

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗЕРНОВОГО СЛОЯ ПРИ СВЧ-КОНВЕКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**Д. А. БУДНИКОВ, кандидат технических наук
ФГБНУ ВИЭСХ (г. Москва)**

Осуществление энергосберегающего процесса послеуборочной обработки зерна связано с построением систем автоматического управления, для эффективного действия которых необходимо наличие знаний о поведении обрабатываемого материала под действием используемых факторов. Отсутствие этих данных ведет к перерасходу энергоресурсов, а также снижению качества конечной продукции. При этом сушка зачастую является одним из наиболее энергоемких процессов при производстве зерновых. Это исследование направлено на получение динамических свойств зерновой массы при сушке под действием электромагнитных волн.

СВЧ-конвективная сушка, послеуборочная обработка, динамические свойства, идентификация

Для построения оптимальных конструкций энергосберегающих установок по сушке продуктов сельскохозяйственного производства необходимо иметь представление о динамических свойствах обрабатываемого объекта. Отсутствие этих данных ведет к перерасходу энергоресурсов, а также снижению качества конечной продукции. Таким образом, сведения о том, что сушка является одним из наиболее энергоемких процессов при производстве зерновых что и определяет актуальность данного исследования.

Исследования в отношении динамических свойств зерновых материалов при проведении процесса сушки проводятся для установок конкретного типа. Так в настоящее время существуют данные, полученные для шахтных зерносушилок, установок активного вентилирования и прочих [1-5]. Исследователями получены динамические характеристики, а также регрессионные модели для большого количества культур. Учеными Калифорнийского университета и Западного регионального исследовательского центра (США) приведены зависимости для описания процесса сушки риса различного сорта в тонком слое [4]. Проводимые исследования [2-5], позволяют судить о том, что для разработки управляющих систем сушильного оборудования необходимо детальное изучение поведения различных культур при воздействии всего многообразия

существующих факторов, воздействующих на зерновой материал в процессе сушки. Большой интерес вызывает использование СВЧ-конвективного воздействия, хотя данные по поведению зернового слоя при таком виде обработке еще не полны. Это связано с тем, что установки данного типа пока не получили широкого применения в связи с невысокой производительностью, повышенными требованиями к квалификации обслуживающего персонала и т.д.

Цель исследований – получение динамических свойств зернового слоя при СВЧ-конвективном воздействии, а целью статьи – продемонстрировать результаты, полученные в процессе СВЧ-конвективной сушки. При этом зерновой слой выступает в качестве объекта управления, а выраженная в той или иной форме информация о наиболее существенных характеристиках объекта является моделью.

Зерновой слой, как объект управления является динамическим объектом, т.е. объектом, выход которого зависит не только от текущего значения входных сигналов, но и от их значений в предыдущие моменты времени.

Материалы и методика исследований. Анализ динамических характеристик проводился для плотного неподвижного зернового слоя, подвергнутого СВЧ-конвективному воздействию. Схема лабораторной установки приведена на рис. 1. Параметры установки следующие: размеры зоны СВЧ-конвективного воздействия, заполненной зерном $200 \times 200 \times 300$ мм, мощность магнетрона $P_c = 900$ Вт, скорость фильтрации воздуха через зерновой слой $V = 0,6$ м/с. Условия проведения экспериментов: температура наружного воздуха (агента сушки) $T = 18^\circ\text{C}$, обрабатываемая культура – пшеница, влажность зернового материала $W = 12 \div 20$ % с шагом 2 %; вентиляция проводилась непрерывно, воздействие СВЧ полем проводилось в импульсном режиме (5 с СВЧ включено, 10 с выключено). Удельная мощность электромагнитного поля, рассеиваемая в конкретной точке, определяется в зависимости от исходной влажности обрабатываемого материала. В качестве функции отклика выбрана температура зернового материала.

Для определения удельной мощности в конкретной точке было разработано «Устройство для определения величины удельной мощности электромагнитного поля СВЧ выделяемой в зерновом слое» (рис. 2).

