

лированной критической точкой другого компонента в метастабильной области, существенно расширяет ландшафт глобальной поверхности равновесия бинарной смеси как в области устойчивых, так и метастабильных состояний.

#### Литература

1. Poole, P. Effect of Hydrogen Bonds on the Thermodynamic Behavior of Liquid Water [Text] / P. Poole, F. Sciortino, T. Grande, H. Stanley, C. Angell // *Physical Review Letters*. — 1994. — Vol. 73, № 12. — P. 1632–1635. doi:10.1103/physrevlett.73.1632
2. Truskett, T. M. A single-bond approach to orientation-dependent interactions and its implications for liquid water [Text] / T. M. Truskett, P. G. Debenedetti, S. Sastry, S. Torquato // *The Journal of Chemical Physics*. — 1999. — Vol. 111, № 6. — P. 2647–2654. doi:10.1063/1.479540
3. Loerting, T. Amorphous ices: experiments and numerical simulations [Text] / T. Loerting, N. Giovambattista // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 2006. — Vol. 18, № 50. — P. R919–R977. doi:10.1088/0953-8984/18/50/r01
4. Jeffery, C. A. A new analytic equation of state for liquid water [Text] / C. A. Jeffery, P. H. Austin // *The Journal of Chemical Physics*. — 1999. — Vol. 110, № 1. — P. 484–489. doi:10.1063/1.477977
5. Skibinsky, A. Liquid – liquid phase transitions for soft-core attractive potentials [Text] / A. Skibinsky, S. V. Buldyrev, G. Franzese, G. Malescio, H. Stanley // *Physical Review E*. — 2004. — Vol. 69, № 6. — P. 061206–061212. doi:10.1103/physreve.69.061206
6. Mishima, O. The relationship between liquid, supercooled and glassy water [Text] / O. Mishima, H. Stanley // *Nature*. — 1998. — Vol. 396, № 6709. — P. 329–335. doi:10.1038/24540
7. Angell, C. A. Insights into Phases of Liquid Water from Study of Its Unusual Glass-Forming Properties [Text] / C. A. Angell // *Science*. — 2008. — Vol. 319, № 5863. — P. 582–587. doi:10.1126/science.1131939
8. Liu, H. A very accurate hard sphere equation of state over the entire stable and metastable region [Text] / Hongqin Liu // *Statistical Mechanics*. — 2006. — Available at: \www/URL: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0605392>
9. Debenedetti, P. G. Supercooled and glassy water [Text] / P. G. Debenedetti // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 2003. — Vol. 15, № 45. — P. R1669–R1726. doi:10.1088/0953-8984/15/45/r01
10. Konynenburg, P. H. V. Critical Lines and Phase Equilibria in Binary Van Der Waals Mixtures [Text] / P. H. V. Konynenburg, R. L. Scott // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. — 1980. — Vol. 298, № 1442. — P. 495–540. doi:10.1098/rsta.1980.0266
11. Ashbaugh, H. S. A simple molecular thermodynamic theory of hydrophobic hydration [Text] / H. S. Ashbaugh, T. M. Truskett, P. G. Debenedetti // *The Journal of Chemical Physics*. — 2002. — Vol. 116, № 7. — P. 2907–2921. doi:10.1063/1.1436479

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ РІВНОВАГ У ПОЛІАМОРФНИХ СИСТЕМАХ

В роботі досліджено фазові рівноваги та критичні лінії поліаморфних систем на основі модифікованого рівняння стану Ван-дер-Ваальса з багатьма критичними точками. Розроблена адекватна модель фазових рівноваг в бінарних поліаморфних системах, що включає рівноваги рідина – рідина, в однокомпонентних системах та оцінку критичних ліній в бінарній суміші.

**Ключові слова:** рівноваги рідина – рідина, критичні лінії, мультикритичні точки, метастабільні стани.

*Артемченко Сергей Викторович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, кафедра информационных систем и сетей, Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, e-mail: sergey.artemenko@gmail.com.*

*Артемченко Сергій Вікторович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор, кафедра інформаційних систем і мереж, Одеська національна академія харчових технологій, Україна.*

*Artemenko Sergiy, Odessa National Academy of Food Technology, Ukraine, e-mail: sergey.artemenko@gmail.com*

УДК 621.78:641

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.38141

Шаповал С. Л.

