

УДК 665.7.035.6:641.1

doi:10.20998/2413-4295.2017.53.23

## ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОЛОЇДНО-ПОРИСТИХ ХАРЧОВИХ СИСТЕМ

С. Л. ШАПОВАЛ

кафедра інженерно-технічних дисциплін, Київський національний торговельно-економічний університет, Київ, УКРАЇНА  
\*email: shapoval@knteu.kiev.ua

**АНОТАЦІЯ** Проведено комплексне дослідження реологічних властивостей колоїдно-пористих харчових систем з використанням Багатофункціонального вимірювального модульного приладу «МІГ-1.3». Зафіксовано функціональну залежність зміни релаксаційної сили та температурного поля в зразку під час осьової деформації стиснення у форматі реального часу. Отримано рівняння швидкості зміни деформаційної сили та швидкості поширення теплового поля. Отримані результати узгоджені з товарознавчими критеріями якості.

**Ключові слова:** реологія; деформація; колоїдно-пружна харчова система; теплове поле; фізико-математична модель.

## PHYSICAL PROPERTIES OF COLLOID-POROUS FOOD SYSTEMS

S. L. SHAPOVAL

Department of Engineering Disciplines, Kyiv National University of Trade and Economics, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The aim of the research is: obtaining a relaxation curve for colloid-porous food structures; recording the appearance of internal energy sources inside a sample during its deformation; researching the thermal field and the nature of its propagation; establishing relation between relaxation and thermophysical properties of colloid-porous food systems. As is known, deformation of food products induces formation of elastic forces that perform work to return an object to its original state. Thanks to the system of sensors of the "Rheology" module, it is possible to fix not only the state of loading and restoration of an object due to deformation, but also temperature change. Data recording takes place in real time and is displayed on the PC screen.

As a result of the research, the following conclusions were drawn: the density of researched objects depends on porosity of the structure itself - the more air bubbles in the system, the smaller the density of a sample. Porosity of the system as well affects elastic properties of the samples. Restoration of the structure depends on elasticity of the researched object, or rather its moisture. Wet marshmallows have good elasticity and weak relaxation properties. They get improved with 15% moisture loss of the original values. But if this index exceeds 20%, the researched object becomes brittle, visually dryness of the surface is detected. The results obtained are important for the development of new methods and tools for expertise of food products.

Transportation of food products is related to deformation of objects. During deformation, the thermal field appears in a sample. The velocity and way of its distribution depends on spatial structure of a sample. Since within the study the food systems researched had colloid-porous structure, the air contained in pores plays a significant role and affects not only the circulation of air inside the pores themselves, but also the transfer of moisture and heat throughout the structure. During deformation, the heat-conduction coefficient increases, that is confirmed by histograms given in the article.

**Keywords:** rheology; deformation; colloid-elastic food system; thermal field; physico-mathematical model.

### Вступ

Визначення реологічних властивостей колоїдно-пористих харчових систем, особливо багатокомпонентних, є одним з головних завдань сучасної промисловості. Цим питанням займаються науковці, спеціалісти-товарознавці, технологи, інженери-конструктори професійного обладнання. Сучасне професійне обладнання має серйозне програмне забезпечення, що допомагає працівнику не лише ефективно використовувати енергоресурси, а й програмувати режими роботи як для продуктів класичної рецептури та і для нових. Для більшого розуміння технологічного процесу необхідно будь-яку досліджувану систему розглядати з позицій фізичної моделі - структурної будови досліджуваного об'єкту [1]. Лише розгляд системи з позицій молекулярної будови з врахуванням характеру

зв'язку, дозволяє зрозуміти причини появи, наприклад, теплового поля в середині досліджуваного об'єкту під час деформації. Характер руху фронту теплового поля і його наслідки мають досить значний вплив на товарознавчі показники якості товару.