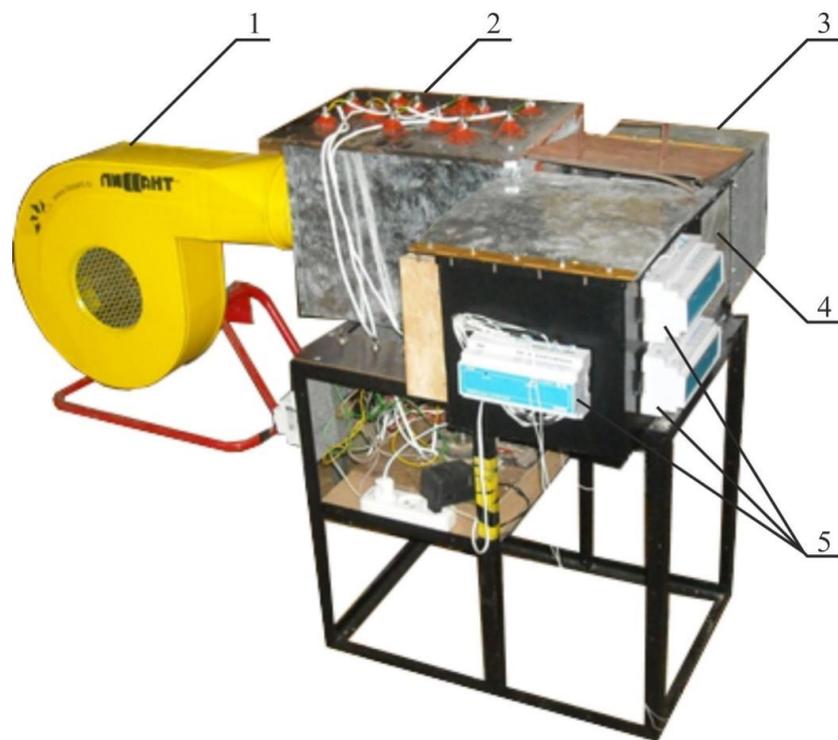


Рис. 1. Лабораторная установка: 1 – нагнетающий вентилятор; 2 – блок ТЭНов; 3 – магнетрон; 4 – зона СВЧ-конвективного воздействия; 5 – модули сбора сигналов

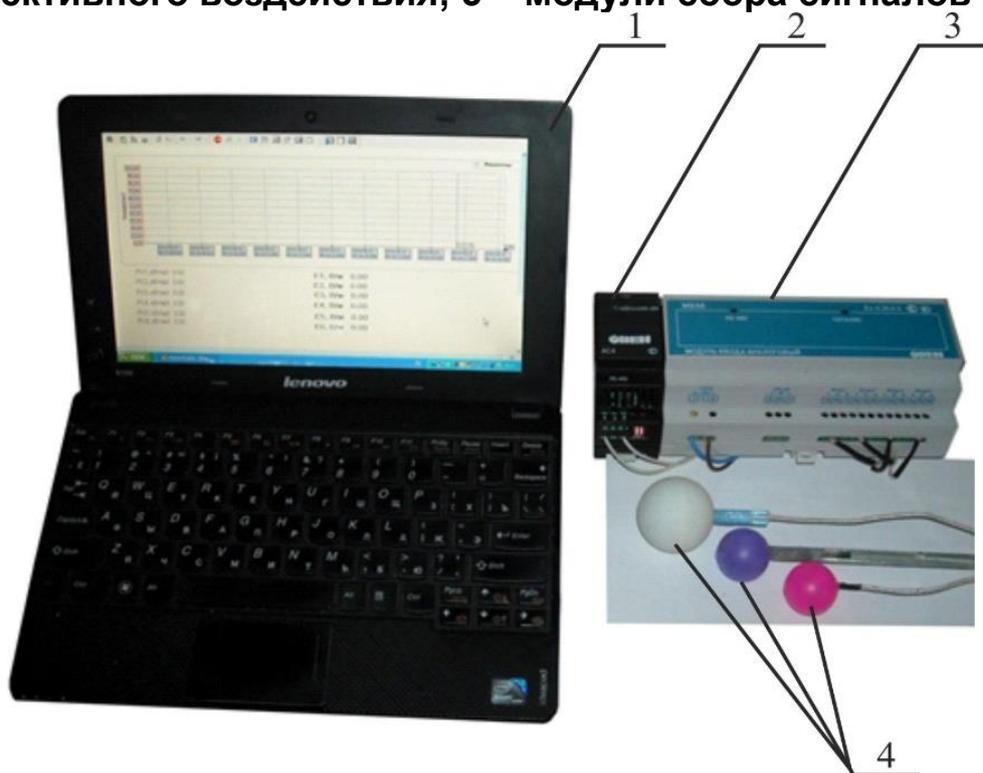


Рис. 2. Устройство для определения величины удельной мощности электромагнитного поля СВЧ выделяемой в зерновом слое:

1 – ПК, в котором реализуется алгоритм измерения; 2 - преобразователь интерфейсов; 3 - модуль ввода сигналов (до 8 датчиков); 4 – датчики

На рис. 3 представлена схема расположения датчиков температуры при проведении эксперимента. Расстояния между соседними датчиками равнялись $L=50$ мм, расстояние по горизонтали до экрана ввода СВЧ поля было принято 70 мм, $A=70$ мм, $B=45$ мм. Теоретические предпосылки данной схемы приведены в [6-7].

Обработка результатов экспериментов проводилась в пакете Matlab с применением System Identification Toolbox. Экспериментальные данные записывались в csv – файл, формат которого поддерживается Matlab для импорта данных. Далее провели предварительную обработку сигналов исследуемого объекта, исключив из них постоянную составляющую и задав интересующий диапазон данных. Для анализа были построены параметрические модели (parametric model) в виде ARX-модели (AutoRegressive with eXternal input) различного уровня по методикам, приведенным в [8-11].

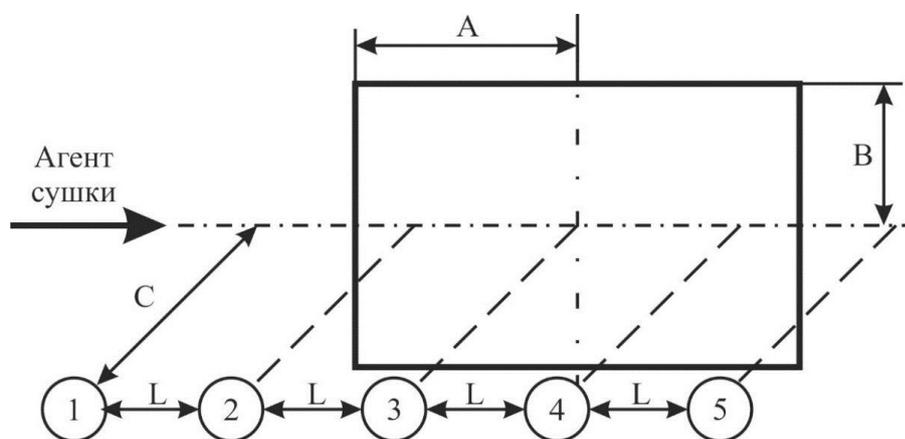


Рис. 3. Схема расположения датчиков

Результаты исследований. Пример результатов измерения представлен на рис. 4.

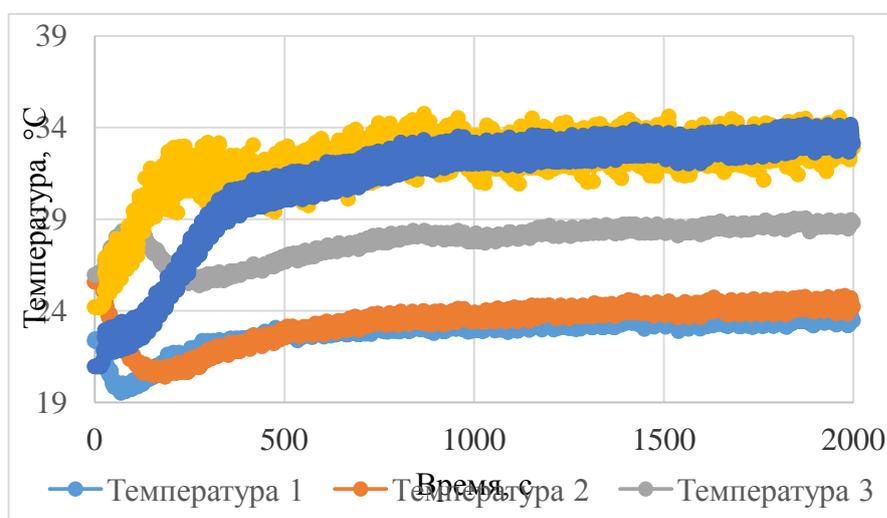


Рис. 4. Результаты эксперимента при $W=18\%$

ARX-модель представляется в виде:

$$A(z)y(t)=B(z)u(t)+e(t), \quad (1)$$

или в развернутом виде:

$$y(t)+a_1y(t-1)+\dots+a_ny(t-n)=b_1u(t)+b_2u(t-1)+\dots+b_nbu(t-m)+e(t), \quad (2)$$

Кроме полиномиального анализа были получены передаточные функции. Общий вид передаточной функции в виде Process Models имеет вид:

$$G(s) = \frac{Kp}{1+Tp1 \cdot s} \cdot e^{-Td \cdot s}. \quad (3)$$

Пример коэффициентов для него представлен в таблице 1.