## ДАТЧИК ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Сформульовано основні вимоги до датчика для дослідження теплофізичних характеристик окремих шарів харчових продуктів. Проведено аналіз особливостей застосування розповсюджених температурних датчиків у харчових продуктах. Наведена схема температурного датчика на основі напівпровідникового діоду в режимі роботи за постійного струму. Описано особливості роботи датчиків з відкритими контактами у кислому та лужному середовищах. Доведено лінійність датчика у діапазоні температур 55..95 °С.

**Ключові слова:** теплофізичні властивості, температурний датчик, калібрування, лінійність показників, градувальний графік.

### 1. Вступ

Харчові продукти часто являють собою складну систему із різних шарів, які можуть мати різний агрегатний

стан, кислотність, коефіцієнти температурного розширення, різну температуру газоутворення та денатурації білків. Теплофізичні властивості регламентують час та режими термічної обробки, швидкість охолодження,

характер та масштаби деформацій харчових продуктів [1]. Саме тому, при комплексному дослідженні харчових продуктів, раціонально визначити теплові властивості кожного шару не окремо, а в цілому виробі під час термічної обробки. Цим обґрунтовується актуальність проведеного дослідження.

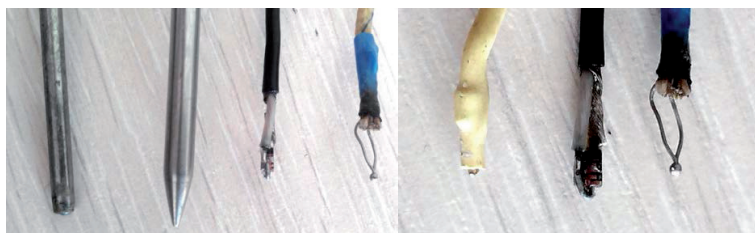
## 2. Постановка проблеми

Під час виконання науково-дослідної теми «Розробка моделей експрес-діагностики теплофізичних властивостей харчових продуктів», науковці університету зіткнулися з проблемою вимірювання температури у шарах харчових продуктів. Так, великі розміри та металеві оболонки датчиків не лише обмежують геометричні розміри шарів при проведенні дослідження, а й самі сприяють теплообміну між шарами. Використання невеликих датчиків із відкритими контактами ускладнено через витік струму із контура датчика. Електрохімічні реакції середовища із металами термопар вносять суттєву похибку в результати вимірювання, а враховуючи різний рН навіть у різних частинах одного продукту (наприклад у тісті та начинці, або рибі та клярі), ця похибка має випадковий характер [2].

В момент визначення теплофізичних властивостей харчових продуктів при різному хімічному складі їх шарів, важливим є отримання реальних показників температури. Адаже через незначну товщину шарів продукту, коливання показників термопар навіть на один градус може внести суттєву похибку у результати вимірювання.

## 3. Аналіз літературних даних

Незважаючи на великий асортимент приладів для вимірювання температури контактним способом, у більшості з них використовуються однакові термодатчики, які можна умовно поділити на дві групи: закриті (або щупи) і відкриті (у більшості випадків термопари). Фотографії датчиків температури, які використовуються на кафедрі інженерно-технічних дисциплін (ІТД) КНТЕУ наведено на рис. 1.



**Рис. 1.** Термодатчики: *а* — термощуп ITM DT-10g; *б* — термощуп KI&BNT WT-2; *в* — розроблений термодатчик; *г* — термопара К-типу; *д* — розроблений термодатчик у термоусаджувальному рукаві; *е* — робочий діод розробленого датчика; *є* — термопара К-типу (для порівняння розмірів)

У закритих датчиках чутливий елемент знаходиться у металевій або скляній колбі, яка уберігає його від дії зовнішнього середовища та механічних ушкоджень. Проте метал або скло вносять суттєву похибку при швидкоплинному вимірюванні температури, адже протидіють проходженню тепла. Час реакції термощупів, які автор статті намагався використати у дослідженні складає 1,5 та 6,2 с (відповідно рис. 1, *а*, *б*). Окрім того

великі розміри захисної колби суттєво спотворюють температурне поле всередині продукту [3] і впливають на його якість, адже створюються канали для передачі тепла (метал має менший термоопір, ніж більшість продуктів).

