

визначення оптимальних режимів сушіння для різних видів сировини та розробка нових способів контролю технологічних параметрів процесу сушіння.

**Висновки.** Перспективний крок в еволюції сушильних установок пов'язаний із завданням організації часткового механічного зневоднення, що можливо при комбінації бародифузійних технологій і принципів фільтраційного сушіння. Результати комплексних досліджень розробленого експериментального зразка мікрохвильової сушильної установки підтвердили перспективність запропонованих технічних рішень для багатоцільової мікрохвильової обробки рослинної сировини. Природно, що запропоновані принципи вимагають ряду конструкторських рішень для забезпечення поточності, безпеки і продуктивності промислових установок.

#### Література

1. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.
2. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368 с.
3. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Энергетический аспект / Труды междунауч. тех. сем. Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов. – Воронеж: 2010.- с. 478-487.
4. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии// Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2011». – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 – 426.

УДК 66.047

## ЕЛЕКТРОІМПЕДАНСНА ТОМОГРАФІЯ ЯК МЕТОД НАТУРНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МАСОПЕРЕНОСУ РЕЧОВИНИ

Балабан С.М., к.т.н., доц.  
Яворський Б.І., д.т.н., проф.  
Промович Ю.Б.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль

*Доведено доцільність використання електроімпедансної томографії, як методу неруйнівного контролю за процесами масопереносу, зокрема сушіння, представлено структурну схему електроімпедансного томографа і результати дослідження процесів розподілу вологи і концентрації напружень під час сушіння зразків цегли-сирцю в лабораторних умовах.*

*Practicability of using the electro impedance tomography as the technique of non-destructive testing of mass transfer processes, drying in particular, is proved; the structural scheme of electro impedance tomography is proposed; the results of investigating the moisture destruction and the stress concentration while drying the brick row samples in the laboratory are analyzed.*

**Ключові слова:** електроімпедансна томографія, масоперенесення, сушіння, вологість, цегла-сирець.

**Постановка проблеми.** З поміж технологічних процесів хімічної, харчової та спорідненими з ними галузями промисловості, сушіння виділяється складністю, довготривалістю, енергоємністю і дороговизною. В окремих випадках, наприклад, під час конвективного сушіння з періодичною подачею теплоносія, необхідно контролювати не тільки загальну вологість, але й розподіл вологи в структурі матеріалу. Від такої інформації залежить тривалість періодів подачі сушильного агенту і відстоювання. Для вирішення поставлених завдань пропонується використовувати неруйнівні методи контролю за розподілом вологи.

Впровадження у виробництво перспективних і ефективних методів сушіння, зокрема конвективного сушіння з періодичною подачею сушильного агента, вимагає використання безперервних неруйнівних засобів контролю за вологістю виробів, що піддаються сушінню. Оскільки, якість і ефективність сушіння залежать від рівномірності висихання виробів, важливо при цьому правильно встановити тривалість циклів подачі сушильного агенту і відстоювання. Отже, запропонований спосіб контролю повинен

давати інформацію про розподіл вологи у структурі виробів, що піддаються сушінню. Перелічені завдання можна успішно вирішити використовуючи томографію [1].

Особливу увагу доцільно звернути на електроімпедансну томографію (ЕІТ) в основу якої покладено зміну електричних властивостей пропорційно вмісту вологи у матеріалі. ЕІТ є новим напрямком досліджень і, порівняно з іншими способами томографії, доволі простий у реалізації та використанні. Відомі роботи в яких приведені приклади використання ЕІТ для виявлення хвороб та ушкоджень стовбурів дерев, медичної діагностики, геологічної розвідки [2, 3].

Для дослідження розподілу вологи у структурі виробів, що піддаються сушінню, запропоновано біполярний електроімпедансний томограф, в якому подання зонduючого струму та вимірювання спадів напруги проводять одночасно однією парою електродів вимірювальної системи [4]. Це дозволяє адаптувати відомі кондуктометричні вологоміри для задачі пошуку розподілу вологи в товщі твердого матеріалу. ЕІТ можна використовувати для вимірювання вологості матеріалів, що характеризуються відносно сталою щільністю та однорідністю структури, наприклад цегли – сирцю, або деревини.