На кафедрі інженерно-технічних дисциплін Київського національного торговельно-економічного університету були проведені дослідження колоїдно-пористих структур «Багатофункціональним вимірювальним модульним пристроєм «МІГ-1.3»» з використанням модулів «Реологія» та «Тепло». Модуль «Реологія» дозволяє дослідити всі види деформації і наслідки пов'язані з цим процесом. Модуль «Тепло» дозволяє фіксувати і вивчати теплове поле з різними градієнтами температур [2].

Схема експериментальної установки зображено на рис.1.

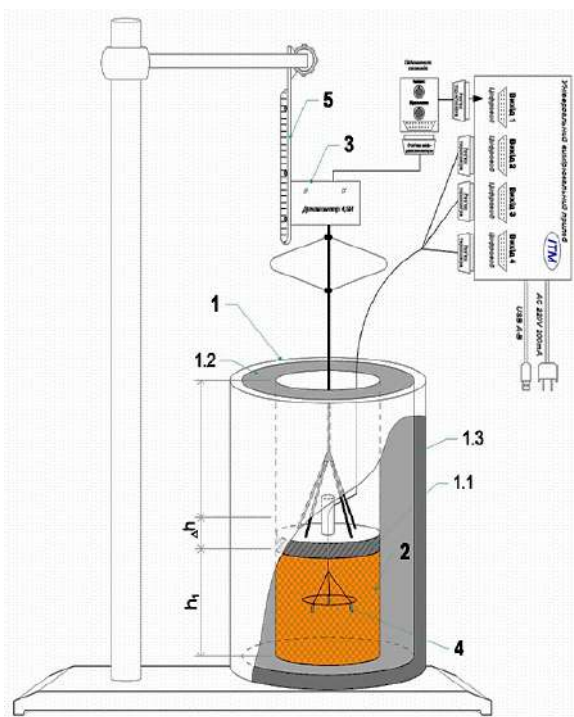


Рис. 1 - Схема установки комплексного вивчення колоїдно-пористих харчових систем. 1-зовнішній циліндр виготовлений з пластика; 1.1 – поришень; 1.2 – циліндр; 1.3 - ізоляція (пінопласт); 2 - зразок; 3 - динамометр; 4-термодатчики у зразку; 5-лінійка

### Мета роботи

Отримати релаксаційну криву для колоїдно-пористих харчових структур; зафіксувати появу внутрішніх джерел енергії під час деформації; вивчити теплове поле та характер його розповсюдження; встановити зв'язок між релаксаційними та теплофізичними властивостями колоїдно-пористих харчових систем.

### Викладення основного матеріалу

Як відомо, під час деформації харчових продуктів в об'єкті виникають сили пружності які виконують роботу з повернення об'єкту в початковий стан. Процес відновлення системи в реології характеризує – релаксацію, а час відновлення – час релаксації [3].

Завдяки системі датчиків модуля «Реологія» ми фіксуємо не лише стан навантаження та відновлення об'єкту в результаті деформації, а й зміну температури. Зняття даних відбувається в реальному часі і відображається на екрані ПК [4]. У результаті деформаційних дій над об'єктом температура самого об'єкту зростає, що наглядно видно на рис. 2.

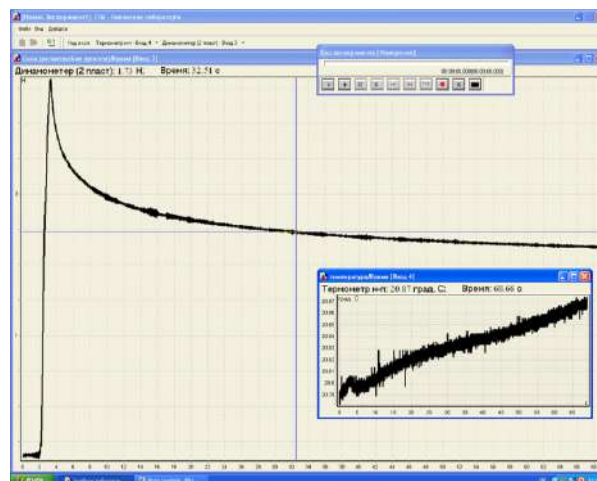


Рис. 2 - Вікно програми при роботі приладу «МПГ-1.3» модуля «Реологія»