Хромель-алюмелева термопара (К-типу) є простим і надійним термодатчиком для багатьох приладів. В лабораторіях КНТЕУ її використовують разом із пірометром DT-8855 та мультиметром JT-168. Проте падіння напруги між сплавами та електрохімічні реакції у середовищах з різною кислотністю вносять значну похибку до отриманих результатів.

Для визначення теплофізичних властивостей біологічних об'єктів та харчових продуктів використовуються, переважно, термістори [4, 5], проте нелінійність характеристик напівпровідникових і висока інертність показників металевих термоопорів значно ускладнюють їх використання для динамічного дослідження температури в окремих шарах продуктів харчування.

При використанні термісторів у харчовий промисловості при безперервному виробництві нелінійність показників промислово виготовлених датчиків не ускладнює процес вимірювання [4]. Проте в лабораторних умовах для дослідження властивостей різних харчових продуктів використання термісторних датчиків, особливо виготовлених невеликою партією, значно ускладнює заміну датчика, окрім того необхідність ізоляції вимірювального напівпровідника вносить суттєву похибку — збільшує інертність показників.

Відносно новим є використання плівкових термоопорів для дослідження теплофізичних властивостей. Плівкові температурні датчики, особливо метало-керамічні, мають лінійний температурний коефіцієнт опору, широкий діапазон вимірюваних температур та малий час реакції [6].

Використання плівкових нагрівачів разом із датчиками дозволяє одночасно визначити тепло- і температуропровідність речовин. Так, командою учених під керівництвом Huang L., було розроблено установку для дослідження теплофізичних властивостей харчової сировини та продуктів харчування [7]. Результати апробації установки свідчать про ефективність запропонованого методу, але автори проводили дослідження за кімнатних температур, тому відсутні дані змін тепло- і температуропровідності під час термічної обробки.

Діоди отримали широке розповсюдження у наукових колах через високу лінійність, діапазон робочих температур, що повністю охоплює температури приготування та зберігання продуктів та компактні розміри. Групою учених під керівництвом С. Jungreuthmayer було використано схему вимірювання температури стінок на вищезгаданих діодах за постійної напруги [8]. Проте така схема досить складна у реалізації та доцільна лише за умов роботи датчика у діелектричному середовищі (наприклад у повітрі). При підвищенні провідності середовища підтримувати сталу напругу на датчику із такою схемою живлення стає все складніше. Окрім того збільшується частка струму, який проходить через середовище, унеможливаючи встановлення характеристик самого діода.

При використанні напівпровідникових діодів для вимірювання температури важливо підтримувати по-

стійне значення або напруги або струму. Вимірюючи значення іншої електричної величини, можна визначити температуру діода, а відповідно і середовища, де він знаходиться [2].

При розробці датчика використані роботи Г. Я. Зеленова, зокрема схема вимірювання температури *p-n* переходом [9]. Проте значно змінено схему живлення з метою використання спеціально розроблених для вимірювання температури діодів КТУ84-1.

### 3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

Об'єкти дослідження – температурний датчик, програмне забезпечення для роботи температурного датчика.

Метою дослідження була розробка і апробація компактного термодатчика із швидкою реакцією та мінімальними відхиленнями показників, що зможе працювати у основному діапазоні термічної обробки харчових продуктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

- 1) сформулювати вимоги до температурних датчиків для дослідження змін теплофізичних характеристик шарів харчових продуктів у процесі термічної обробки;
- 2) оптимізувати схему діодного температурного датчика для фіксації температури у окремих шарах харчових продуктів під час термічної обробки;
- 3) розробити алгоритм компенсації впливу провідності середовища на показники датчика;
- 4) перевірити характеристики дослідної партії розроблених датчиків (лінійність та повторюваність показників).

### 4. Оптимізація схеми діодного датчика під використання у процесі термічної обробки харчових продуктів

Науковцями кафедри інженерно-технічних дисциплін КНТЕУ разом із ТОВ «ІТМ» було розроблено діодний термодатчик, що відповідає зазначеним вище вимогам. У датчику встановлено вимірювальний діод КТУ84-1 компанії Philips, який характеризується лінійністю та високою повторюваністю показників. Розроблений термометр дозволяє вимірювати температуру середовища контактним способом в діапазоні  $-40...+180$  °С.