**Задачі статті.** Дослідження можливості використання ЕІТ для моніторингу розподілу вологості у матеріалі, що сушиться конвективним способом. Вивчення особливостей використання біполярної ЕІТ для контролю за розподілом вологості при конвективному сушінні цегли-сирцю.

**Основна частина.** Для проведення досліджень розподілу вологи під час конвективного сушіння цегли-сирцю виготовлено макет біполярного томографа, схема якого приведена на рис. 1. Особливістю конструкції такого томографа являється використання в якості вимірювального перетворювача кондуктометричного вологоміра DampFinder виробництва Laserliner, Німеччина. Томограф такої конструкції є, фактично, багатоканальним кондуктометричним вологоміром, оскільки в ньому подання зонduючого струму та вимірювання спадів напруги проводяться одночасно однією парою електродів вимірювальної системи.

Для досліджень використовували зразки циліндричної форми діаметром  $D = 60$  мм і довжиною  $l = 120$  мм. Експерименти проводили на п'яти однаково підготовлених зразках і за результати дослідів приймали їх середнє значення. При цьому використовували 8-ми електродний макет біполярного томографа, електроди вимірювальної системи розташовували на бокових поверхнях циліндричних зразків (Рис.2).

Експерименти проводили у сушильній установці, яка дозволяє реалізувати схему конвективного сушіння з рециркуляційною подачею сушильного агента. Для нагрівання сушильного агента до заданої температури і підтримування параметрів на необхідному рівні сушильна установка обладнана регулятором температури та нагрівальними елементами потужністю 220 Вт і 75Вт.