Більше програмне вікно відображає релаксацію досліджуваного об'єкту, а внутрішнє вікно - зміну температуру в середині зразка. За рахунок великої чутливості приладу ми маємо широкий діапазон коливань показів датчика при зніманні температури [5]. Хоча зміна температури становить всього декілька градусів, проте ці зміни можуть бути досить вагомими для крихких структур. Якщо температура є мірою середньої кінетичної енергії руху молекул, а за нульовим началом термодинаміки - мірою теплоти. Логічно припустити, що для вологих продуктів, якими є більшість харчових продуктів, під час деформації вивільняється тепло яке вплине на стан системи в цілому [2]. Для отримання цілісної картини процесу скористаємось трьохмірною побудовою експериментальних графіків зображених на рис. 3.

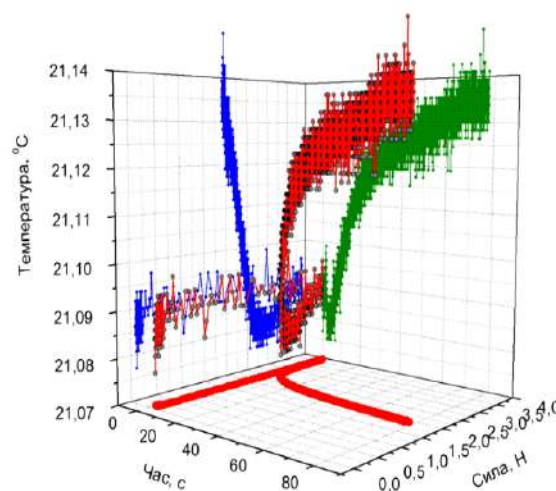


Рис. 3 - Трьохмірне зображення залежності розподілу зміни релаксаційної сили, температури і часу у досліджуваному зразку

Цей факт говорить про зміну не лише пружних властивостей об'єкту, а й до скорочення терміну зберігання об'єктів, особливо колоїдно-пористих харчових структур. Тому не всі харчові продукти можуть транспортуватися в розсипному пакуванні [6].

### Обговорення результатів

Колоїдно-пористі структури цікаві тим, що їх пористість забезпечується наявністю пор. Їх кількість впливає на густину зразка та деформаційні властивості. Для комплексного дослідження теплофізичних властивостей об'єктів необхідно визначити густину. Результати досліджень див. в табл.1.

Таблиця 1 – Показники густини досліджуваних зразків зефіру різних виробників

Зразки	h, мм	D, мм	m, кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
№1 Подарунковий	27,49	33,94	11,48	463,05
№2 Жако	18,87	31,3	9,93	677,54
№3 Малюк	18,02	25,33	6,83	761,56
№4 Рошен	15,87	31,97	6,33	516,97

Для досліджень було взято об'єкти циліндричної форми. Густина зразків відрізняється з причини пористості досліджуваних об'єктів, як і зазначалося вище. Кількість повітряних пухирців і їх щільність характеризує пружні властивості зразків. Крім того величина пухирців залежить від використаних наповнювачів. В основному при виготовленні зефіру використовують яблучне пюре, проте виробники для розширення асортименту можуть використовувати і інші харчові інгредієнти, які у свою чергу впливають не лише на пружні властивості зразків, а й на їх теплофізичні характеристики [7].

Аналізуючи експериментальні дослідження з'ясовується, що ступінь дисперсності ягідного пюре впливає на структуроутворюючі показники зефіру. У порівнянні із зразком, де за традицією використовували яблучне пюре, у інших зразках спостерігається підвищення пористості на 30...35%. Розподіл пухирців по площі зразка визначають їх концентрацію, а відповідно і дисперсність зразка. Більша концентрація пухирців зменшує питому вагу зразка і змінює його густину. Радіус пори зефіру з використанням ягідних пюре у порівнянні із контрольним зразком зменшується від  $2,2 \cdot 10^{-5}$  м до  $1,6 \cdot 10^{-5}$  до  $1,1 \cdot 10^{-5}$  м, що характеризує масу, як дрібнодисперсну. Така структура має високу стабільність.