Датчики, що використовувалися у дослідженні, мають розмір вимірювальної частини близько 2,5 мм, завдяки чому можуть вимірювати температуру всередині шару продукту товщиною від 5 мм з мінімальним впливом на показники.

Максимальна температура, при якій зберігається лінійна залежність між температурою та показниками розробленого термодатчика – 214 °С, проте при досягненні температури близько 180 °С зростає ризик розплавлення припою на діоді та пошкодження датчика, саме тому межі вимірювання датчиків штучно обмежені на вищезгаданому значенні температури. На замовлення науковців КНТЕУ в м. Харкові на виробничих

потужностях ТОВ «ІТМ» було виготовлено дослідну партію у 10 термодатчиків.

Прототипом розробленого датчика була схема температурного датчика із лінійними характеристиками [10]. Основні зміни були внесені для корекції роботи діоду КТУ84-1, можливості визначення провідності середовища, а також з метою зниження напруги живлення до 5 В, для живлення через інтерфейс USB. Схему розробленого датчика наведено на рис. 2.

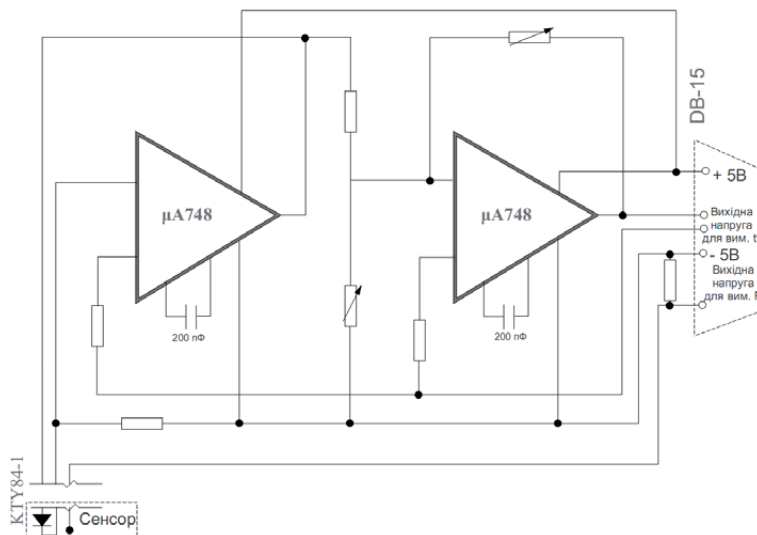


Рис. 2. Схема термодатчика для дослідження теплофізичних властивостей шарів харчових продуктів

Як згадувалося вище, розроблені датчики мають пряму залежність рівня вихідного сигналу від температури у діапазоні, тому для градуювання датчику достатньо двох точок.

Градування термодатчиків здійснювалося відповідно до ТУ У 32.3-30591280-001-2004 та [11]. Приклад калібрувальної таблиці та калібрувального графіку наведено на рис. 3, 4.

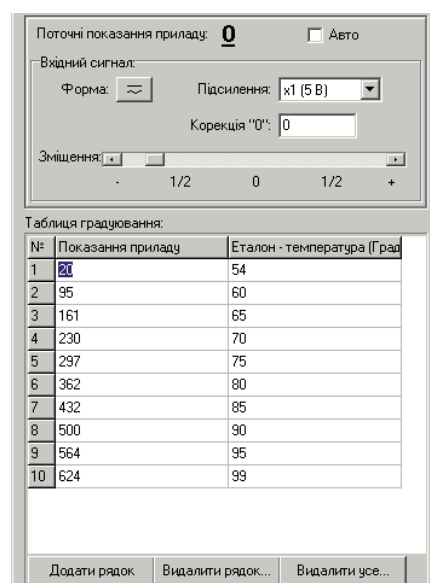


Рис. 3. Вікно програми «Лабораторія ІТМ». Калібрувальна таблиця розробленого термодатчика на 10-розрядному аналогово-цифровому перетворювачі