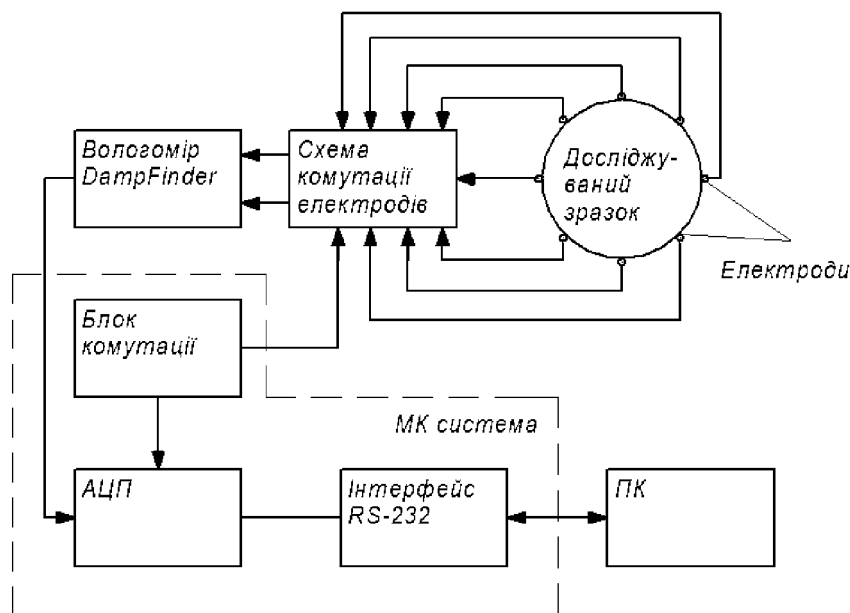
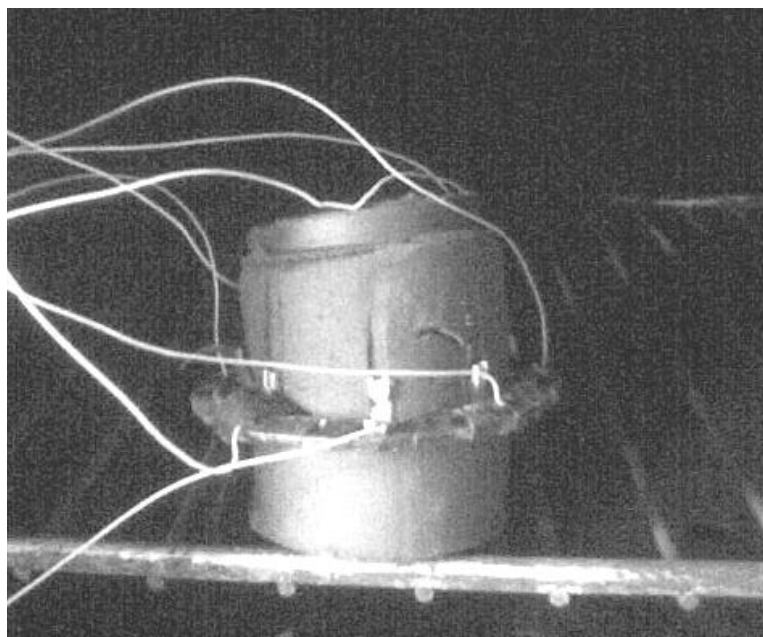
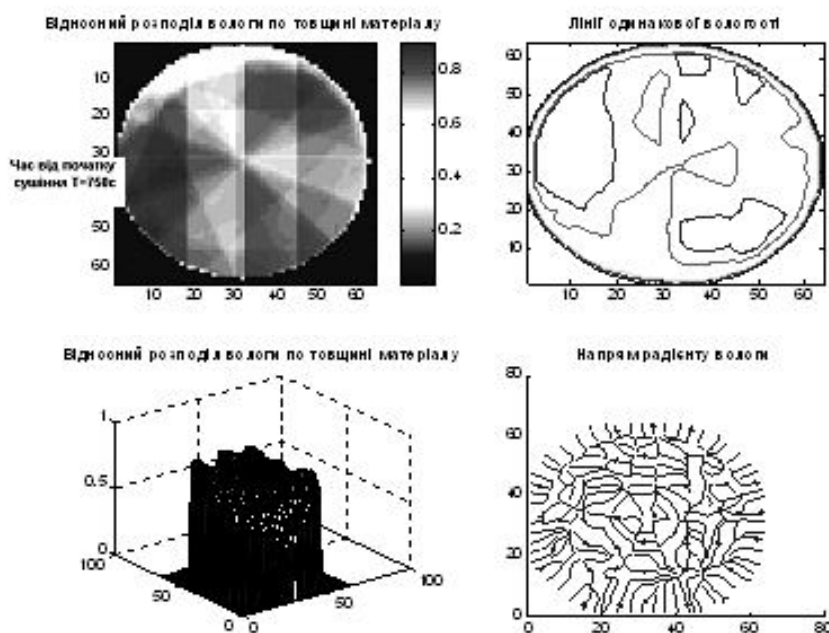


Рис. 1 – Схема структурна макету томографічної системи на основі вологоміра DampFinder

