг належать: скорочення часу обробки, значна економія енергії на обробку, а також поява специфічних ефектів, які ведуть до появи нових якостей матеріалу. Істотними стримуючими факторами є недостатня повнота теоретичних та експериментальних досліджень, що не дає змоги визначати сукупність ефектів, які виникають у матеріалі під дією мікрохвильового поля, внаслідок чого ускладнений перехід до систем іншого масштабу. Тому дослідження ефектів впливу МХ поля на рослинні матеріали, які призначені для приготування грибного субстрату, є актуальними.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Напрям досліджень безпосередньо пов'язаний із визначальною проблемою енергозбереження, а також із потребою в забезпеченні громадян якісними продуктами в достатній кількості. Роботи відповідають Закону України «Про енергозбереження», затверджену постановою Верховної Ради України № 74/94 від 1 липня 1994 р., а також «Основним положенням енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», прийнятим Кабінетом Міністрів України 15 березня 2006 р.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мікрохвильова обробка знаходить щораз нові сфери застосування [7; 8], до того ж здебільшого роблять спроби заміни традиційних способів нагрівання на нагрівання від джерела мікрохвильового випромінювання. Однак одна така заміна для більшості технологій не приводить до отримання економічного ефекту. Це пов'язано передусім із недостатньою повнотою попередніх досліджень, що не дає змоги оптимізувати режимні параметри. Крім того, мікрохвильові технології, що розробляються, досягають високого рівня конкурентоспроможності, коли кінцевий продукт здобуває нові властивості, які неможливо або складно отримати за допомогою традиційної технології [9].

Основною метою термообробки є знищення або пригнічення мікрофлори, що є конкурентною до гриба, який культивується. Найбільш поширені м'яка термообробка, помірна термообробка й тверда термообробка. Усі види термообробки вимагають багато часу, витрат енергії та часто не забезпечують рівномірності обробки, внаслідок чого рослинний матеріал залишається інфікованим. Ці проблеми можна легко усунути, якщо використовувати мікрохвильове нагрівання субстрату.

Мета дослідження – визначення раціонального за енерговитратами й ефективного для виробництва грибної продукції режиму обробки соломистого субстрату, призначеного для вирощування гливи.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Сьогодні невизначені оптимальні режими обробки та необґрунтований принцип перенесення даних експериментів на установки промислового призначення.

Новизна роботи полягає в отриманні даних щодо методу обробки рослинних решток, зокрема соломи, для отримання як стерилізаційного ефекту, так і субстрату з поліпшеними якостями для вирощування гливи.

Методологічне значення полягає у визначенні методики обробки соломистого субстрату в мікрохвильовому полі, завдяки якій раціонально використовується властивість об'ємного поглинання мікрохвильової енергії матеріалом.

Методика проведення досліджень.

I. Методика одностадійного експерименту на визначення впливу МХ поля полягала в такому:

Подрібнену солому, суху або попередньо заморожену на 48 годин, віджимали до вологовмісту $W = 73\%$. Обробка проводилася при потужності $P = 850$ Вт. На аналітичних вагах зроблені навішення по 0,4 кг, які поміщалися в мікрохвильову камеру та витримувались у ній заданий проміжок часу. Після обробки з пакетів витягалася солома й охолоджувалася (якщо оброблялася суха солома – заливалася кип'яченою водою й віджималася), потім солома інокулювалася міцелієм, після чого розміщувалася в поліетиленові пакети із прорізами для виходу плодових тіл.

II. Методика двостадійного експерименту

Спочатку проводилася термообробка сухої соломи відповідно до методики I, потім солома заливалася водою, віджималася, розміщувалася в поліетиленові пакети та витримувалася у МХ камері. Після 7 днів варто оцінити результати за ступенем обростання. Після трьох хвиль плодоношення оцінюється ефективність за виходом готового продукту (плодових тіл гливи).