На конечном этапе провели оценку порядка параметрической модели, сравнение моделей и оценку их адекватности. Модели, описывающие динамические свойства слоя пшеницы при СВЧ-конвективном воздействии, полученные в результате анализа экспериментальных данных частично приведены в таблице 2.

1. Коэффициенты Process Models для зернового слоя

W, %	№ датчика	Kp	Tr1	Td
16	1	0,54795	935,59	23,935
16	2	0,68909	527,15	11,765
16	3	0,048423	189,0945	12,523
16	4	0,12185	121,3217	0
16	5	0,945976	217,8842	27,169

Пример передаточных функций, полученных для зернового слоя, приведен в таблице 3.

2. Результаты полиномиального анализа в System Identification Toolbox

W, %		Тип модели		
№ датчик а	арх441	арх332	арх223	
12	1	$A(z)=1-1,287z^{-1}+0,429z^{-2}-0,2159z^{-3}+0,09211z^{-4}$ $B(z)=0,0006701z^{-1}-0,0003012z^{-2}-0,0002491z^{-3}-0,0005811z^{-4}$	$A(z)=1-1,342z^{-1}+0,430z^{-2}-0,07237z^{-3}$ $B(z)=0,0001748z^{-2}-0,0002074z^{-3}-0,0006489z^{-4}$	$A(z)=1-1,336z^{-1}+0,3525z^{-2}$ $B(z)=-0,0001427z^{-3}-0,0006153z^{-4}$
12	2	$A(z)=1-1,346z^{-1}+0,5244z^{-2}-0,2514z^{-3}+0,09399z^{-4}$ $B(z)=0,00003436z^{-1}-0,00003296z^{-2}-0,00002616z^{-3}-0,00007604z^{-4}$	$A(z)=1-1,373z^{-1}+0,498z^{-2}-0,1049z^{-3}$ $B(z)=-0,00005863z^{-2}-0,001846z^{-3}-0,00008234z^{-4}$	$A(z)=1-1,322z^{-1}+0,3444z^{-2}$ $B(z)=-0,0003183z^{-3}-0,00007325z^{-4}$
12	3	$A(z)=1-1,344z^{-1}+0,555z^{-2}-0,2907z^{-3}+0,09358z^{-4}$ $B(z)=0,00004234z^{-1}+0,000007242z^{-2}-0,00001376z^{-3}-0,00003747z^{-4}$	$A(z)=1-1,436z^{-1}+0,5824z^{-2}-0,1334z^{-3}$ $B(z)=0,00002683z^{-2}-0,00001128z^{-3}-0,00003976z^{-4}$	$A(z)=1-1,447z^{-1}+0,4596z^{-2}$ $B(z)=-0,00000177z^{-3}-0,00003852z^{-4}$
12	4	$A(z)=1-0,92z^{-1}+0,08925z^{-2}-0,02725z^{-3}+0,1844z^{-4}$ $B(z)=0,00004234z^{-1}+0,000007242z^{-2}-0,00001376z^{-3}-0,00003747z^{-4}$	$A(z)=1-1,279z^{-1}+0,7614z^{-2}-0,4598z^{-3}$ $B(z)=0,0005334z^{-2}-0,0002439z^{-3}-0,0003656z^{-4}$	$A(z)=1-1,507z^{-1}+0,5321z^{-2}$ $B(z)=-0,0001467z^{-3}-0,0003056z^{-4}$
12	5	$A(z)=1-1,4z^{-1}+0,5588z^{-2}-0,2327z^{-3}+0,07647z^{-4}$ $B(z)=-0,0001911z^{-1}-0,00009827z^{-2}-0,00001106z^{-3}-0,0001852z^{-4}$	$A(z)=1-1,39z^{-1}+0,5242z^{-2}-0,1315z^{-3}$ $B(z)=-0,0002345z^{-2}-0,0000083z^{-3}-0,0001699z^{-4}$	$A(z)=1-1,35z^{-1}+0,3521z^{-2}$ $B(z)=-0,0002023z^{-3}-0,00008896z^{-4}$
