

**IMPACT ON KEY SPEED COOLANT CONVECTIVE HEAT AND MASS
TRANSFER PARAMETERS TERMORADIATSIYNOHO-DRYING
CULTIVATED MUSHROOMS**

**ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ НА ОСНОВНІ
ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПАРАМЕТРИ КОНВЕКТИВНО-
ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО СУШІННЯ КУЛЬТИВОВАНИХ ГРИБІВ
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВНЫЕ
ТЕПЛОМАСООБМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНВЕКТИВНО-
ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ СУШКИ КУЛЬТИВИРУЕМЫХ ГРИБОВ**

I. V. DUBKOVETSKIY, I.F. MALEJIK, T.V. BURLAKA

I. В. ДУБКОВЕЦЬКИЙ, І. Ф МАЛЕЖИК, Т.В. БУРЛАКА

И. В. ДУБКОВЕЦКИЙ, И. Ф МАЛЕЖИК, Т.В. БУРЛАКА

Transfer mechanism and intensity of moisture in the material depend on the interconnected complex due process violations moisture from the material vapor diffusion environment through capillary pore structure of the material. The work set depending on the basic characteristics of convective heat and mass-drying termoradiatsiynoho cultivated mushrooms oyster.

Механізм та інтенсивність перенесення вологи у матеріалі залежать від взаємопов'язаного комплексу процесів порушення зв'язку вологи з матеріалом та дифузії парогазового середовища через капілярно-порову структуру матеріалу. В даній роботі встановлені залежності основних тепломасообмінних характеристик конвективно-терморадіаційного сушіння культивованих грибів глива від швидкості руху повітря.

Механизм и интенсивность переноса влаги в материале зависят от взаимосвязанного комплекса процессов разрыва связи влаги с материалом и диффузии парогазовой среды через капиллярно-пористую структуру материала. В работе установлены зависимости основных тепломасообменных характеристик конвективно-терморадикационной сушки культивируемых грибов вешенка от скорости движения воздуха.

Key words: drying, mushrooms, radiation and convection method, radiation energy, infrared drying.

Ключові слова: сушіння, гриби, радіаційно-конвективний спосіб, опромінення, енерговитрати, інфрачервоне сушіння.

Ключевые слова: сушка, грибы, радиационно-конвективный способ, облучение, энергозатраты, инфракрасная сушка.

Вступ. Існує досить багато способів сушіння, які досить широко застосовуються на харчових підприємствах України. При конвективному висушуванні повітря є носієм теплоти від електрокалорифера до продукту, що є більш енергозатратним ніж при терморадіаційному при якому повітря не виконує функцію носія теплоти, а лише функцію відведення вологи. Недоліком інфрачервоного випромінювання є те, що енергія поглинається в основному поверхнею матеріалу, що висушується, частина якої віддається від поверхні матеріалу навколишньому повітрю. Компенсацію даної енергії необхідно здійснювати додатковим опроміненням, що призводить до деформації, короблення і розтріскування продукту, що погіршують якість сухого продукту. Інфрачервоне опромінення створює градієнт температур, спрямований всередину нарізного шматочку продукту, що перешкоджає тепломасопереносу, тобто погіршує умови переміщення вологи з внутрішніх шарів до зовнішніх.

Мета. Розроблення технологічного процесу і обладнання для виробництва сушених продуктів за допомогою різних методів сушіння і їх комбінації.

Методика експерименту. Визначення впливу швидкості повітря на процес сушіння культивованих грибів «глива звичайна» проводили при постійних параметрах: питоме навантаження – $4,4 \text{ кг/м}^2$; величина опромінення інфрачервоних ТЕНів – $E=8 \text{ кВт/м}^2$; довжина хвиль трубчастих «темних» ІЧ-генераторів – $2,0 \dots 4,0 \text{ мкм}$; відстань від інфрачервоних ТЕНів до продукту – 15 см ; швидкість руху теплоносія – $2,2 \dots 5,5 \text{ м/с}$; конвективне підведення теплоти здійснювали від зовнішнього ТЕНу потужністю 1 кВт ; товщина грибів на сітчастому піддоні, який вставляли в сушильну камеру – 8 мм .