III. Методика визначення енергетичної ефективності МХ обробки субстрату

Для аналізу специфіки поглинання мікрохвильової енергії матеріалом велике значення мали дослідження залежності величини поглиненої мікрохвильової енергії від завантаження камери. Вираження загального енергетичного ККД представляється в такому вигляді: $\eta = \eta_m \cdot \eta_k$, де η_m – ККД магнетрона, η_k – ККД мікрохвильової камери. Значення η_m показує, з яким ККД магнетрон перетворює енергію електричного поля промислової частоти (50 Гц) в енергію з частотою мікрохвильового поля. Ця величина є паспортною. Значення η_k залежить від умов узгодження магнетрона із хвилеводом, що завантажувється матеріалом, внаслідок складності його пророкування виникає необхідність у проведенні масштабних експериментів. Насамперед для досліджень була обрана вода як речовина, електрофізичні властивості якої добре вивчені. Здатність води поглинати мікрохвильову енергію наближається до максимальної

внаслідок високої полярності молекул, що використовується при дослідженні розподілу поля всередині самої робочої камери. Крім того, загальноприйнята практика, згідно з якою для визначення оптимального завантаження камери як еталона використовується вода [11], довела можливість простого та точного розрахунку кількості теплоти перетворення. ККД камери розраховувався як відношення теплоти, перетвореної матеріалом, при розрахунках якої враховувалося значення корисного теплового потоку $Q_{\text{пол}}$, втрати в навколишнє середовище (обсяг робочої камери) в результаті природної конвекції $Q_{\text{конв}}$ і променистого теплообміну між зразком і стінками камери ($Q_{\Sigma}=Q_{\text{кор}}+Q_{\text{конв}}+Q_{\text{луч}}$), до вихідної потужності магнетрона.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 наведені фото соломистого субстрату через 7 днів після його обробки в МХ полі. Контроль – субстрат без обробки (солома заливалася гарячою водою та віджималася до вологовмісту 73–75 %). Маса завантаження – 5 кг. Вихідна солома була чиста та слабо інфікована, однак спостерігався інтенсивний розвиток мікрофлори в контрольному варіанті, що видно на рис.1, а. Солома після МХ обробки (рис. 1, б, в) демонструє ефект МХ поля, що стерилізує. Вибір потрібного режиму термообробки на МХ установці камерного типу здійснюється шляхом зміни експозиції обробки субстрату в робочій камері.

Результати дослідження живильних властивостей субстрату для вирощування грибів за різних режимів обробки та різній початковій вологості представлені в таблицях 1 і 2.

Початковий солом'яний субстрат був досить «чистим» у мікробіологічному плані. Нагромадження токсичних речовин під час інкубації вологого субстрату при кімнатній температурі, мабуть, пов'язане з невеликою ендегенною інфікованістю субстрату мікроскопічними грибами (№ 1). Профілактична мікрохвильова обробка запобігала розвитку патогенних грибів і, відповідно, продукуванню токсичних метаболітів (№ 2).

Зіставлення результатів, наведених у табл. 1 і табл. 2, показує, що підвищення вологості субстрату сприяє поліпшенню ефекту обробки в МХ камері. За мікрохвильової обробки соломистого субстрату з вологовмістом не вищим ніж 20 % витрати енергії менші, ніж за обробки матеріалу, зволоженого до необхідного за традиційною технологією рівня 73–75%, однак обростання субстратних блоків міцелієм істотно гірше, що говорить про знижений ефект стерилізації. Експерименти показали також наявність оптимуму на залежності ступеня обростання міцелієм субстрату й режиму обробки.



Рис. 1. Термообробка соломистого субстрату в мікрохвильовому полі
а) – контроль, б) – обробка протягом 5 хв., в) – обробка протягом 7 хв.

Таблиця 1

Характер обростання субстрату міцелієм (штам НК – 35) при різній експозиції в мікрохвильовому полі. Початкова вологість $W = 73$ %. Вихідна потужність магнетрона 850 Вт

Режим	Експозиція, с	Кінцева температура (°C)	Результат
1	80	58,0	Наявність плісняви
2	100	73,0	Обростання міцелієм добре
3	120	79,5	Обростання міцелієм відмінне
4	140	84,5	Обростання міцелієм відмінне
5	210	76,4	Обростання міцелієм добре
6	80	57,0	Наявність плісняви
7	100	72,0	Обростання міцелієм задовільне
8	120	77,5	Обростання міцелієм відмінне
9	140	86,0	Обростання міцелієм відмінне
Контроль	–	–	Наявність плісняви та триходерми, проростання зерен субстрату

У табл. 3 результат мікрохвильового впливу оцінювався за кількістю вирослих грибів гливи.

