

Hrushkovska A.O., Danylenko S.H., Kryzhska T.A., Khonkiv M.O. APPLICATION OF LACTIC ACID BACTERIA ON THE INDICATORS OF RYE SOURCE	92
Lisnichemko E.O., Sokolova E.B., Karpenko Z.P. DEVELOPMENT OF THE RECIPES MELTED CHEESE WITH ENHANCED BIOLOGICAL VALUE THROUGH THE INTRODUCTION OF SERUM CONCENTRATE PROTEIN	98
Medvid I.M., Shydlovska O.B., Dotsenko V.F. THE RESEARCH OF HYDROCOLLOIDS INFLUENCE ON STRUCTURAL MECHANICAL DOUGH PROPERTIES AND QUALITY OF GLUTEN FREE BREAD	104
Roiko O.M., Arsenyeva L.Yu., Roiko O.Yu., Palamarchuk O.P. REASONING AND DEVELOPING OF TECHNOLOGY FOR EXTRACT ON THE BASIS OF FUNCTIONAL PHYTOCOMPOSITE “ANTI-STRESS” WITH ADAPTOGENIC ACTION	111
Simakhina G.O. IMPROVEMENT OF BERRY FREEZING TECHNOLOGY BY COMBINATION OF ARTIFICIAL COLD AND CRYOPROTECTION	117
Skrypnychenko D.M., Kaziuk V.O., Bezzemelnyy O.M. THE TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF WHEY DRINKS WITH A SPORT PURPOSE	122
TRANSPORT	
Koskina Yu.O. PROCESS APPROACH TO DESCRIPTION OF DELIVERY OF GOODS WITH PARTICIPATION OF MARITIME TRANSPORT	128
Lapkina I.O., Malaksiano M.O., Glavatskykh V.I. TO THE ISSUE OF THE POSSIBILITY OF OPERATING VESSELS AT SLOW SPEEDS.....	134
Strelko O.H., Kyrychenko H.I., Berdnychenko Yu.A., Lyman A.S. IMPROVEMENT OF CUSTOMER SERVICE SYSTEM ON UKRAINIAN RAILWAYS BASED ON THE EXPERIENCE OF OTHER STATES.....	141
Shevchuk V.V., Kutkovetska T.O. ANALYSIS OF THE MOBILE MACHINES HYDRAULIC SYSTEMS DURABILITY	146
ELECTRONICS	
Ocheretko O.Y., Rozorinov H.M. DIGITAL MOVIE DISTRIBUTION AND PROTECTION TECHNOLOGIES	151
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	159

УДК 621.3.061

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-2/01>**Аракелян В.П.**

Национальный политехнический университет Армении

ОЦЕНКА ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ Z-МАТРИЦЫ НОВОГО ТИПА

Вступне слово про тему дослідження: управління електроенергетичними системами здійснюється зі зміною параметрів режиму і схеми. Режим роботи системи характеризується параметрами, які в процесі ведення режиму можна змінити. Напряга вважається одним з важливих параметрів режиму системи. Під час досліджень режимів системи, необхідно враховувати вплив падіння напруги на якість електроенергії. Мета наукового дослідження – оцінка падіння напруги з застосуванням Z-матриці узагальнених параметрів схеми електроенергетичної системи. Опис наукової та практичної значущості роботи. Наукова цінність роботи: представлено новий підхід, в основі якого лежить застосування Z-матриці узагальнених параметрів. Практична значущість: забезпечує універсальність для оцінки якості електроенергії в живильних і системоутворюючих електричних мережах. Представлений новий підхід, в основі якого лежить застосування Z-матриці узагальнених параметрів.

Опис методології дослідження: з огляду на різні види моделювання ЛЕП сучасних ЕЕС, складність схем електричних мереж, з допомогою Z-матриці отримані нові формули падіння напруги. Основні результати, висновки дослідницької роботи: дослідження проводилося для макромоделі ЕЕС Вірменії. Аналіз показує, що запропоновані формули прийнятним для живильних мереж. У формулах розглядаються синтез компонентів падіння напруги та параметрів схеми. Цінність проведеного дослідження (який внесок даної роботи в відповідну галузь знань): запропонований підхід розширює визначення меж взаємодії узагальнених параметрів і напруги. Практичне значення результатів роботи: отримані компактні формули дозволяють всебічно проаналізувати коефіцієнт падіння напруги.

Висновок з даного дослідження, містить розрахунок напружень із застосуванням Z-матриці в ЕЕС з мережами 110-220 кВ без урахування поперечних пасивних параметрів ЛЕП, не вносить суттєвих змін, а лише ускладнює процес розрахунку. Наведено, значення коефіцієнта падіння напруги відповідає вимогам міждержавного стандарту ГОСТ-13109-97, $K_{Uij} \wedge 220 \leq 1.15$. Зроблено, розрахунок напружень і оцінка падіння напруги із застосуванням Z-матриці в ЕЕС з мережами 110-220 кВ, може здійснюватися без урахування поперечних пасивних параметрів ЛЕП і складена в середовищі Java комп'ютерна програма забезпечує високу точність розрахунків та широкі межі застосування.

Перспективи подальших досліджень спрямовані на дослідження розрахунку напруг із застосуванням Z-матриці в системоутворюючих електричних мережах з урахуванням поперечних пасивних параметрів ЛЕП і на дослідження розрахунку втрат потужності з застосуванням Z-матриці в електричних мережах з урахуванням поперечних пасивних параметрів ЛЕП.

Ключові слова: електроенергетична система, узагальнений параметр, поперечний параметр, позовжній параметр, падіння напруги.

Постановка проблеми. Развитие современной электроэнергетики сопровождается ростом установленной мощности электростанций и мощности потребителей электроэнергии, усложнением конфигурации электрических сетей. Элементы электроэнергетических систем имеют множество внутренних и наружных связей, которые требуют большого объема информации для расчета и анализа ее режимов. Модель схемы электрической системы характеризует конфигу-

рацию электрической сети. Электрическая схема моделируется с помощью схем замещения элементов системы. Схемы замещения содержат продольные и поперечные пассивные параметры линий электропередач, трансформаторов. Пассивные параметры образуют Z-матрицу обобщенных параметров сети. С этой точки зрения усложняется управление режимов электроэнергетических систем. Один из важных задач управления режимами, является обеспечение в узлах

электроэнергетической (электрической) системы допустимый уровень напряжения в соответствии с ГОСТ-13109-97.