Результати. Нами запропоновано комбінувати два способи підведення теплоти при сушінні – терморадіаційний і конвективний, що дозволило зменшити відносну вологість повітря і збільшити рушійну силу процесу в порівнянні з сушінням інфрачервоними променями. Для цього була спроектована і виготовлена сушильна установка, яка дозволяє сушити терморадіаційним і конвективним способами як окремо, так і їх поєднанням. (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд радіаційно-конвективної сушильної установки

Швидкість циркуляції повітря в сушильному пристрої - найважливіший параметр процесу сушіння. Чим вище швидкість циркуляції, тим, за інших рівних умов, менша тривалість процесу, вища продуктивність сушіння, менша нерівномірність сушіння матеріалу, більші витрати електроенергії і в більшості випадків вища собівартість. Нижче викладені результати досліджень впливу швидкості циркуляції сушильного агента на основні параметри процесу сушіння в радіаційно-конвективній установці періодичної дії.

У зв'язку з істотним впливом швидкості циркуляції на різні параметри процесу сушіння доцільним є встановлення оптимальних її значень.

Кількість теплоти, що витрачається на випаровування води при температурі 60 °С при різних швидкостях, наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Швидкість теплоносія, м/с	Тривалість сушіння, хв	Кількість теплоти Q		
		кВт год/кг води	МДж/кг води	кВт год/кг вих. сировини
2,5	110	4,48	16,2	3,95
3,5	100	5,45	19,6	4,8
4,5	95	6,65	23,9	5,85
5,5	90	7,04	25,4	6,2

Площа зовнішньої поверхні кілограма висушеного продукту при умові, що гриби нарізаються кубиками 20 мм,

$$F=6a^2 n = 6 \cdot 0,02^2 \cdot 1500 = 0,0024 \cdot 1430 = 3,6 \text{ м}^2 / \text{кг вих сировини}.$$

де a – сторона кубика, м; n – кількість кубиків.

Коефіцієнт теплообміну розраховують за формулою $\alpha = Q / \Delta t_{cp} F$,

де $\Delta t_{cp} = t_n - t_m = 60 - 50 = 10^\circ\text{C}$;

t_n – середньоарифметична температура повітря в сушильній камері;

t_m – температура матеріалу (в першому періоді сушіння рівна температурі мокрого термометра).

В процесі оброблення дослідних даних одержали графік залежності коефіцієнта теплообміну від температури теплоносія конвективно-терморадіаційним енергопідведенням (рис. 1).

Критерії Nu і Re знаходимо за відомими формулами: $Nu = \alpha d / \lambda$; $Re = \rho v d / \eta$, де d – визначальний розмір $d = 4F / \chi = 4a^2 / 4a = a = 0,02\text{м}$. Результати розрахунку для конвективно-терморадіаційного енергопідведення при температурі теплоносія 60 °С наведені в таблиці 2.

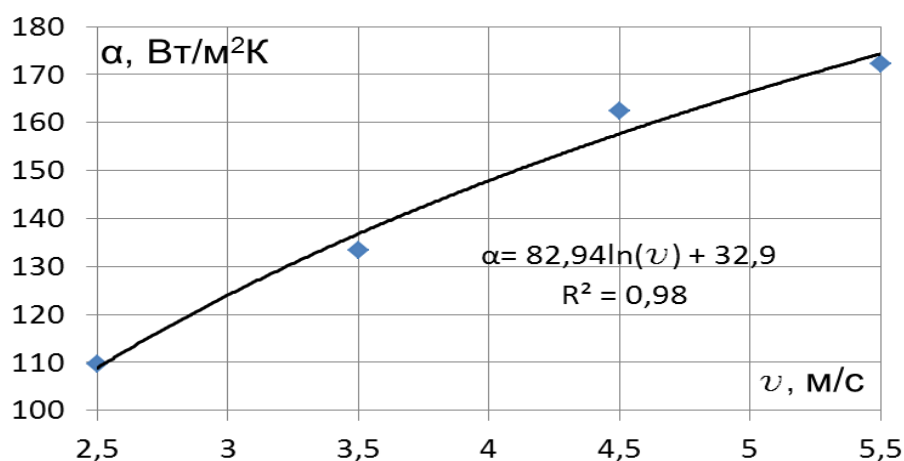


Рис.1. Залежність коефіцієнта тепловіддачі при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) від швидкості руху теплоносія при конвективно-терморадіаційним енергопідведенням температури 60 °С.

Таблиця 2.