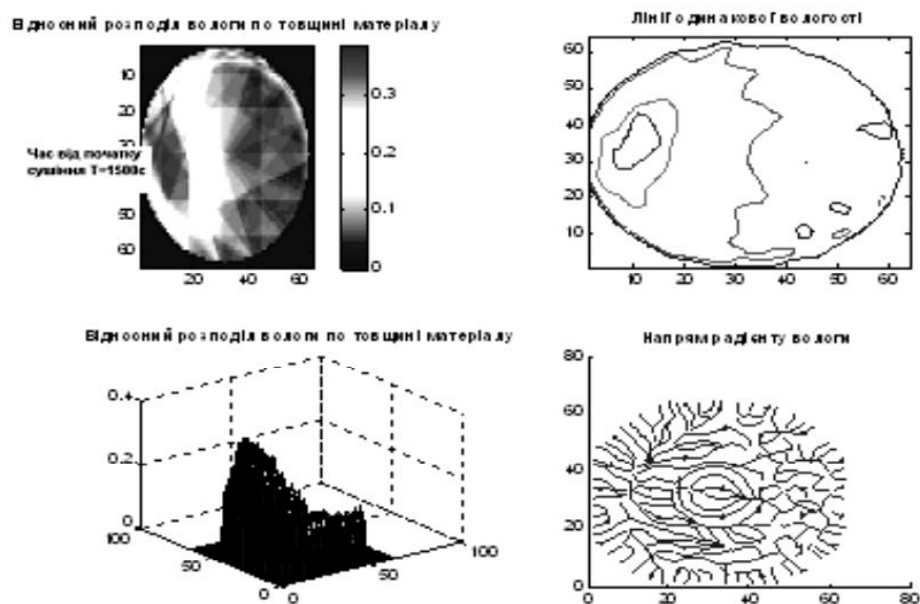


**Рис. 2 – Циліндричний зразок виготовлений із цегли-сирцю з накладеними електродами**

Особливістю досліджуваного приладу є використання кондуктометричного вологоміра, що дає змогу дослідити динаміку зміни розподілу вологості всередині зразка в межах (0,2-2,2)% з точністю  $\pm 0,05\%$ . Дослідження проводили при температурі сушильного агента  $80^{\circ}\text{C}$ . Результати сушіння представлені на томограмах розподілу провідності (Рис. 3.4), які відбирались через однакові проміжки часу. Оброблення даних та візуалізація проводились з використанням системи Matlab<sup>®</sup>. Приведені томограми розподілу вологи по товщині дослідного зразка показують розподіл вологи на 750-й та 1500-й секундах експерименту.



**Рис. 3 – Томограма відносного розподілу вологи в циліндричному зразку з цегли-сирцю на 750-й секунді від початку сушіння при температурі  $80^{\circ}\text{C}$**



**Рис. 4 – Томограма відносного розподілу вологи в циліндричному зразку з цегли-сирцю на 1500-й секунді від початку сушіння при температурі 80<sup>0</sup>С**

Оскільки провідність досліджуваного зразка залежить не тільки від вмісту вологи, але й від наявності розчинених в ньому солей і, в цілому, для кожного часткового випадку щоб отримати не лише якісну, але й кількісну інформацію про характер розподілу вологи потрібно проводити калібрування томографа. При використанні диференціального режиму вимірювання отримані відносні зображення дають змогу оцінити величину градієнта вологості.

#### Висновки

1. Отримані якісні результати свідчать про можливість застосування біполярної електроімпедансної томографії для визначення розподілу вологи в середині твердих тіл.
2. Не зважаючи на те, що при проведенні експерименту використано лише 8 з можливих 32 вимірювальних електроди отримані зображення досить інформативні.
3. Необхідні подальші дослідження для забезпечення розширення діапазону вимірювань, розробки методики калібрування та перевірки томографа.

#### Література

1. Яворський Б. Використання томографії електричної провідності для визначення розподілу вологи в цегли-сирцю під час сушіння / Б. Яворський, С. Балабан, Ю. Промович // Збірник тез доповідей наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Механіко-технологічного факультету «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті»: - Тернопіль, 2011, С. 8-9.
2. Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications [Part 1] / editor David Holder // Institute of Physics Publishing, 2004. — 61 p.
3. Hinz J. Experimentelle und klinische Untersuchung der elektrischen Impedanztomographie zur regionalen Lungenfunktionsprüfung beatmeter Patienten: diss. Dr. med. J. Hinz. — Göttingen, 2005. —115 p.
4. Балабан С.М. Застосування біполярної електроімпедансної томографії для моніторингу процесів масо переносу речовини / С.М. Балабан, Ю.Б. Промович, Б.І. Яворський // Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”. Тези наукових доповідей. — Кременчук: КДУ імені Михайла Остроградського, 2012. — С. 9-10.