За табл. 1 більш пористим є «Подарунковий»

зефір. Пористість зразків впливає не лише на їх пружні властивості, а й на розподіл тепла в зразку під час деформації про що свідчать зняті діаграми залежностей пружних властивостей продукту під час релаксації.

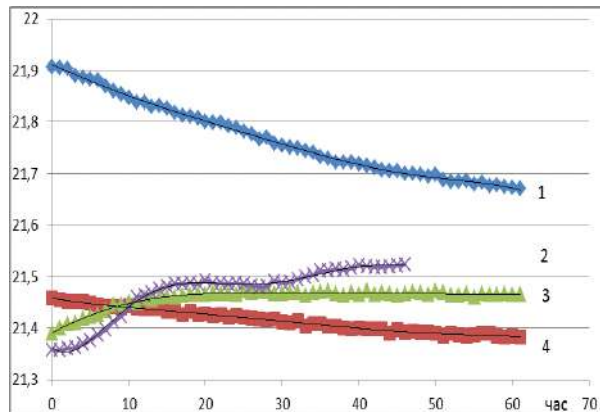


Рис. 4 - Функціональна залежність зміни температури в зразках під час релаксації (1-Рошен; 2-Малиш; 3-Подарунковий; 4-Жако)

Для кожного зразка отримали функціональну залежність зміни температури під час релаксації (рис. 4). За отриманими графіками чітко проглядається не однакова поведінка зразків під час релаксації. Одні зразки мають температурну залежність, яка з часом зменшується, а інші навпаки мають збільшення температури під час релаксації. Пояснення цього явища лежить в площині фундаментальної фізики яка говорить про те, що температура під час різкого розширення (адіабатного процесу) може знижуватись із-за різкого охолодження, а це можливо лише в тому випадку, коли зразок має велику концентрацію повітряних бульбашок. Отже зразки які у своїй структурі мають великий відсоток повітряних пухирців і які під час деформації зазнали стиснення після зняття деформуючої сили намагаються з овальної форми повернутись до сферичної [8]. Якщо ж температура зростає, то це говорить про те, що виконана робота з деформації зразка вся перетворилася у внутрішню енергію і розподіляється під час релаксації між молекулярними структурами зразка, концентрація пухирців мінімальна.

Ми у своїй роботі визначили швидкість, як першу похідну від рівняння зміни температури та отримали графічну залежність див. рис. 4.

Швидкість розповсюдження тепла в зразку можна визначити аналітично за формулою:

$$v_r = \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho\tau_r}} \quad (1)$$