Швидкість руху теплоносія, м/с	α , Вт/м²К	Nu комб	λ , Вт/м К	ρ , кг/м³	$\mu \cdot 10^6$, Па с	Re
2,5	109,7	78,4	0,028	1,025	20,1	2549,8
3,5	133,3	95,2				3569,7
4,5	162,5	116,1				4589,6
5,5	172,2	123				5609,5

В процесі оброблення дослідних даних одержали графік залежності критерія Нусельта від швидкості руху теплоносія для конвективно-терморадіаційного енергопідведення при температурі теплоносія 60 °С (рис. 2).

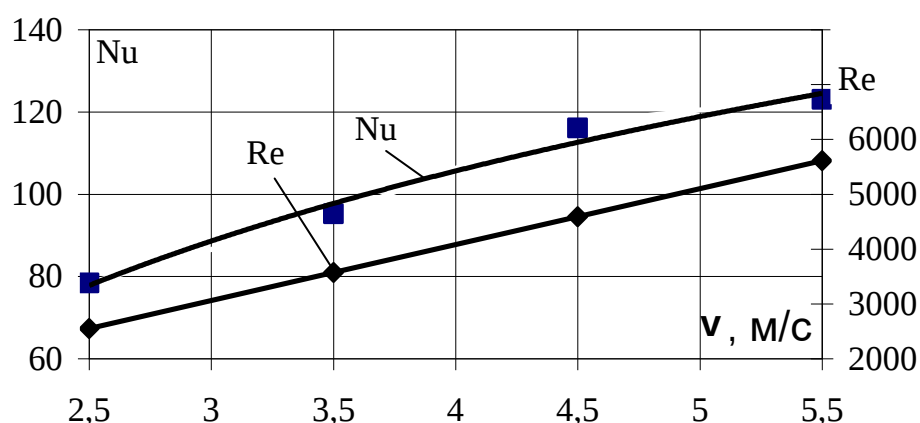


Рис.2. Залежність критерія Nu і Re від швидкості руху теплоносія при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) конвективно-терморадіаційним енергопідведенням при температурі теплоносія 60 °С.

Апроксимуючи одержані дані, вивели рівняння, що підпорядковуються логарифмічному закону:

$$Nu = 59,24 \ln v + 23,5 \text{ при } R^2 = 0,98;$$

Залежність критерія Re від швидкості руху теплоносія підпорядковуються лінійному закону. $Re = 1020 v$ при $R^2 = 0,98$.

Співставивши значення критерія Nu і критерія Re за різних швидкостей руху теплоносія при конвективно-терморадіаційному енергопідведенні одержали залежність $Nu = f(Re)$ (рис 3).

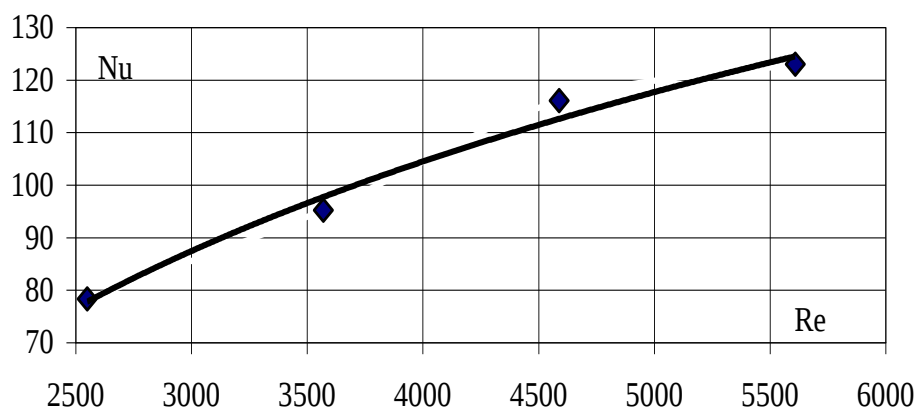


Рис. 3. Залежність критерія Nu від критерія Re при різних швидкостей руху теплоносія при конвективно-терморадіаційному при сушінні культивованих грибів Глива.