14	1	$A(z)=1-1,546z^{-1}+0,9718z^{-2}-0,6814z^{-3}+0,3435z^{-4}$ $B(z)=-0,0004318z^{-1}-0,0001135z^{-2}-0,001354z^{-3}-0,0001852z^{-4}$	$A(z)=1-1,507z^{-1}+0,7711z^{-2}-0,1947z^{-3}$ $B(z)=0,0003982z^{-2}-0,001739z^{-3}+0,0003682z^{-4}$	$A(z)=1-1,404z^{-1}+0,4886z^{-2}$ $B(z)=-0,001329z^{-3}+0,0003492z^{-4}$
14	2	$A(z)=1-1,578z^{-1}+0,9435z^{-2}-0,5145z^{-3}+0,2326z^{-4}$ $B(z)=-0,00005526z^{-1}-0,0001168z^{-2}-0,00004932z^{-3}+0,00005697z^{-4}$	$A(z)=1-1,543z^{-1}+0,7708z^{-2}-0,1599z^{-3}$ $B(z)=-0,00007289z^{-2}-0,0001106z^{-3}+0,00005382z^{-4}$	$A(z)=1-1,476z^{-1}+0,5656z^{-2}$ $B(z)=-0,0001585z^{-3}+0,000008151z^{-4}$
14	3	$A(z)=1-1,58z^{-1}+0,907z^{-2}-0,4388z^{-3}+0,1849z^{-4}$ $B(z)=0,0002176z^{-1}-0,0002239z^{-2}-0,0000742z^{-3}-0,000001471z^{-4}$	$A(z)=1-1,45z^{-1}+0,4891z^{-2}+0,01823z^{-3}$ $B(z)=-0,00005608z^{-2}-0,00009498z^{-3}+0,000005342z^{-4}$	$A(z)=1-1,451z^{-1}+0,5081z^{-2}$ $B(z)=-0,0000952z^{-3}+0,00000253z^{-4}$
14	4	$A(z)=1-1,625z^{-1}+1,051z^{-2}-0,5935z^{-3}+0,1857z^{-4}$ $B(z)=0,000008551z^{-1}-0,00008586z^{-2}+0,00008378z^{-3}-0,00008606z^{-4}$	$A(z)=1-1,571z^{-1}+0,8917z^{-2}-0,3065z^{-3}$ $B(z)=-0,00006331z^{-2}+0,00005635z^{-3}-0,00007751z^{-4}$	$A(z)=1-1,441z^{-1}+0,4636z^{-2}$ $B(z)=-0,000003455z^{-3}-0,00005538z^{-4}$
14	5	$A(z)=1-1,69z^{-1}+1,148z^{-2}-0,661z^{-3}+0,2059z^{-4}$ $B(z)=-0,0005479z^{-1}-0,0006393z^{-2}-0,0002432z^{-3}-0,0004197z^{-4}$	$A(z)=1-1,64z^{-1}+0,9801z^{-2}-0,3386z^{-3}$ $B(z)=-0,0008764z^{-2}-0,0003862z^{-3}-0,0004756z^{-4}$	$A(z)=1-1,499z^{-1}+0,5046z^{-2}$ $B(z)=-0,001124z^{-3}+0,000003138z^{-4}$

3. Передаточные функции для зернового слоя

W, %	№ датчика	Передаточная функция
18	1	$\frac{0,0007082s + 0,00002612}{s^3 + 0,1965s^2 + 0,01082s + 0,00003605}$
18	2	$\frac{0,0003572s + 0,00000001305}{s^3 + 0,09751s^2 + 0,003184s + 1,281 \cdot 10^{-16}}$
18	3	$\frac{0,0002381s + 0,000004202}{s^3 + 0,1103s^2 + 0,003803s + 0,00004475}$
18	4	$\frac{0,00195s + 0,0000001137}{s^2 + 0,01233s + 6,368 \cdot 10^{-8}}$
18	5	$\frac{0,003081s + 0,0001449}{s^3 + 1,155s^2 + 0,05545s + 0,0001584}$
20	1	$\frac{0,001013s + 0,00001706}{s^3 + 0,5045s^2 + 0,0134s + 0,00002328}$
20	2	$\frac{0,1657s + 0,0003007}{s^3 + 363,9s^2 + 1,901s + 0,00225}$
20	3	$\frac{0,000119s + 0,00000001928}{s^3 + 0,03695s^2 + 0,0014s + 6,386 \cdot 10^{-10}}$
20	4	$\frac{0,0002665s + 0,000007215}{s^3 + 2,489s^2 + 0,03218s + 0,00004237}$
20	5	$\frac{0,0008347s + 0,00003231}{s^3 + 0,3773s^2 + 0,01553s + 0,00003815}$