Анализ последних исследований и публикаций. Узловые напряжения системы зависят от падения напряжения в линиях электропередач. Уравнения узловых напряжений в матричной форме будет [3]:

$$\dot{U} = \dot{U}_{0Б} + Z \cdot \dot{I}, \quad (1)$$

где $\dot{U}_{0Б}$ – вектор-столбец, каждый элемент которого равен напряжению базисного узла; \dot{U} и \dot{I} – вектор-столбцы узловых комплексных напряжений и токов; $Z = Y^{-1}$ – узловая комплексная матрица собственных и взаимных сопротивлений.

Возможности компьютерных технологий позволяют моделировать режимы электрических систем, учитывая формулы обобщенных параметров [6-8].

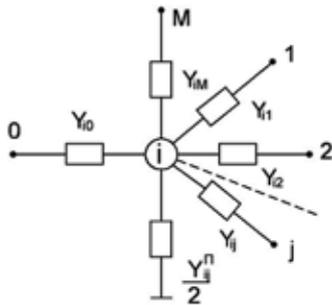


Рис. 1. Схема узла ЭЭС

Представляя линию электропередачи (ЛЭП) моделью Y , для взаимных комплексных проводимостей получим:

$$\begin{aligned} Y_{i0} &= (Z_{i0})^{-1}, Y_{i1} = (Z_{i1})^{-1}, \\ Y_{i2} &= (Z_{i2})^{-1}, \dots, Y_{ij} = (Z_{ij})^{-1}, Y_{iM} = (Z_{iM})^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Полные комплексные сопротивления ветвей определяются в виде:

$$\begin{cases} Z_{i0} = \dot{W}_{B,i0} sh \dot{\gamma}_{0,i0} l_{i0}, Z_{i1} = \dot{W}_{B,i1} sh \dot{\gamma}_{0,i1} l_{i1}, \\ Z_{i2} = \dot{W}_{B,i2} sh \dot{\gamma}_{0,i2} l_{i2}, Z_{i3} = \dot{W}_{B,i3} sh \dot{\gamma}_{0,i3} l_{i3}, \\ \dots \\ Z_{ij} = \dot{W}_{B,ij} sh \dot{\gamma}_{0,ij} l_{ij}, Z_{iM} = \dot{W}_{B,iM} sh \dot{\gamma}_{0,iM} l_{iM}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\dot{W}_{B,i0}, \dot{W}_{B,i1}, \dot{W}_{B,i2}, \dots, \dot{W}_{B,ij}, \dot{W}_{B,iM}$ – комплексные величины волновых сопротивлений ЛЭП; $\dot{\gamma}_{B,i0}, \dot{\gamma}_{B,i1}, \dot{\gamma}_{B,i2}, \dots, \dot{\gamma}_{B,ij}, \dot{\gamma}_{B,iM}$ – комплексные коэффициенты распространения волны ЛЭП; $l_{B,i0}, l_{B,i1}, l_{B,i2}, \dots, l_{B,ij}, l_{B,iM}$ – длины ЛЭП.

Учитывая узловую Z -матрицу сопротивлений, обобщенные коэффициенты падения напряжения, модифицированную Z -матрицу, перепад напряжения определяется по формуле [9-11]:

$$K_{U_{ij}}^{0Б} = \sqrt{\frac{(1 + K_{\Delta i}^{0Б})^2 + (K_{\delta i}^{0Б})^2}{(1 + K_{\Delta j}^{0Б})^2 + (K_{\delta j}^{0Б})^2}}, \quad (4)$$

где $K_{\Delta i}^{0Б}, K_{\delta i}^{0Б}$ – коэффициенты продольной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, относительно базисного узла с индексом «0»; $K_{\Delta j}^{0Б}, K_{\delta j}^{0Б}$ – коэффициенты поперечной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, относительно базисного узла с индексом «0».

Формула (4) необходимо усовершенствовать при учете продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС.

Постановка задачи. Предлагается оценить падение напряжения с применением Z -матрицы обобщенных параметров схемы электроэнергетической системы (ЭЭС), учитывая:

1. Продольные пассивные параметры линий электропередач: активные и реактивные сопротивления.
2. Продольные и поперечные пассивные параметры линий электропередач: активные и реактивные сопротивления, активные и реактивные проводимости.
3. Пределы применения расчетов напряжения.

Изложение основного материала исследования. Предположим, что электроэнергетическая система (ЭЭС) состоит из $M+1$ узлов (см. рис. 2).

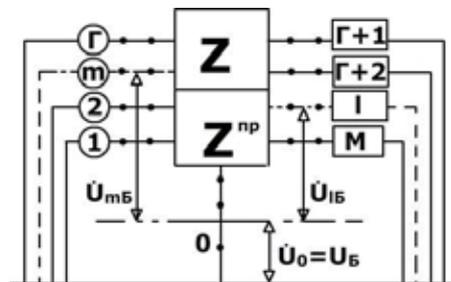


Рис. 2. Схема замещения ЭЭС Z-формой

В качестве базисного (балансного) выбирается узел с индексом «0». Принимается, что мощности узлов станций (1,2,...,Г) и нагрузки (Г+1, Г+2,..., Г+Н=М) приведены на шины повышающих и понижающих трансформаторных подстанций [6]. При этом уравнении состояния электрической системы в Z -форме принимает следующий вид [10]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_{0Б} + Z_{11} \cdot \dot{I}_1 + Z_{12} \cdot \dot{I}_2 + \dots + Z_{1M} \cdot \dot{I}_M, \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_{0Б} + Z_{21} \cdot \dot{I}_1 + Z_{22} \cdot \dot{I}_2 + \dots + Z_{2M} \cdot \dot{I}_M, \\ \dots \\ \dot{U}_M &= \dot{U}_{0Б} + Z_{M1} \cdot \dot{I}_1 + Z_{M2} \cdot \dot{I}_M + \dots + Z_{MM} \cdot \dot{I}_M. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\dot{U}_{0Б}, \dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_M$ – комплексные напряжения узлов 0,1,...,М электрической системы; $\dot{I}_1,$

$\dot{I}_2, \dots, \dot{I}_M$ – комплексные токи узлов $1, 2, \dots, M$ электрической системы; $Z_{12}, \dots, Z_{1M}, Z_{21}, \dots, Z_{2M}, \dots, Z_{M1}, \dots, Z_{MM}$ – взаимные комплексные сопротивления независимых узлов электрической системы; $Z_{11}, Z_{22}, \dots, Z_{MM}$ – собственные комплексные сопротивления независимых узлов $1, 2, \dots, M$ электрической системы.