Апроксимуючи одержані значення критерія Nu при сушінні культивованих грибів (рис. 3), вивели рівняння:

$$Nu = 59,2 \ln Re - 387 \text{ при } R^2 = 0,98.$$

Швидкість процесу сушіння залежить від стану навколишнього середовища і умов сушіння, а повний потік води виражається через об'ємний коефіцієнт масовіддачі.

$$J = dW^c / d\tau = \beta(x_r - x) = \beta(x_1 - x)$$

де x_r – вологовміст насиченого повітря (кг/кг) на поверхні частинки;

$x_r = x_1$ – вологовміст повітря при постійній швидкості (перший період) сушіння (кг/кг). Обидві величини знаходимо за психрометричними даними. Молярна маса води $M_b = 18$, повітря $M_n = 29$, відносна вологість повітря $\phi = 64$. Парціальний тиск пари у насиченому повітрі p при різних температурах t

знаходимо з таблиць, а мольні доли m – з співвідношення $m_1 = p_{t1}/(1 - p_{t1})$, $p_{t1} = p_t/760$. При температурі 21°C $p_{t21} = 18,66/760 = 0,025$.

Молярна частка при 21°C $m_2 = p_{t21} / (1 - p_{t21}) = 0,016$. Вологовміст $x = (M_B/M_H)(m_2/(1-m_2)) = 0,01$. Вологовміст в першому періоді знаходиться за формулою $x_1 = (M_B/M_H)(m_1/(1-m_1))$. Результати розрахунку наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Температура теплоносія, $^\circ\text{C}$	Парціальний тиск, p_t мм.рт.ст	Парціальний тиск, p_{t21} мм.рт.ст	Молярна частка, m_1	Вологовміст, x_1 кг/кг
60	26	0,034	0,035	0,023

Значення потоку вологи $J = dW^c / dt$ і коефіцієнта масовіддачі $\beta = J/(x_1 - x)$ при різних швидкостях руху теплоносія наведені в таблиці 4.

Таблиця 4.

Швидкість руху теплоносія, м/с	Потік вологи при сушінні конвективно-терморадіаційним енергопідведенням, $J = dW^c / dt$, %/хв	Коефіцієнт масовіддачі при сушінні конвективно-терморадіаційним енергопідведенням β , м/с
2,5	14,8	1138
3,5	19,1	1469
4,5	21,8	1676
5,5	27,6	2123

В процесі оброблення дослідних даних за потоком вологи і різницею вологовмістів повітря на поверхні продукту і всередині теплоносія одержали графік залежності коефіцієнта масообміну від швидкості руху теплоносія при конвективно-терморадіаційному енергопідведенні за температури теплоносія 60°C . (рис. 4).

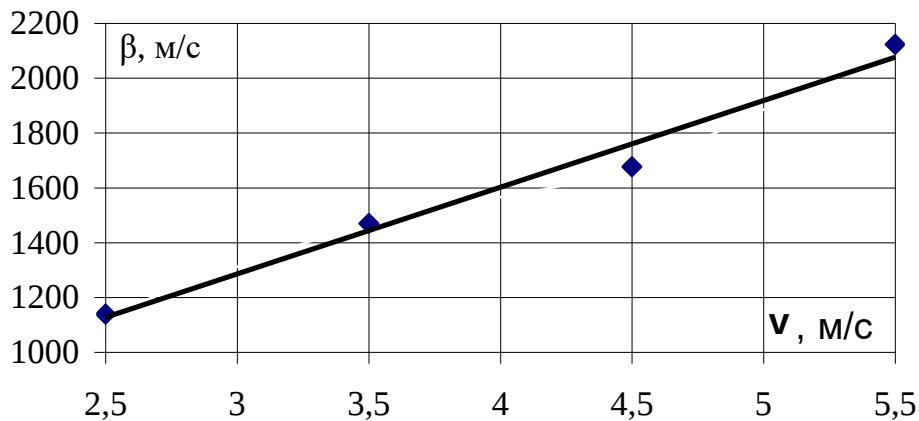


Рис.4. Залежність коефіцієнта масовіддачі від швидкості руху теплоносія при сушінні культивованих грибів Глива конвективно-терморадіаційним енергопідведенням при температурі теплоносія 60 °С.

Апроксимуючи експериментальні дані для коефіцієнтів масовіддачі при сушінні культивованих грибів, вивели рівняння

$$\beta = 316 v + 337 \text{ при } R^2 = 0,98.$$

Критерій Шервурда $Sh = \beta d/D$,

де D – коефіцієнт дифузії для парогазової суміші, кг/(м год мм рт. ст.);

$d = 0,02$ м – визначальний розмір.