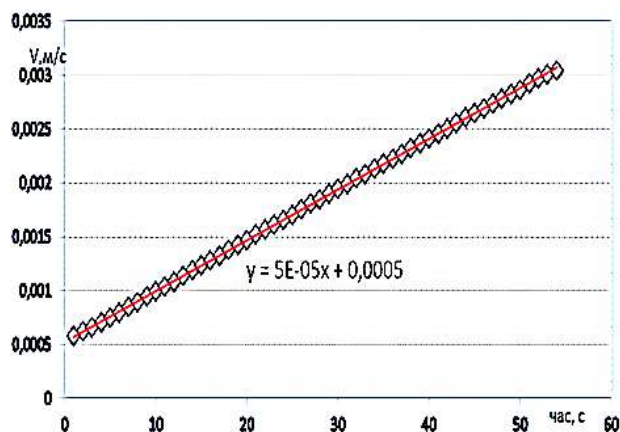


Рис. 5 - Графік зміни швидкості температурного поля в зразку

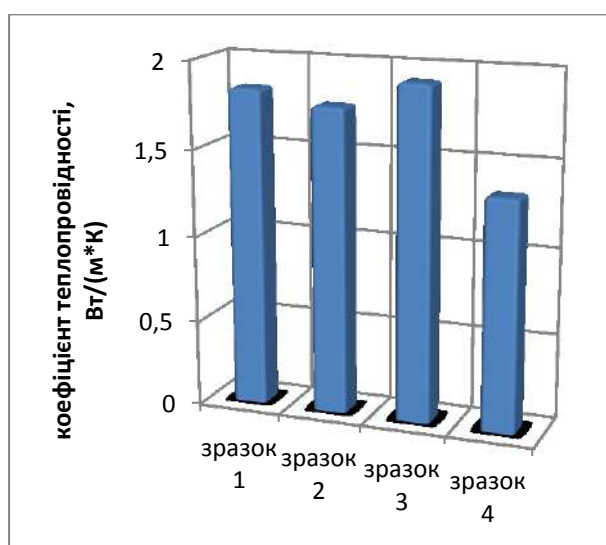


Рис. 6 - Гістограма середніх значень коефіцієнтів теплопровідності для зефірних мас (1 - Жако; 2- Рошен; 3- Малюк; 4 - Подарунковий)

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності харчового продукту;  $c$  - теплоємність продукту,  $1040 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ ;  $\rho$  - густина продукту;  $\tau_r$  - час релаксації продукту.

За формулою (1) розраховували коефіцієнт теплопровідності зразків.

На теплопровідність матеріалу впливає сама структура досліджуваних зразків [9]. Якщо зразок має велику пористість, то відповідно в них є багато повітряних мас, що є суттєвою перешкодою теплопровідності [10]. Крім того повітря є нерухомим в порах, а отже і поганим провідником тепла. Другою вагомою компонентою для теплопровідності є наявність клітковини в структурі у вигляді ягідного пюре. Проте такі структури змінюють коефіцієнт теплопровідності під час деформації і досить вагомо, див. рис.7.

Аналізуючи отримані функціональні залежності можна зробити висновок про те, що швидкість відновлення об'єкту має лінійну залежність. Лінійну залежність деформаційного відновлення отримуємо лише у випадку пружної деформації, отже наші досліджувані об'єкти при відносному стисненні у 12% мали лише пружну деформацію.

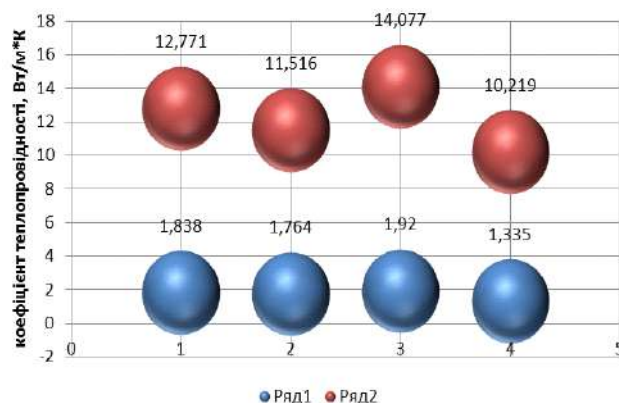


Рис. 7 - Гістограма значень коефіцієнтів теплопровідності для зефірних мас до і після деформації (1 - Жако; 2- Рошен; 3- Малюк; 4 - Подарунковий); Ряд 1 - до деформації; Ряд 2 - після деформації

Об'єднавши формули релаксаційної швидкості визначеної через механічні характеристики та теплофізичні характеристики, отримали формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності від температури, що має наступний вид:

$$\lambda = \frac{(F^2 \Delta t^3 c \rho)}{m^2} \quad (2)$$

За отриманими результатами були побудовані графіки залежності коефіцієнта теплопровідності від температури.