Режим 11 – обробка соломи в камері-стерилізаторі з використанням традиційної технології відповідно до режимів, установлених для цієї обробки (температура при стерилізації досягає 120 °C, тиск – 1,5 атмосфери, тривалість стерилізації займає не більш як 3 години). Для цієї обробки потрібна

потужність $Q_{mp} = 6464$ Вт/кг. Тож навіть у разі використання магнетронів із невисоким значенням ККД (магнетрона та камери) витрати енергії при МХ обробці менші на 25 %. Отримані результати корелюються з наведеними вище: є оптимальний режим обробки, для якого експозиція становить 140 с. Для цього режиму ККД камери становив 80 %. Витрати енергії з обліком ККД магнетрона $\eta_m = 75$ %:

$$Q = (m \cdot c_p \cdot \Delta t) / \tau / \eta_m = 0,4 \cdot 3600 \cdot 66 / 140 / 0,75 = 905 \text{ Вт.}$$

Розраховуючи на кг продукції та з урахуванням ККД електростанцій $\eta_{\square} = 35$ %: $Q_{me} = 6464$ Вт/кг.

Найкращі результати отримані із застосуванням двостадійної методики П. Кінцеві результати цих дослідів наведені в табл. 4. У колонці «Експозиція» перше значення відповідає витримці сухої соломи, друге – наступна витримка зволоженої соломи, с.

Таблиця 2

Характер обростання субстрату міцелієм при різних експозиціях в мікрохвильовому полі.
Початкова вологість $W = 10$ %

Режим	Експозиція, с	Потужність, (кВт)	Кінцева температура, °С	Результат
1	35	0,85	74	Наявність плісняви
2	40	0,85	84	Обростання міцелієм задовільне
3	45	0,85	87,5	Обростання міцелієм добре
4	50	0,85	93	Обростання міцелієм добре
5	120	0,3	72	Наявність плісняви
6	140	0,3	83	Обростання міцелієм відмінне
7	160	0,3	86	Обростання міцелієм добре
8	180	0,3	91	Обростання міцелієм добре
Контроль				Наявність плісняви та триходерми

З табл. 4 видно, що режим № 4 є кращим. Збільшення тривалості витримки сухої соломи в мікрохвильовій камері призводить до пригнічення росту грибів, що швидше за все пов'язане з біохімічними змінами у складі соломи. Витрати енергії при цьому складають: $Q = 646$ Вт. Розраховуючи на кг продукції та з урахуванням ККД електростан-

цій $\eta_{\square} = 35$ %: $Q_{me} = 4614$ Вт/кг. Отже, двостадійний режим обробки дає змогу істотно (в 1,28 разів) збільшити вихід плодівих тіл і в 1,4 рази знизити енерговитрати.

Таблиця 3

Кількість грибів, що вирощені на субстраті після обробки в МХ полі (перша хвиля плодоносіння).
Початкова вологість $W = 73$ %

Режим	Експозиція, с	Кінцева температура, °С	Результат (урожай із блоку, г)
1	100	72	70
2	120	77	87
3	140	92	106
4	160	96	96
5	180	96,5	82
6	100	74	59
7	120	79	83
8	140	88,5	110
9	160	94	89
10	180	96	74
11	10800	120	65
Контроль	–	20	24

Таблиця 4

Кількість грибів, вирощених на субстраті після обробки в МХ полі (перша хвиля плодоносіння).
Початкова вологість $W = 10$ % із наступним зволоженням до $W = 75$ %