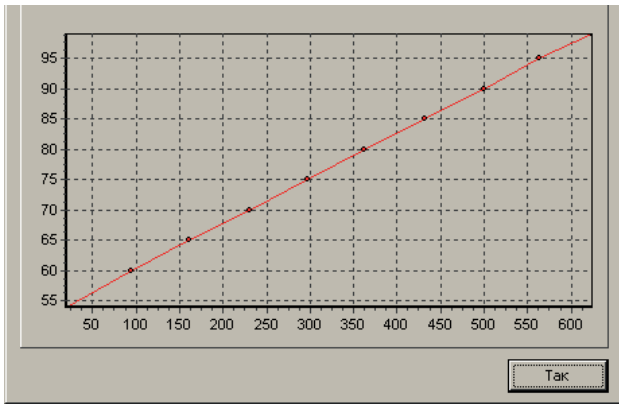


Рис. 4. Вікно програми «Лабораторія ІТМ». Калібрувальний графік електронного термометра

Розроблений термометр має суттєвий недолік, який присутній у більшості термопар та напівпровідникових термометрів, а саме — напруга, що виникає внаслідок хімічної реакції між металом відкритих контактів діода та продуктом вносить суттєву похибку в результати вимірювання температури. Одним із способів усунення цього недоліку є герметизація датчика у скляній чи силіконовій капсулі, але при цьому суттєво зменшується швидкість реакції датчика та збільшуються його розміри. Окрім того, внаслідок значної теплопровідності скла скляна капсула створює «температурні містки» всередині продукту, що ускладнює визначення його теплофізичних властивостей [3].

Для вирішення цієї проблеми сенсорний діод датчика було поміщено до термоусаджувальної стрічки (рис. 1, д), проте це лише уповільнило час реакції та збільшило розміри датчика, не вирішивши вищезгаданої проблеми.

Перспективнішим шляхом виявилася розробка програмного алгоритму компенсації [11]. В розробленому датчику напруга, що виникає в процесі реакції контактів термометра із середовищем та втрати напруги через провідність досліджуваного середовища, частково компенсується вимірюванням провідності середовища на робочій частоті датчика (1...500 Гц), але із зсувом  $1/2$  періоду. Для цього було необхідно до вимірювальної частини підвести електричний контакт, вкритий відносно-інертним матеріалом.

На один з контактів вимірювального діода подається постійна напруга  $-5$  В, на другий і на вільний відкритий контакти подається меандр із довжиною імпульсу  $1/2$  періоду вимірювання і амплітудою 5 В. За силою струму, що проходить між контактом вимірювального діода та відкритим контактом, визначається опір середовища товщиною  $b$ . Таким чином, реєструючий прилад (УВКП ІТМ) за період вимірювання визначає опір діода та провідність середовища.

Для перевірки алгоритму компенсації були проведені вимірювання температури лимона (кисле середовище), зануреного у лужну мінеральну воду протягом 5 год. Оскільки температури м'якоти лимона та мінеральної води вирівнялися, то різниця показників розробленого термометра вказує на максимальне відхилення спричинене електрохімічними реакціями та витоком струму із контуру датчика.

## 5. Обговорення результатів дослідження розробленого алгоритму

Розроблений ТОВ «ІТМ» алгоритм виявився досить ефективним: так різниця у визначенні температури у діапазоні  $(+4...47$  °С) склала  $0,15...0,21$  °С. Для порівняння, різниця показників термопарі К-типу за тих самих умов знаходилася у діапазоні  $0,2...0,7$  °С. Проте, алгоритм компенсації працює лише у разі підключення термодатчиків до універсального вимірювального комп'ютерного приладу (УВКП) ІТМ на цифровий вхід. Слід зазначити, що навіть без компенсаційного алгоритму різниця показників датчика порівняна із різницею показників термопарі К-типу.

Приклад фіксації температури биточків січених під час термічної обробки у термостатичній шафі за допомогою датчиків і УВКП наведено на рис. 5.