Система алгебраических уравнений установившегося режима электрической системы (5) в компактной форме, принимает вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_{0Б} + Z \cdot \dot{I}, \quad (6)$$

где $\dot{U}_{0Б}$ – вектор-столбец, каждый элемент которого равен напряжению базисного узла, \dot{U} и \dot{I} – вектор-столбцы узловых комплексных напряжений и токов, Z – узловая комплексная матрица собственных и взаимных сопротивлений, обусловленный продольными и поперечными пассивными параметрами линий электропередач.

В электрической системе, учитывая только продольные пассивные параметры линии электропередачи, получаем:

$$\dot{U}^{np} = \dot{U}_{0Б} + Z^{np} \cdot \dot{I}, \quad (7)$$

где \dot{U}^{np} – вектор-столбец узловых комплексных напряжений, обусловленный продольными пассивными параметрами линий электропередач; Z^{np} – узловая комплексная матрица собственных и взаимных сопротивлений, обусловленный продольными пассивными параметрами линий электропередач.

Матричные компактные уравнения (6) и (7) представляем с падением напряжения, получаем:

$$\dot{U} = U_{0Б} + d\dot{U}, \quad (8)$$

$$\dot{U}^{np} = U_{0Б} + d\dot{U}^{np}, \quad (9)$$

где $d\dot{U}$ – матрица узлового падения напряжения, обусловленный продольными и поперечными пассивными параметрами линий электропередач; $d\dot{U}^{np}$ – матрица узлового падения напряжения, обусловленный продольными пассивными параметрами линий электропередач.

Учитывая продольные и поперечные составляющие падения напряжения, уравнения (8) и (9) принимают следующие виды:

$$\dot{U} = U_{0Б} + \Delta U + \delta \dot{U}, \quad (10)$$

$$\dot{U}^{np} = U_{0Б} + \Delta U^{np} + \delta \dot{U}^{np}, \quad (11)$$

где \emptyset – матрица продольной составляющей узлового падения напряжения схемы ЭЭС, обусловленный продольными и поперечными параметрами; $\delta \dot{U}$ – матрица поперечной составляющей узлового падения напряжения схемы ЭЭС, обусловленный продольными и поперечными

параметрами; $\emptyset U^{np}$ – матрица продольной составляющей узлового падения напряжения схемы ЭЭС, обусловленный продольными параметрами; $\delta \dot{U}^{np}$ – матрица поперечной составляющей узлового падения напряжения схемы ЭЭС, обусловленный продольными параметрами.

Падение напряжения определяется по следующей формуле:

$$K_{Uij} = \frac{U_i}{U_j}, \quad (12)$$

где U_i – модуль напряжения i -го узла, U_j – модуль напряжения j -го узла.

Применяя формулу (12), используя матричные уравнения (10) и (11), после соответствующих преобразований, получаем [5]:

$$K_{Uij} = \sqrt{\frac{(1 + K_{\Delta i})^2 + (K_{\delta i})^2}{(1 + K_{\Delta j})^2 + (K_{\delta j})^2}}, \quad (13)$$

$$K_{Uij}^{np} = \sqrt{\frac{(1 + K_{\Delta i}^{np})^2 + (K_{\delta i}^{np})^2}{(1 + K_{\Delta j}^{np})^2 + (K_{\delta j}^{np})^2}}, \quad (14)$$

где $K_{\Delta i}, K_{\delta i}$ – коэффициенты продольной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, при наличии продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС; $K_{\delta i}, K_{\delta j}$ – коэффициенты поперечной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, при наличии продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС; $K_{\Delta i}^{np}, K_{\delta i}^{np}$ – коэффициенты продольной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, при наличии продольных элементов схемы ЭЭС; $K_{\delta i}^{np}, K_{\delta j}^{np}$ – коэффициенты поперечной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, при наличии продольных элементов схемы ЭЭС.

$$\left. \begin{aligned} K_{\Delta i} &= \frac{\Delta U_i}{U_{0Б}} \\ K_{\Delta j} &= \frac{\Delta U_j}{U_{0Б}} \\ K_{\delta i} &= \frac{\delta U_i}{U_{0Б}} \\ K_{\delta j} &= \frac{\delta U_j}{U_{0Б}} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{\Delta i}^{np} &= \frac{\Delta U_i^{np}}{U_{0Б}} \\ K_{\Delta j}^{np} &= \frac{\Delta U_j^{np}}{U_{0Б}} \\ K_{\delta i}^{np} &= \frac{\delta U_i^{np}}{U_{0Б}} \\ K_{\delta j}^{np} &= \frac{\delta U_j^{np}}{U_{0Б}} \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

Исследование проводилось для макромодели ЭЭС Армении. Для решений уравнения установившегося режима применяется метод простой итерации. Результаты исследований представлены в таблицах 1-4.

Таблица 4

Коэффициенты падения напряжения при наличии продольных элементов схемы ЭЭС

K_{ij}	K_{ϱ}^{np}	$K_{\delta i}^{np}$	$K_{\varrho j}^{np}$	$K_{\delta j}^{np}$	K_{Uij}^{np}
01	0	0	-0.0367	-0.0281	1.0376
03	0	0	-0.0437	-0.0376	1.0449
12	-0.0367	-0.0281	-0.024	-0.0135	0.9873
14	-0.0367	-0.0281	-0.0431	-0.0355	1.0064
24	-0.024	-0.0135	-0.0431	-0.0355	1.0193
34	-0.0437	-0.0376	-0.0431	-0.0355	0.9994

Таблица 1

Падение напряжения при наличии продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС

Узел	\dot{U}_i , кВ	$ U_i $, кВ	$d\dot{U}$, кВ
1	211.8832 – j6.2059	211.974	-8.1168 – j6.2059
2	214.6686 – 2.9924	214.6895	-5.3314 – j2.9924
3	210.353 – j8.3088	210.517	-9.647 – j8.3088
4	210.4592 – j7.8454	210.6054	-9.5408 – j7.8454