Коефіцієнт дифузії знаходимо

$$D = D_c \cdot (M/R \cdot T) = 0,583 (0,018/0,06237 \cdot 56) = 0,00294 \text{ кг/(м год мм рт. ст.)}$$

де M – молекулярна маса рідини, що випаровується, кг/моль; $M_v = 0,018$ кг/моль;

$R = 0,06237$ (мм рт.ст. · м³)/(моль · К);

T – середня температура в примежовому шарі, яка знаходиться як середньоарифметична між температурами середовища і поверхнею продукту.

$$T = (t_n + t_m)/2 = 60 + 52 = 56 \text{ °С.}$$

D_c – знаходимо за формулою

$$D_c = D_c^0 ((T+273)/273)^n \cdot 760/p_b = 0,0792 ((56+273)/273)^2 \cdot 760/150 = 0,583 \text{ м}^2/\text{год, де}$$

$D_c^0 = 0,0792$ м²/год – коефіцієнт дифузії для водяної пари при 0° і 760 мм рт.ст. (знаходиться за таблицею); $n = 2$ – постійний коефіцієнт для водяної пари.

$p_b = 20000$ Па = 150 мм рт.ст. – тиск вологого повітря.

Значення середньої абсолютної температури в примежовому шарі, коефіцієнта дифузії для парогазової суміші і критерію Нусельта для масообміну при різній швидкості руху теплоносія і конвективно-терморадіаційному енергопідведенню при температурі теплоносія 60 °С наведені в табл.. 4.

Таблиця 4.

Швидкість руху теплоносія, м/с	T, °C	D, кг/(м год мм рт. ст.)	критерій Sh
2,5	56	0,0296	7745
3,5			9995
4,5			11408
5,5			14443

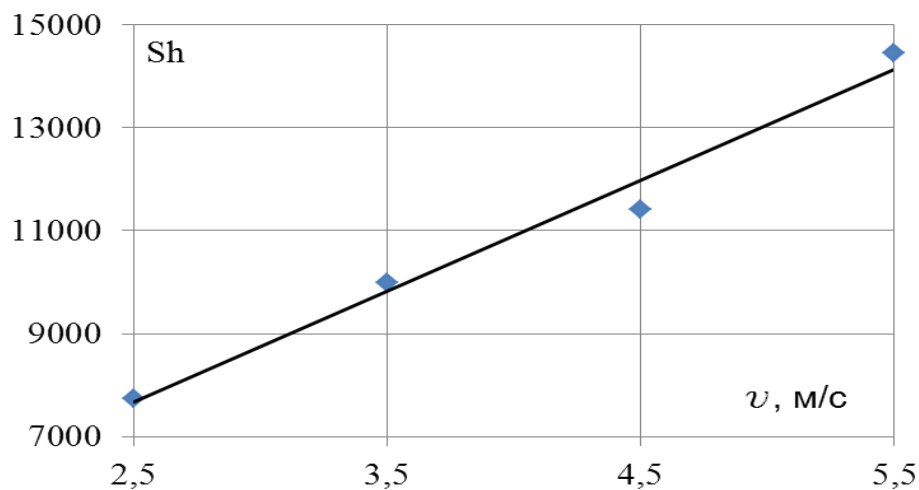


Рис.5. Залежність критерія Sh при сушінні культивованих грибів Глива від швидкості руху теплоносія при конвективно-терморадіаційному енергопідведенні і температурі теплоносія 60 °С

Апроксимуючи дані критерія Sh при сушінні культивованих грибів (рис. 5), вивели рівняння, що підпорядковуються лінійному закону:

$$Sh = 2151 v + 2295 \text{ при } R^2 = 0,98.$$

Співставивши значення критерія Sh і критерія Re при різних швидкостях руху теплоносія за конвективно-терморадіаційного енергопідведення, одержали залежність $Sh=f(Re)$ (рис 6):