## Висновки

Стаття присвячена дослідженню фізичних властивостей колоїдно-пористих систем на основі зефірних мас. Густина досліджуваних об'єктів залежить від пористості самої структури – чим більше повітряних пухирців у системі тим менша густина зразка. Пористість системи впливає і на пружні властивості зразків. Відновлення структури залежить від еластичності досліджуваного об'єкту, а точніше від його вологості. Вологі зефірні маси мають добру еластичність і слабкі релаксаційні властивості. Вони покращуються при втраті вологи на 15% від початкових значень, але якщо цей показник

перевищить 20% - досліджуваний об'єкт стає крихким, візуально фіксується сухість поверхні. Отримані результати є важливими для розробки нових методів і засобів експертизи харчових продуктів.

Транспортування харчових продуктів пов'язана з деформацією об'єктів. Під час деформації в зразку виникає теплове поле. Швидкість і напрямок поширення теплового поля залежить від просторової структури зразка. Так як в дослідженнях ми мали колоїдно-пористу структуру, то повітря заключене в порах, відіграє вагомий роль і впливає не лише на циркуляцію повітря в самих порах, а відповідно і на перенесення вологи і тепла у всій структурі. Під час деформації коефіцієнт теплопровідності зростає про що і говорять гістограми наведені в статті.

Коефіцієнт теплопровідності визначений з використанням інноваційних методів дослідження, а саме, багатofункціональним вимірювальним модульним пристроєм «МІГ-1.3». Отримано релаксаційні та температурні діаграми обробіток яких і лежить в основі статті.

#### Список літератури

1. Lee, S. K. The influence of moisture content on the rheological properties of processed cheese spreads / S. K. Lee, S. Anema, H. Klostermeyer // *International journal of food science & technology*. – 2004. – 39,7. – P. 763-771. – doi: 10.1111/j.1365-2621.2004.00842.x.
2. Шаповал, С. Л. Діагностика фізичних властивостей харчових продуктів: Монографія / С. Л. Шаповал, Р. П. Романенко, Н. П. Форостяна. - К.: КНТЕУ. – 2017. – 192 с.
3. Shapoval, S. Improved method to determine structural-mechanical properties of turkey meat at axial deformation / S. Shapoval // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. - 2017. - 1 (10(85)). – P. 63-69. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.93453.
4. Антюшко, Д. Реологічні властивості продуктів для ентерального харчування / Д. Антюшко, Ю. Мотузка, Р. Романенко // *Товари і ринки*. – К.: В-во КНТЕУ. – 2013. – №1. – С. 125-130.
5. Криворучко, М. Реологічні властивості пшеничного тіста з кокосовою клітковиною / М. Криворучко, Н. Форостяна // *Товари і ринки*. - 2016. - № 2. - С. 177–184.
6. Шаповал, С. Л. Лабораторний практикум з виконання науково-дослідних робіт / С. Л. Шаповал, Н. П. Форостяна, Ю. В. Литвин, Р. П. Романенко. – КНТЕУ. – К.: - 2013. – 85 С.
7. Сидоренко, О. В. Прогнозування терміну зберігання чорноморської акули катран залежно від імпульсу сили деформації / О. В. Сидоренко, Н. О. Боліла, Н. П. Форостяна // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 205-210. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.33.
8. Кравченко, М. М. Структурно-механічні властивості випечених бісквітних напів-фабрикатів з додаванням борошна «здоров'я» та порошку керобу / М. М. Кравченко, Р. П. Романенко, О. Л. Романовська // *Харчова наука та технологія*. - 2015. - С. 37-43. – doi: 10.15673/2073-8684.4/2015.55869.
9. Anandha Rao, M. Flow and functional models for rheological properties of fluid foods / M. Anandha Rao // *Rheology of Fluid and Semisolid Foods*. – 2014. – 27-58. – doi: 10.1007/978-0-387-70930-7\_2.
10. Schmitt, C. Protein/polysaccharide complexes and coacervates in food systems / C. Schmitt, S. L. Turgeon // *Advances in colloid and interface science*. – 2011. – 167. – 1-2. – P. 63-70. – doi: 10.1016/j.cis.2010.10.001.