Таблица 2

Падение напряжения при наличии продольных элементов схемы ЭЭС

Узел	\dot{U}_i^{np} , кВ	$ U_i^{np} $, кВ	$d\dot{U}_i^{np}$, кВ
1	211.9235 – j6.1845	212.0137	-8.0765 – j6.1845
2	214.7136 – 2.9704	214.7341	-5.2864 – j2.9704
3	210.3859 – j8.2911	210.5492	-9.6141 – j8.2911
4	210.4991 – j7.8234	210.6444	-9.5009 – j7.8234

Таблица 3

Коэффициенты падения напряжения при наличии продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС

K_{ij}	K_{ϱ}	$K_{\delta i}$	$K_{\varrho j}$	$K_{\delta j}$	K_{Uij}
01	0	0	-0.0368	-0.0282	1.0377
03	0	0	-0.0438	-0.0377	1.045
12	-0.0368	-0.0282	-0.0242	-0.0136	0.9874
14	-0.0368	-0.0282	-0.0433	-0.0356	1.0065
24	-0.0242	-0.0136	-0.0433	-0.0356	1.0193
34	-0.0438	-0.0377	-0.0433	-0.0356	0.9995

Выводы. Таким образом, получены такие выводы:

1. расчет напряжений с применением Z-матрицы в ЭЭС с сетями 110-220 кВ без учета поперечных пассивных параметров ЛЭП, не вносит существенные изменения, а лишь усложняет процесс расчета;

2. значение коэффициента падения напряжения соответствует требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ-13109-97, K_{Uij}^{220} " 1.15;

3. расчет напряжений и оценка падения напряжения с применением Z-матрицы в ЭЭС с сетями 110-220 кВ, может осуществляться без учета поперечных пассивных параметров ЛЭП;

4. составленная в среде Java компьютерная программа обеспечивает высокую точность расчетов и широкие границы применения.

Перспективы дальнейших исследований:

1. исследование расчета напряжений с применением Z-матрицы в системообразующих электрических сетях с учетом поперечных пассивных параметров ЛЭП;

2. исследование расчета потерь мощности с применением Z-матрицы в электрических сетях с учетом поперечных пассивных параметров ЛЭП.

Список литературы:

1. Аракелян В.П., Акопян Л. А. Новый подход к определению Y-матрицы электроэнергетической системы. Известия НАН РА и ННУА. Сер. технических наук. 2012. Т. LXV, № 2. С. 184–189.
2. Xi-Fan Wang, Yonghau Song, Malcolm Irving Modern Power Systems Analysis. Springer Science + Business Media. New York, 2008. 569 p.
3. Аракелян В.П. Применение нового Z-матрицы для расчета потерь напряжения электроэнергетической системы. ВИАА. 2012.Т.9, № 3. С. 530–531.
4. Аракелян В.П., Акопян Л. А. Новая характеристика перепада напряжения линии электропередач. ВИАА. 2010. Т.7, № 3. С. 464–465.
5. Аракелян В.П. Модифицированные формулы перепада напряжений электроэнергетической системы при замене базисной электростанций. ВИАА 2016.Т.13, № 1. С. 54–58.
6. Аракелян В.П., Акопян Л. А. Новый подход к определению Y-матрицы электроэнергетической системы. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2012. Т. LXV, № 2. С. 184–189.

7. Xi-Fan Wang, Yonghau Song, Malcolm Irving Modern Power Systems Analysis.-Springer Science + Business Media. New York, 2008. 569 p.
8. Duncan Glover J., Mulukutla Sarma S., Overbye Thomas J. Power system analysis and design. 4th. ed. Thomson Australia. Brazil. Canada. Mexico. Singapore. United Kingdom. United States. 2008. 767 p.
9. Аракелян В.П., Акопян Л.А. Новая характеристика перепада напряжения линии электропередач. ВИАА. 2010. Т.7, № 3. С. 464–465.
10. Аракелян В.П. Модифицированные формулы перепада напряжений электроэнергетической системы при замене базисной электростанций. ВИАА. 2016.Т.13, № 1. С. 54–58.
11. Ramana N. V. Power System Analysis. Chennai. Delhi. Chandigarh. Pearson. 2011. 445 p.

Arakelyan P.A. ESTIMATION OF THE VOLTAGE DROP IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM USING A Z-MATRIX OF A NEW TYPE

Introductory speech on the research topic: management of electrical power systems is carried out with a change in the parameters of the regime and scheme. The regime of the system is characterized by parameters that can be changed in the process of maintaining the regime. Voltage is considered one of the important parameters of the system regime. During studies of the system regimes, it is necessary to consider the effect of the voltage drop on the quality of electricity.

The electrical system circuit model characterizes the electrical network configuration. The electrical circuit is modeled using replacement schemes for system elements. The equivalent circuits contain longitudinal and transverse passive parameters of power lines, transformers. Passive parameters form a Z-matrix of generalized network parameters.

The purpose of scientific research – estimation of the voltage drop using the Z-matrix of generalized parameters of the scheme of the electric power system. Description of scientific and practical significance of the work: the scientific value of the work: a new approach is presented, the basis of which is the use of the Z-matrix of generalized parameters. Practical significance: provides versatility for assessing the quality of electricity in the supply and system-forming electrical networks.

Description of the research methodology: taking into account the different types of modeling of power transmission lines of modern power systems, the complexity of the schemes of electrical networks, using the Z-matrix, new formulae for voltage drops were obtained. Main results, conclusions of the research work: the study was conducted for the macromodel of electric power system of Armenia. The analysis shows that the proposed formulae are acceptable for supply networks. The formulae consider the synthesis of voltage drop components and circuit parameters.

The value of the conducted research (what contribution of this work to the relevant branch of knowledge): the proposed approach extends the definition of the boundaries of the interaction of generalized parameters and voltage. Practical significance of the results of work: the obtained compact formulae allow for a comprehensive analysis coefficient voltage drop.