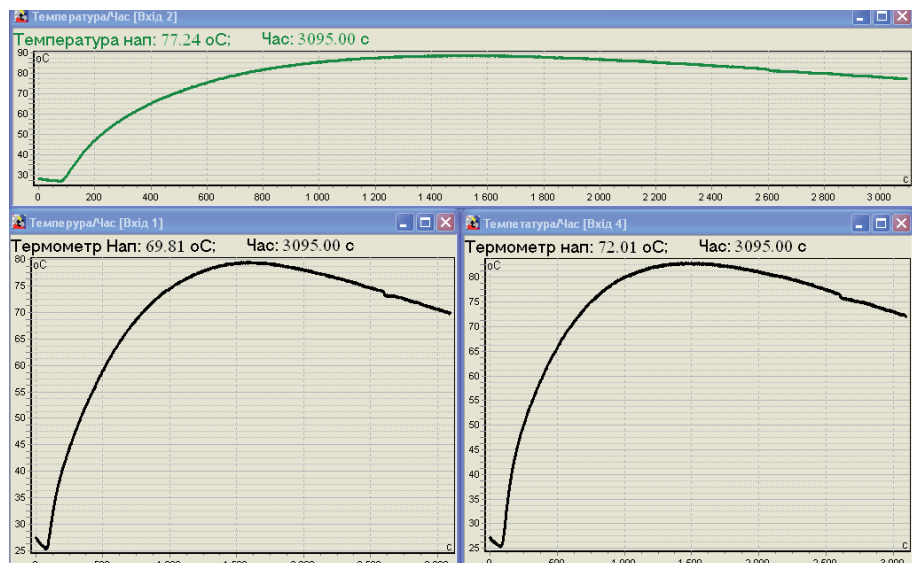


Рис. 5. Вікно програми «Лабораторія ІТМ». Динаміки температури у котлетній масі биточків січених під час термічної обробки

Датчик № 2 було занурено на глибину 4...6 мм у котлетну масу, датчик № 4 — 7...9 мм, датчик № 1 — 10...12 мм. На отриманому графіку видно падіння температури датчика при зануренні у котлетну масу, ділянку термічної обробки (до 1500 с) та охолодження (1500...3000 с).

Близько 2600 с експерименту спостерігалася різке падіння температури, (рис. 5) що, вірогідно, пов'язане із різким збільшенням швидкості потоку повітря в лабораторії (протяг, або відкрите вікно). Слід зазначити, що падіння температури зафіксоване всіма датчиками і з допуском на різну глибину занурення у продукт датчики зреагували однаково.

Характеристики розроблених датчиків, а саме повторюваність результатів та лінійність показників, було

перевірено у рідких харчових продуктах із високою провідністю (бульйони) за різних температур за методом занурення [12], але без математичного моделювання. За еталон було прийнято відповідні результати дослідження промислового термодатчика Pt100.

Відносна різниця між показниками різних датчиків із однієї партії склала від 0,4 % (лінійність) до 2,1 % (повторюваність показників), що вказує на можливість використання діодного датчика у лабораторних умовах для дослідження теплофізичних властивостей харчових продуктів.

Одним із пріоритетних напрямків подальших досліджень є розробка алгоритму зменшення впливу коливань температури теплоносія у робочій камері. Це дозволить спростити проведення досліджень теплофізичних властивостей харчових продуктів не лише у термостатичній шафі, а й у промисловому тепловому устаткуванні.

Станом на кінець січня 2015 р. дослідження температури в кулінарних виробках у процесі термічної обробки за допомогою розроблених термодатчиків виконали аспіранти Національного університету харчових технологій, Чернівецького торговельно-економічного інституту та КНТЕУ.

## 6. Висновки

В результаті проведених досліджень:

1. Сформульовано основні вимоги до датчика температури для дослідження динаміки теплофізичних характеристик харчових продуктів в процесі термічної обробки. Проведено аналіз особливостей застосування розповсюджених температурних датчиків при дослідженні харчових продуктів.

2. Наведена схема температурного датчика на основі напівпровідникового діоду в режимі роботи за постійного струму.

3. Розроблено алгоритм компенсації впливу провідності середовища.

4. На прикладі розробленого датчика та термопари К-типу описано особливості роботи датчиків з відкритими контактами у кислому та лужному середовищах. Доведено лінійність датчика у діапазоні температур 55...95 °С.