#### Bibliography (transliterated)

1. Lee, S. K., Anema S., Klostermeyer H. The influence of moisture content on the rheological properties of processed cheese spreads. *International journal of food science & technology*, 2004, **39**, 7, P. 763-771. – doi: 10.1111/j.1365-2621.2004.00842.x.
2. Shapoval, S., Romanenko, R. P., Forostyana, N. P. Diagnostika fizichnih vlastivostey harchovih productov, Kiev, KNTU, 2017, 192 p.
3. Shapoval, S. Improved method to determine structural-mechanical properties of turkey meat at axial deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, **1**(10 (85)), P. 63-69. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.93453.
4. Antushko, D., Motuzka, Yu., Romanenko, R. P. Reologichni vlastivosti productiv dlya enternalnogo harchuvannya. *Tovari i rinki*, 2013, **1**, P. 125-130.
5. Krivoruchko, M., Forostyana, N. Reologichni vlastivosti pshenichnogo tista z kokosovoyu klitkovinoyu. *Tovari i rinki*, 2016, **2**, P. 177–184.
6. Shapoval, S. L., Forostyana, N. P., Litvin, Yu. V., Romanenko, R. P. Laboratorniy practicum z vikonannya naukovy-doslidnih robit. KNTU, 2013, 85 P.
7. Sydorenko, O., Bolila, N., Forostyana, N. Forecasting of structural characteristics of the black sea dogfish depending on a deformation force impulse. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 205–210. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.33.
8. Kravchenko, M. M., Romanenko, R. P., Romanovska, O. L. Structurno-mehanichni vlastivosti vipechenih bisquitnih napivfabriativz dodavannyam boroshna "zdrovye" ta poroshku kerobu. *Harchova nauka ta tehnologia*, 2015, P. 37-43. – doi: 10.15673/2073-8684.4/2015.55869.
9. Anandha Rao, M. Flow and functional models for rheological properties of fluid foods. *Rheology of Fluid and Semisolid Foods*, 2014, 27-58. – doi: 10.1007/978-0-387-70930-7\_2.
10. Schmitt, C., Turgeon, S. L. Protein/polysaccharide complexes and coacervates in food systems. *Advances in colloid and interface science*, 2011, **167**, 1-2, P. 63-70. – doi: 10.1016/j.cis.2010.10.001.



## Відомості про автора

**Шаповал Світлана Леонідівна** – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний торговельно-економічний університет, доцент кафедри Інженерно-технічних дисциплін, м. Київ, Україна, \*email: shapoval@knteu.kiev.ua.

**Svitlana Shapoval** – Candidate of Technical Sciences, Kyiv National University of Trade and Economics, Associate Professor of Department of Engineering Disciplines, Kyiv, Ukraine, \*email: shapoval@knteu.kiev.ua.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Шаповал, С. Л.** Фізичні властивості колоїдно-пористих харчових систем / **С. Л. Шаповал** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 53 (1274). – С. 159-164. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.23

*Please cite this article as:*

**Shapoval, S. L.** Physical properties of colloid-porous food systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **53** (1274), 159–164, doi:10.20998/2413-4295.2017.53.23.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Шаповал, С. Л.** Физические свойства коллоидно-пористых пищевых систем / **С. Л. Шаповал** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 53 (1274). – С. 159-164. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.23.

**АННОТАЦІЯ** Проведено комплексне дослідження реологічних властивостей колоїдно-пористих харчових систем з використанням Многофункціонального вимірювального модульного пристрою «МіГ-1.3». Зафіксовано функціональну залежність зміни релаксаційної сили та температурного поля в зразку при осевій деформації стиснення в форматі реального часу. Отримано рівняння швидкості зміни деформаційної сили та швидкості поширення теплового поля. Отримані результати узгоджуються з товароведчими критеріями якості.

**Ключові слова:** реологія; деформація; колоїдно-пружка харчова система; теплове поле; фізико-математична модель.

*Поступила (received) 18.12.2017*