The conclusion from this study is that the calculation of voltages using Z-matrix in electric power grids with networks of 110-220 kV without taking into account the transverse passive parameters of the transmission lines, does not make significant changes, but only complicates the calculation process. The value of the voltage drop ratio meets the requirements of the interstate standard GOST-13109-97, $K_{Uij}^{220} \leq 1.15$. The calculation of voltages and the estimation of voltage drop with the use of a Z-matrix in electric power grids with 110-220 kV networks can be carried out without taking into account the transverse passive parameters of the transmission lines, and Java software ensures high accuracy of calculations and wide application scope.

Prospects of further research shall be directed to studying the calculation of voltages using Z-matrix in the backbone electrical networks, taking into account the transverse passive parameters of power lines and to studying of calculating power losses using the Z-matrix in electric networks, taking into account the transverse passive parameters of power lines.

Key words: electric power system, generalized parameter, transverse parameter, longitudinal parameter, voltage drop.

Бошкова И.Л.

Одесская национальная академия пищевых технологий

Волгушева Н.В.

Одесская национальная академия пищевых технологий

Колесниченко Н.А.

Военная академия (г. Одесса)

Бошков Л.З.

Одесская национальная академия пищевых технологий

Паскаль А.А.

Одесская национальная академия пищевых технологий

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ

Розглядаються питання оцінки енергетичної ефективності перетворення енергії мікрохвильового поля у внутрішню енергію рослинного матеріалу, що обробляється. Відзначається важливість зниження витрат енергії при збереженні якості продукту. Підкреслюється, що універсальним критерієм оцінки ефективності теплових процесів є коефіцієнт корисної дії ККД, визначення якого є відправною точкою в дослідженнях, проведених з метою оптимізації теплопереносу. Аналізується вид для загального енергетичного ККД перетворення мікрохвильової енергії, що включає ККД магнетрона й ККД робочої камери. Наведено результати експериментів і теплових розрахунків ККД мікрохвильової камери для ряду зернових матеріалів. Отримано, що раціональна організація шару матеріалу здатна істотно збільшити ККД камери. Показано, що в межах завантаження з однією масою велике значення має співвідношення площі відкритої поверхні до товщини шару. Відзначається складність оцінки аналітичним шляхом напруженості електричного поля в мікрохвильовій камері з матеріалом, що обробляється. Наведено залежність, що дозволяє визначати величину напруженості електричного поля за результатами експериментальних досліджень. Проведені теплові розрахунки дають можливість визначити умови для підвищення рівня перетворення мікрохвильової енергії у внутрішню енергію матеріалу. Запропоновано залежність для оцінки величини напруженості електричного поля за рівнем вихідної потужності магнетрона й характеристик матеріалу, що закладається в камеру. Показано, що питома потужність, що виділяється у вигляді тепла в одиниці об'єму матеріалу, може бути розрахована з урахуванням ККД мікрохвильової камери. Для визначення ККД мікрохвильової камери доцільно встановити залежність цієї величини від виду матеріалу, що обробляється, та об'єму, що він займає.

Ключові слова: тепловий ефект, коефіцієнт корисної дії, мікрохвильова камера, зерно, шар, напруженість електричного поля.

Постановка проблеми. Вопрос энергетической эффективности является определяющим для большинства технологических процессов. Одной из задач, возникающих при разработке новых технологий, является снижение затрат потребляемой энергии при соблюдении требований к качеству конечного продукта. В настоящее время методы оценки энергоэффективности отличаются разнообразием, они могут включать такие характеристики, как теплофизические свойства, качество энергии, производительность и прочее, однако

при всем многообразии подходов, определяемых спецификой конкретных разработок, универсальным критерием оценки эффективности тепловых процессов является коэффициент полезного действия КПД, определение которого является отправной точкой в исследованиях, проводимых с целью оптимизации теплопереноса. В рамках рассматриваемой темы одной из ключевых проблем являлось определение условий, при которых энергия микроволнового электромагнитного поля с максимальной эффективностью поглощалась

(преобразовывалась во внутреннюю энергию) исследуемого материала.

Анализ современных исследований и публикаций. В исследованиях, составляющих основу данной работы, изучались эффекты микроволнового взаимодействия с диэлектрическими материалами растительной природы, которые проявлялись при сушке [1-3], экстрагировании [4-5], биостимуляции семян [6-7], термической обработке растительного материала [8-9], термообработке глиняных изделий [10]. Особенности нагрева в микроволновом поле и специфика структуры диэлектрического материала (в основном – органического происхождения) определяет ряд ограничений, непосредственно связанных с требованиями к качеству конечного продукта. Особую сложность представляет определение напряженности электрического поля в материале. Аналитические представления для расчета этой величины сложны и малопригодны. Однако для расчета микроволновой энергии, преобразованной в тепловую, необходимо значение напряженности электрического поля. Удельная мощность, выделяющаяся в виде тепла в единице объема материала, находящегося в микроволновом поле, выражается уравнением (1) и связана с его диэлектрическими характеристиками, частотой МВ поля и напряженностью [11]:

$$q = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3, \quad (1)$$

Применение зависимости (1) достаточно проблематично, но анализ всех величин, входящих в него, и сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований их влияния на эффективность использования микроволновой энергии, изменений этих величин при изменении условий проведения опыта и в процессе опыта позволяют понять физические особенности преобразования микроволновой энергии.

Цель работы – определение условий повышения энергетической эффективности преобразования энергии микроволнового поля при нагреве растительных материалов.

Изложение основного материала и обоснование результатов исследования. Для анализа специфики поглощения микроволновой энергии материалом большое значение имели исследования зависимости величины поглощенной микроволновой энергии от загрузки камеры. Выражение общего энергетического КПД [12] представляется в следующем виде: $\eta = \eta_m \cdot \eta_k$, где η_m – КПД магнетрона, η_k – КПД микроволновой камеры. Значение η_m показывает, с каким КПД магнетрон преобразует энергию электрического

поля промышленной частоты (50 Гц) в энергию с частотой микроволнового поля. Эта величина является паспортной. Значение η_k зависит от условий согласования магнетрона с волноводом и загружаемым материалом, вследствие сложности ее предсказания возникает необходимость в проведении масштабных экспериментов.