$$Sh = 2,11 Re + 2295 \text{ при } R^2 = 0,98$$

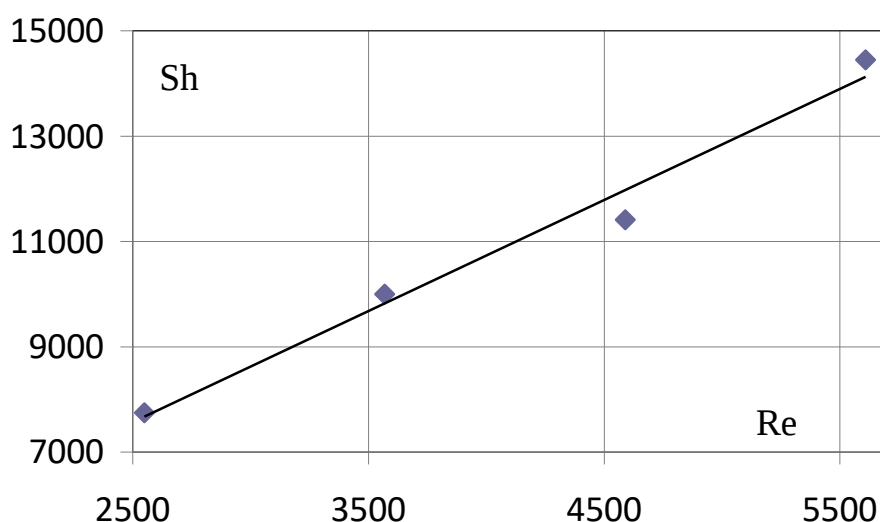


Рис. 6. Залежність критерія Sh від критерія Re при сушінні культивованих грибів Глива.

Якісні показники сушених глив при температурі 60 °C відповідають нормам діючих стандартів (ТУ 9164-001-373100436230-2004) (табл. 5).

Фізико – хімічні показники сушених грибів в розрахунку на 100 г

Таблиця 5

w, м/с	Загальний вміст сухих речовин, %.	Загальний вміст білка, %	Загальний вміст азоту, %	Масова частка мінеральних домішок, %, не більше	Зола, %
2,5	86,37	15,654±0,02	2,505±0,005	0,01	1,1
3,5	86,37	16,682±0,02	3,669±0,005	0,01	1,1
4,5	86,37	19,976±0,02	3,196±0,005	0,01	1,1
5,5	86,37	24,0±0,02	3,84±0,005	0,01	1,1

Висновки

Висушені комбінованим конвективно-терморадіаційним способом культивовані гриби мають найкращі органолептичні (зовнішній вигляд) і фізико-хімічні показники та найнижчі енерговитрати, порівнюючи з іншими способами сушіння. Тому цей спосіб сушіння доцільно рекомендувати для застосування.

Література

1. Патент на корисну модель 97303 Україна / Радіаційно-конвективна сушильна установка / Дубковецький І.В., Малежик І.Ф., Бурлака Т.В., Стрельченко Л.В.
2. Патент на корисну модель 97904 Україна / Спосіб сушіння культивованих грибів комбінованим енергопідведенням / Малежик І.Ф., Дубковецький І.В., Бурлака Т.В.
3. Бурлака Т.В., Дубковецький І.В., Малежик І. Ф. Дослідження сушіння культивованих грибів різними інфрачервоними випромінювачами //ОНАХТ, Наукові праці, 2015, випуск № 47, том 2, ст. 12-18.
4. Т.В. Бурлака, И.В. Дубковецкий, И.Ф. Малежик Исследование процесса сушки грибов комбинированным конвективно-терморadiационным методом. Новое в технологи и технике функциональных продуктов питания на основе медико биологических воззрений. Сборник научных трудов за материалами Международной научно-технической конференции посвященной 85-летию ФГБОУ ВПО Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж 4-5 июня 2015 г., с. 496-499
5. Дубковецький І.В., Бурлака Т.В., Стрельченко Л.В. Дослідження кінетики комбінованого методу сушіння грибів гливи Наукові праці ОНАХТ, випуск 45, т. 2, 2014, с.46-50

Відомості про авторів/Сведения об авторах/About the Authors

ДУБКОВЕЦЬКИЙ Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій, кафедра процесів і апаратів харчових виробництв; 0987191396; e-mail: dubkov78@ukr.net

МАЛЕЖИК Іван Федорович – доктор технічних наук, професор, Національний університет харчових технологій, кафедра процесів і апаратів харчових виробництв;

БУРЛАКА Тетяна Василівна – аспірантка; Національний університет харчових технологій, кафедра процесів і апаратів харчових виробництв; тел. 0993075102; e-mail: burlakat@ukr.net.

Надійшла до редакції 29.06.2016.