## Література

- Гінзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов [Текст]: справочник / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. — М.: Агропромиздат, 1990. — 287 с.
- Датчики измерения температуры, виды, устройство, принцип работы термодатчиков [Электронный ресурс] / Device Search. — Режим доступа: \www/URL: http://www.devicesearch.ru/article/datchiki-temperature
- Marra, F. A mathematical model to study the influence of wireless temperature sensor during assessment of canned food sterilization [Text] / F. Marra, V. Romano // Journal of Food Engineering. — 2003. — Vol. 59, № 2–3. — P. 245–252. doi:10.1016/s0260-8774(02)00464-8
- Crattele, J. On-line local thermal pulse analysis sensor to monitor fouling and cleaning: Application to dairy product pasteurisation with an ohmic cell jet heater [Text] / J. Crattele, S. Ghnimi, P. Debreyne, I. Zaid, A. Boukabache, D. Esteve, L. Auret, et al. // Journal of Food Engineering. — 2013. — Vol. 119, № 1. — P. 72–83. doi:10.1016/j.foodeng.2013.05.009

- Reyes-Romero, D. F. Dynamic thermal sensor for biofilm monitoring [Text] / D. F. Reyes-Romero, O. Behrman, G. Dame, G. A. Urban // Sensors and Actuators A: Physical. — 2014. — Vol. 213. — P. 43–51. doi:10.1016/j.sna.2014.03.032
- Sundeen, J. Thermal sensor properties of cermet resistor films on silicon substrates [Text] / J. Sundeen, R. Buchanan // Sensors and Actuators A: Physical. — 2001. — Vol. 90, № 1–2. — P. 118–124. doi:10.1016/s0924-4247(00)00562-8
- Huang, L. Simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of food and agricultural materials using a transient plane-source method [Text] / L. Huang, L.-S. Liu // Journal of Food Engineering. — 2009. — Vol. 95, № 1. — P. 179–185. doi:10.1016/j.foodeng.2009.04.024
- Jungreuthmayer, C. A Detailed Heat and Fluid Flow Analysis of an Internal Permanent Magnet Synchronous Machine by Means of Computational Fluid Dynamics [Text] / C. Jungreuthmayer, T. Bauml, O. Winter, M. Ganchev, H. Kapeller, A. Haumer, C. Kral // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2012. — Vol. 59, № 12. — P. 4568–4578. doi:10.1109/tie.2011.2176696
- Зеленов, Г. Измерение температуры p-n переходом [Текст] / Г. Зеленов // Современная электроника. — 2007. — № 2. — С. 38–38.
- Совершенный линейный диодный датчик температуры [Электронный ресурс] / Radiostorage.net // Радиоэлектроника, схемы, статьи и программы для радиолюбителей. — Режим доступа: \www/URL: http://radiostorage.net/?area=news/2380
- Шаповал, С. Л. Рекомендації до виконання науково-дослідних робіт на УВКП [Текст]: лабораторний практикум / С. Л. Шаповал, Н. П. Форостяна, Ю. В. Литвинов, Р. П. Романенко. — К.: КНТЕУ, 2013. — 92 с.
- Rupnik, K. Identification and prediction of the dynamic properties of resistance temperature sensors [Text] / K. Rupnik, J. Kutin, I. Bajsić // Sensors and Actuators A: Physical. — 2013. — Vol. 197. — P. 69–75. doi:10.1016/j.sna.2013.03.039

## ДАТЧИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Сформулированы основные требования к датчику температуры для исследования теплофизических характеристик слоев пищевых продуктов. Проведен анализ особенностей применения распространенных температурных датчиков в пищевых продуктах. Приведена схема температурного датчика на основе полупроводникового диода в режиме постоянного тока. Описаны особенности работы датчиков с открытыми контактами в кислой и щелочной средах. Доказано линейность датчика в диапазоне температур 55...95 °С.

**Ключевые слова:** теплофизические свойства, температурный датчик, калибровка, линейность показателей, градуировочный график.

*Шаповал Светлана Леонидівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інженерно-технічних дисциплін, Київський національний торговельно-економічний університет, Україна, e-mail: Shapoval\_KNTEU@ukr.net.*

*Шаповал Светлана Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерно-технических дисциплин, Киевский национальный торгово-экономический университет, Украина.*

*Shapoval Svetlana, Kyiv National University of Trade and Economics, Ukraine, e-mail: Shapoval\_KNTEU@ukr.net*