КПД камеры рассчитывался как отношение теплоты, преобразованной материалом, при расчете которой учитывалось значение полезного теплового потока $Q_{\text{пол}}$, потери в окружающую среду (объем рабочей камеры) в результате естественной конвекции $Q_{\text{конв}}$ и лучистого теплообмена между образцом и стенками камеры ($Q_{\Sigma} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{луч}}$), к выходной мощности магнетрона:

$$\eta_k = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{\text{вых}}}, \quad (2)$$

Материалы растительного происхождения имеют свою специфику, заключающуюся в структурных особенностях и химическом составе, однако для оценки мощности, выделяющейся в виде теплоты, основное значение имеет значение влагосодержания этих материалов. В то же время, поскольку диэлектрические свойства растительных материалов существенно ниже свойств воды, для эффективности микроволновой обработки и обеспечения ее равномерности большое значение имеет объем, масса загрузки, расположение в камере и условия формирования обрабатываемого слоя. Экспериментальные исследования влияния микроволнового поля на растительный материал проводились на лабораторной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Микроволновая энергия поступала в рабочую камеру прямоугольного сечения через волновод от магнетрона с частотой генерации 2,45 ГГц и регулируемой мощностью 80-800 Вт. Конструкция микроволновой камеры позволяла одновременно с подводом МВ энергии осуществлять продувку воздуха над слоем.

Методика проведения исследований заключалась в следующем. В экспериментальную ячейку помещался исследуемый материал, включался магнетрон. Через определенные интервалы времени, шаг которых варьировался в зависимости от величины подводимой мощности в пределах от 30 с до 5 мин, весовым методом определялось количество испарившейся влаги и рассчитывалось влагосодержание. Измерения температуры производились с помощью медь-константановых термопар в комплекте с вольтметром универсальным В7-21, которые помещались в слой зерна

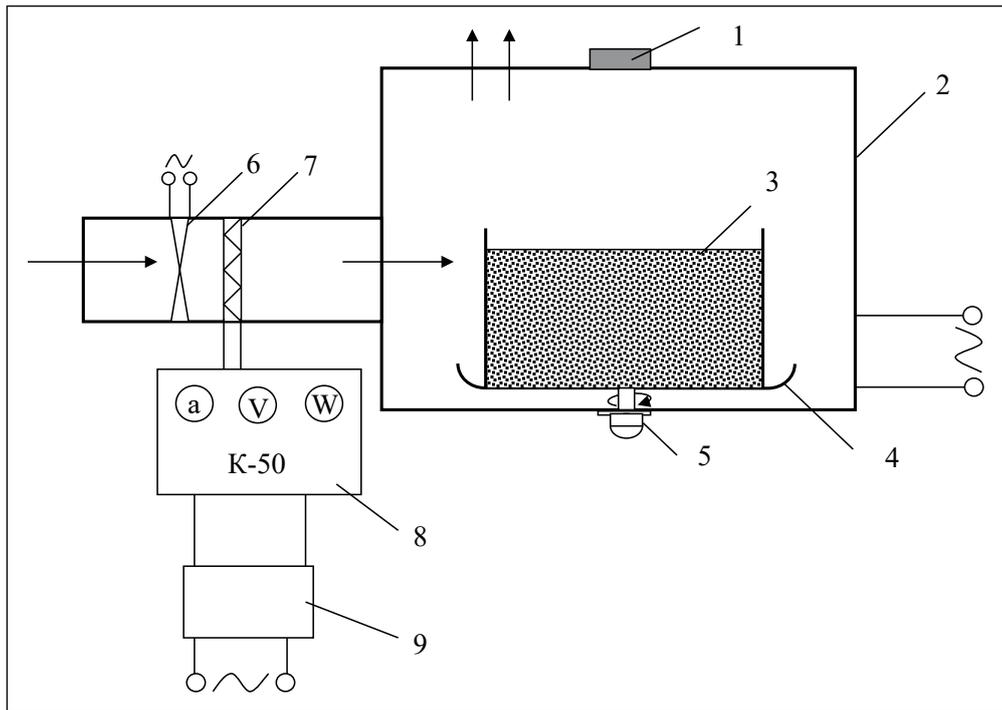


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса нагрева и сушки в микроволновом поле: 1 – волновод; 2 – рабочая камера; 3 – экспериментальная ячейка; 4 – подставка; 5 – механизм привода; 6 – вентилятор; 7 – нагреватель; 8 – измерительный комплект; 9 – регулятор напряжения

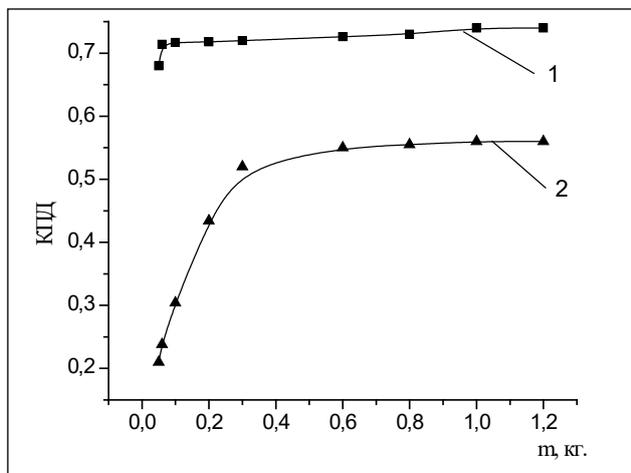


Рис. 2. Зависимость КПД МВ камеры (2) и коэффициента использования тепловой энергии (1) от массы зерна (гречиха)

непосредственно сразу после выключения магнетрона. Измерения повторялись с четырех- и пятикратным повторением. Погрешность определения среднеинтегрального влагосодержания составила $\pm 1,4\%$, средней температуры слоя $\pm 1,2$.

Результаты расчетов коэффициентов использования тепловой энергии, а также КПД МВ камеры в зависимости от массы материала (зерно гречихи) при подводимой мощности $P_{\text{вых}}=160$ Вт представлены на рис. 2. Коэффициент использо-

вания тепловой энергии η_t определяется следующим соотношением:

$$\eta_m = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\Sigma}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{пол}} + Q_{\text{ном}}} \quad (3)$$

Как видно из рис. 2, линия 1, коэффициент использования тепловой энергии практически не зависит от массы для области значений 0,06-1,2 кг. КПД МВ камеры с ростом массы возрастает, достигая постоянного значения 0,56 при массе 1,2 кг. Верхняя кривая показывает, что микроволновая энергия, поступающая от генератора, используется недостаточно полно.