Режим	Експозиція, с	Кінцева температура, °С	Результат (урожай із блоку, г)
1	10+60	72	70
2	10+70	77	97
3	10+80	92	120
4	10+90	96	136
5	15+60	96,5	65
6	15+70	74	77
7	15+80	79	79
8	15+90	88,5	86
Контроль	–	20	24

Аналіз отриманих даних дав можливість зробити висновок, що, на відміну від традиційних способів термічної обробки субстрату для вирощування грибів глива, застосування мікрохвильової технології має ряд істотних переваг. До них належать:

- висока швидкість підвищення температури в субстраті (10–12 оС за хвилину);
- одночасне об'ємне та рівномірне нагрівання всього субстрату, що перебуває в зоні робочої камери МХ установки;

– висока стерильність процесу обробки субстрату, більш комфортні умови праці;

– значно скорочується час обробки субстрату в робочій камері (до 5–8 хвилин).

Головні висновки.

1. Застосування мікрохвильової технології для підготовки рослинного субстрату здатне забезпечити високу швидкість підвищення температури в субстраті (10–12 оС за хвилину), високу стерильність процесу обробки субстрату та більш комфортні умови праці.

2. Двостадійний режим обробки соломи як основи субстрату для дереворуйнуючих грибів дає змогу істотно (в 1,28 разів) збільшити вихід плодівих тіл і в 1,4 рази знизити енерговитрати.

3. Розраховуючи на кг продукції та з урахуванням ККД мікрохвильової камери, магнетрона та електростанцій $\eta_{\square} = 35 \%$: $Q_{\text{мв}} = 4614$ Вт/кг. При проектуванні промислових мікрохвильових пристроїв і забезпеченні оптимального завантаження МХ камери ця величина може бути прийнята як вихідна для проведення конструкторських розрахунків.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані при впровадженні енергоефективної мікрохвильової технології виробництва субстрату для вирощування дереворуйнуючих грибів, зокрема гливи та шіїтаке.

Література

1. Pokhrel C.P., Kalyan N., Budathoki U., Yadav R.K.P. Cultivation of *Pleurotus sajorcaju* using different agricultural residues. *International Journal of Agricultural Policy and Research*. 2013. Vol. 1 (2). P. 19–23.
2. Дудка І.А., Вассер С.П., Бухало А.С. и др. Промышленное культивирование съедобных грибов. Киев: Наукова думка, 1978. С. 67–105.
3. Дудка І.А., Шепя В.В., Вассер С.П. и др. Вешенка обыкновенная. Киев: Наукова думка, 1981. С. 56–97.
4. Pakhomov A.G. et al. Comparative effects of extremely high power microwave pulses and brief CW irradiation on pacemaker function in isolated frog heart slices. *Bioelectromagnetics*. 2000. Vol. 21. P. 245–254.
5. Коломійчук С.Г., Бошкова І.Л., Калінін Л.Г., Бошкова О.Л. Перспективи впровадження мікрохвильової технології до промислового вирощування грибів. *Обладнання та технології харчових виробництв*. Т. 2. Вип. 13. Донецьк: ДонДУЕТ. 2005. С. 170–177.
6. Калинин Л.Г., Бошкова И.Л., Коломийчук С.Г. Разработка микроволновой технологии подготовки субстрата для дереворазрушающих грибов. *Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры: науч.-техн. сб.* 2007. Вип. 1. С. 100–104.
7. Schlegel W. Commercial pasteurization and sterilization of food products using microwave technology. *Food Tech*. 2003. Vol. 12. № 46. P. 62–63.
8. Chandrasekaran S., Ramanathan S., Basak T. Microwave Material Processing. A Review. *AIChE Journal*. 2012. Vol. 58 (2). P. 330–363.
9. Microwave sterilization of sliced beef in gravy in 7-oz trays / Z. Tang, G. Mikhaylenko, F. Liu, Jh. Mah, J. Tang et al. *Food Engineering*. 2008. Vol. 89 (4). P. 375–386.
10. Harlfinger L. Microwave sterilization. *Food Tech*. 1992. Vol. 46. № 12. P. 56–61.
11. Рогов И.А., Некруткин С.В. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1986. 351 с.