Выводы

1. Динамические свойства зернового материала изменяются в зависимости от продвижения по толщине в направлении вентиляции при равных значениях удельной мощности электромагнитного поля.

2. Проведение идентификации зернового слоя, как объекта управления, позволяет получить широкий спектр характеристик: переходных, полиномиальных, частотных и т.д.

3. При проведении идентификации объекта необходимо отслеживать качественную оценку, определяющую наиболее простую зависимость, с достаточной точностью описывающую изучаемый процесс.

4. В большинстве случаев для качественного описания (погрешность менее 5%) поведения зернового слоя при описании переходной функции с помощью ARX-модели, требуется уравнение третьей степени.

Список литературы

1. Андрианов Н. М. Идентификация динамических характеристик зерновых сушилок / Н. М. Андрианов // Успехи современного естествознания. – 2003. – № 8 – С. 14-17.

2. Olmos A. Dynamic optimal control of batch rice drying process / A. Olmos, I. Trelea // Drying Technology. – 2002. – 20(7). – P. 1319-1345.
3. Moravej M. K. Investigation of Some Effective Parameters on the Fluidized Bed Grain Dryers / M. K. Moravej // Iranica Journal of Energy & Environment. – 2013 – 4. (4): P. – 391-397.
4. Prakash B. Modeling Moisture Movement in Rice, Advanced Topics in Mass Transfer, / B.Prakash, Z. Pan // Prof. Mohamed El-Amin (Ed.).
5. Bhadra R. Characteristics of Distillers Wet Grains Under Varying Condensed Distillers Solubles and Drying Temperature / R. Bhadra, K. Rosentrater, K. Muthukumarappan, S. Kannadhasan // American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2011. Vol. 27(5). – P. 777-786.
6. Будников Д. А. Поглощение электромагнитного поля СВЧ сельскохозяйственными материалами // Д. А. Будников // Вестник ВИЭСХ. -2013. – №2 (11). – С. 38-40.
7. Будников Д. А. Исследование динамических свойств зернового слоя при СВЧ-конвективном воздействии / Д. А. Будников // Теоретический и научно-практический журнал ФГБНУ ВИЭСХ” Инновации в сельском хозяйстве” – М.: ФГБНУ ВИЭСХ, 2014. – №4(9). – С. 94-98.
8. Льюинг Л. Идентификация систем [Теория для пользователя] / Л. Льюинг – М.: Наука, 1991.
9. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов / А. М Дейч // – М.: Энергия, 1979. – 240 с.
10. Кашьяп Р. Л. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным / Р. Л. Кашьяп, А. Р. Рао – М.: Наука, 1983. – 384 с.
11. Дьяконов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. [Специальный справочник] // В. Дьяконов – Питер. – 2001. – 448 с.

Здійснення енергозберігаючого процесу післязбиральної обробки зерна пов'язане з побудовою систем автоматичного керування, для ефективної дії яких необхідна наявність знань про поведінку оброблюваного матеріалу під дією використовуваних факторів. Відсутність цих даних веде до перевитрати енергоресурсів, а також зниження якості кінцевої продукції. Однак сушіння часто є одним з найбільш найенергоємніших процесів за виробництва зернових. Це дослідження спрямоване на отримання динамічних властивостей зернової маси за сушіння під дією електромагнітних хвиль.

НВЧ-конвективна сушка, післязбиральна обробка, динамічні властивості, ідентифікація.

Implementation of energy saving process postharvest processing of grain due to the construction of automatic control systems for the effective operation of which requires knowledge of the behavior of the material being processed under the influence factors used. The absence of these data leads to a waste of energy, as well as the decline in the quality of the final product. In this case, drying is often one of the most processes in the production of cereals. This study aimed at obtaining the dynamic properties of the grain mass during drying by electromagnetic waves.

Microwave-convective drying, postharvest handling, dynamic properties, identification.