При изменении массы образца от 0,05 кг до 1,2 кг и изменении относительного объема $V_{\text{обр}}/V_k$ от 0,003 до 0,07 и при толщине слоя $16 < \delta < 66$ мм КПД камеры описывается с погрешностью $\pm 1,5\%$ соотношением (4) [12]:

$$\eta_k = 0,56 \left(1 - \frac{4,63}{5,87 + e^{182V_{\text{обр}}/V_k}} \right), \quad (4)$$

Данные, приведенные на рис. 2, получены при сушке зерна гречихи в условиях, при которых слой был сформирован нерационально: его толщина не превышала 0,01 м. Видно, что КПД камеры не превышал 55%. Для зерновых с влагосодержанием 20% наивысшие значения КПД достигаются при сопоставимости характерного размера поверхности (диаметр для круглой формы) и толщины слоя (табл. 1).

Таблица 1

КПД микроволновой камеры η_k при различных соотношениях диаметра экспериментальной ячейки и толщины слоя (гречиха нешелушенная).

Выходная мощность магнетрона P=160 Вт

№	m, кг	V_m / V_k	d, м	δ , м	Q_{Σ} , Вт	η_k
1	0,05	0,0012	0,055	0,008	41,5	0,26
2	0,05	0,0012	0,040	0,016	49,6	0,31
3	0,05	0,0012	0,028	0,032	56	0,35
4	0,1	0,0024	0,055	0,016	60,8	0,38
5	0,1	0,0024	0,040	0,032	65,6	0,41
6	0,1	0,0024	0,01	0,048	40	0,25
7	0,2	0,0048	0,105	0,009	51,2	0,32
8	0,2	0,0048	0,055	0,032	91,2	0,57
9	0,2	0,0048	0,045	0,048	92,8	0,58
9	0,31	0,0076	0,13	0,009	59,2	0,37
10	0,31	0,0076	0,096	0,016	96	0,60
11	0,31	0,0076	0,055	0,048	100,8	0,63
12	1,2	0,029	0,11	0,048	107,2	0,67
13	1,2	0,029	0,098	0,056	108,8	0,68

Для ряда зерновых материалов (овес, пшеница, ячмень, гречиха) получена эмпирическая зависимость, которая учитывает полноту загрузки камеры за счет введения симплекса V_m / V_k , где V_m – объем, занимаемый материалом, V_k – объем камеры:

$$\eta_k = 0,67 \left(1 - \frac{0,45}{1 + e^{\left(\frac{V_m/V_k - 0,003}{0,0017} \right)}} \right) \left(\frac{u}{u_0} \right)^{1,3}, \quad (5)$$

Зависимость (5) учитывает влияние влагосодержания: u – текущее влагосодержание, $u_0 = 0,2$. Погрешность зависимости (5) составляет $\pm 17\%$ для диапазона изменения относительного объема V_m / V_k от 0,0015 до 0,03.

Сопоставление зависимостей (4) и (5) показывает, что рациональная организация слоя может увеличить КПД на 15 % для зерновых материалов.

При проведении исследований на зерновых материалах толщины слоя не превышали удвоенной глубины проникновения. Для оценки глубины проникновения СВ поля в слой применялись известные теоретические зависимости [11]. Коэффициент ослабления α определяется зависимостью [11]:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{1}{2} \cdot \varepsilon' \left[\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1 \right]^{1/2} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где λ_0 – длина электромагнитной волны в вакууме.

Для СВ поля с частотой 2450 МГц $\lambda_0 = 12,24$ см.

К примеру, для зерна гречихи, диэлектрические характеристики которого при температуре 20°C и влагосодержанию 0,16 кг/кг соответствовали зна-

чениям: $\varepsilon' = 9,04$, $\text{tg} \delta = 0,26$, коэффициент ослабления:

$$\alpha = \frac{2\pi}{12,24 \cdot 10^{-2}} \left[\frac{1}{2} \cdot 9,04 \left[\sqrt{1 + 0,26^2} - 1 \right]^{1/2} \right] = 19,88 \text{ м}$$

Зная коэффициент ослабления, можно определить глубину проникновения Δ расчетным путем [13]:

$$\Delta = \frac{1}{\alpha} \Rightarrow \Delta = \frac{1}{19,88} = 0,05 \text{ м}, \quad (7)$$

Оценка значений напряженности электрического поля E даже при существенной идеализации процесса взаимодействия твердых тел с проникающими электромагнитными полями не приводят к удовлетворительным результатам. Для определения зависимости E от формы образца, его массы и диэлектрических характеристик, можно применять формулу (1) и данные экспериментов, в ходе которых контролировалось изменение температуры Δt материала массой m и теплоемкостью c , изменение массы тела за счет испарения Δm (если этот процесс имел место). С использованием уравнения теплового баланса (без учета потерь в окружающую среду) значение напряженности электрического поля выражается следующей зависимостью:

$$E = \sqrt{\frac{q_{\text{пол}}}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta}} = \sqrt{\frac{cm\Delta t + \Delta m r}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta \cdot V \cdot \tau}}, \text{ В/м}, \quad (8)$$

где удельный тепловой поток $q_{\text{пол}}$, затрачиваемый на нагрев исследуемого образца объемом V и испарение влаги за время τ , определяется зависимостью:

$$q_{\text{пол}} = (c \cdot m \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r) / (V \cdot \tau), \text{ Вт/м}^3, \quad (9)$$

Зависимость (8) можно уточнить, учтя потери в окружающую среду, которые определяются лучистой $Q_{\text{луч}}$ и конвективной $Q_{\text{конв}}$ составляющей. Кроме того, точность расчета зависит также от точности определения величин диэлектрических постоянных и от равномерности распределения электромагнитного поля в материале. Результаты показывают, что уменьшение объема загрузки способствует увеличению напряженности электрического поля, но при этом КПД камеры снижается. В пределах загрузки с одной массой большое значение имеет соотношение площади открытой поверхности к толщине слоя.

Зависимость (8) позволяла определять E по результатам экспериментальных исследований, полученные значения дают возможность определить условия для повышения уровня преобразования СВ энергии во внутреннюю энергию материала. Для оценки величины E по уровню выходной мощности магнетрона и характеристик закладываемого в камеру материала авторы рекомендуют следующую зависимость:

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{P_{\text{вих}} \cdot \eta_k}{(5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta) \cdot V}}, \quad (10)$$

Значение η_k предлагается находить по соответствующим эмпирическим зависимостям. Тогда для оценки теплоты, преобразованной в материале при помещении его в микроволновое поле, можно применить следующую зависимость:

$$q = \frac{P_{\text{вих}} \cdot \eta_k}{V}, \text{ Вт/м}^3, \quad (11)$$

где V – объем, занимаемый материалом.

Зависимости (10, 11) предлагаются к практическому использованию при оценке эффективности использования микроволновой энергии.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Таким образом, тепловой КПД микроволновой камеры, являющийся характеристикой энергетической эффективности преобразования

микроволновой энергии в тепловую, зависит от вида материала, его влагосодержания, массы загрузки, а также толщины слоя и площади поверхности. КПД камеры принимает наивысшие значения для зерна с влагосодержанием 0,2 при массе загрузки выше 0,3 кг, при условии, что толщина слоя не превышает удвоенной глубины проникновения 2Δ . Рациональная организация слоя, определяемая соотношением площади открытой поверхности материала к его толщине, способна увеличить КПД для зерновых материалов на 15%. Для оценки теплоты, преобразованной различными диэлектрическими (растительными) материалами при помещении в микроволновую камеру, необходимо проведение дополнительных исследований с целью получения зависимости КПД конкретной рабочей камеры от геометрических и физических характеристик обрабатываемого материала.

Список литературы:

1. Feng H., Yin Y., Tang J. Microwave Drying of Food and Agricultural Materials : Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Engineering Reviews*. 2012. Vol. 4, No. 2. P. 89–106.
2. Gursoy S., Choudhary R., Watson D.G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2013. Vol. 6, No. 1. P. 90–99.
3. Alibas, I. Determination of drying parameters, ascorbic acid contents and colour characteristics of nettle leaves during microwave-, air- and combined microwave-air-drying. *Journal of Food Process Engineering*. 2009. № 33. P. 210–233.
4. Бошкова І.Л., Волгушева Н.В., Коломійчук С.Г., Дементьева Т.Ю. Доцільність мікрохвильового екстрагування біологічно активних речовин як природних пестицидів з рослинної сировини. *Донецьк : ДонНУЕТ : Обладнання та технології харч. виробництва*. 2010. № 24. С. 146–153.
5. Георгиев Е.В., Хлиева О.Я., Кузнецов И.О. Перспективы использования экстрактов аира обыкновенного и тысячелистника обыкновенного в качестве инсектицидов. *Актуальні проблеми енергетики і екології. Наук. пр. ОНАХТ*. 2006. Вип. 45, Т. 1. С. 105–110.
6. Калинин Л.Г., Бошкова И.Л. Эффекты воздействия микроволнового электромагнитного поля на семена сельскохозяйственных культур. *Наук. пр. ОНАХТ*. 2002. № 24. С. 17–20.
7. Калінін Л.Г., Тучний В.П., Левченко Є.А., Кіндрок М.О., Вішневський В.В. Визначення впливу мікрохвильового поля на посівні і урожайні якості насіння злакових, олійних і овочевих культур. *Одеса : Микроволновые технологии в народном хозяйстве*. 2000. № 2-3. С. 66–73.
8. Калинин Л.Г., Бошкова И.Л., Панченко Г.И., Коломійчук С.Г. Разработка микроволновой технологии подготовки субстрата для дереворазрушающих грибов. *Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры, науч.-техн.* 2007. № 1. С. 100–104.
9. Woo S.L., Di Benedetto P., Senatore M., Abadi K., Gigante S., Soriente I., Ferraioli S., Scala F., Lorito M. Identification and characterization of *Trichoderma* species aggressive to *Pleurotus* in Italy. *J. of Agriculture and Life Sciences*. 2004. Vol. 30. P. 469–470.
10. Козлов П.В., Лелевкин В.М. Микроволновой нагрев и стационарные тепловые состояния керамической пластины. *Теплофизика и теор. теплотехника. Вестн. КРСУ*. 2006. Т.6, № 5. С. 20–29.
11. Editors H., Yang J. *Advances in Agricultural Science and Technology*. London : World Scientific, 2002. 172 p.
12. Волгушева Н.В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты : дис... канд. техн. наук: 05.14.06, Одесская гос. академия холода. Одеса, 2005. 225 с.
13. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В., Дементьева Т.Ю. К оценке эффективности сушки зерновых культур в неподвижном слое при различных режимах подвода энергии. *Наук. пр. ОНАХТ*. 2011. Вип. 39. Т. 2. С. 211–215.

Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Kolesnichenko N.F., Boshkov L.Z., Paskal A.A.

ENERGY EFFICIENCY OF HEATING DIELECTRIC MATERIALS IN A MICROWAVE FIELD

The issues of estimating the energy efficiency of the energy conversion of the microwave field into the internal energy of the processed plant material are considered. The importance of reducing energy costs while maintaining product quality is noted. It is emphasized that the universal criterion for evaluating the effectiveness of thermal processes is the efficiency coefficient of efficiency. Determination of this coefficient efficiency is the starting point in research conducted to optimize heat transfer. The total energy efficiency of microwave energy conversion is analyzed, which includes the efficiency of the magnetron and the efficiency of the working chamber. The results of experiments and thermal calculations of the microwave chamber efficiency for a number of grain materials are presented. It is obtained that the rational organization of the layer of material can significantly increase the efficiency of the camera. It was shown that for the sample with one mass, the ratio of the open surface area to the layer thickness is of great importance. It is noted that it is difficult to evaluate analytically the electric field strength in a microwave chamber with the material being processed. The dependence is given, allowing determining the magnitude of the electric field intensity by the results of experimental studies. The performed thermal calculations make it possible to determine the conditions for increasing the level of microwave energy conversion into the internal energy of the material. Dependence is proposed for estimating the magnitude of the electric field intensity from the level of the output power of the magnetron and the characteristics of the material put into the chamber. It is shown that the specific power released as heat per unit volume of material can be calculated taking into account the efficiency of the microwave chamber. To determine the efficiency of the microwave chamber, it is advisable to establish the dependence of this quantity on the type of material being processed and the volume occupied by it.

Key words: thermal effect, efficiency, microwave chamber, grain, layer, electric field strength.