

**Л.Ю. Авдєєва**

Інститут технічної теплофізики НАН України,  
вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна, тел. +38 (044) 453-28-44

## РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИНЦИПУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ СТВОРЕННІ НАНОТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ



*Обґрунтовано доцільність використання принципу дискретно-імпульсного введення енергії для спрямованого управління процесом утворення ліпідних наноструктур і промислового виробництва функціональних матеріалів з ними для зниження енерговитрат і підвищення продуктивності процесів. Наведено приклад використання ліпідних наноструктур для підвищення ефективності нового виду харчування спеціального дієтичного призначення*

*Ключові слова: ліпідні наноструктури, дискретно-імпульсне введення енергії, гетерогенні середовища, продукти спеціального дієтичного призначення.*

Дослідженням і впровадженням розробок у галузі нанотехнологій приділяється велика увага в усіх розвинених країнах. В Україні фундаментальні і прикладні дослідження щодо отримання, вивчення і застосування нанотехнологій і наноструктурних матеріалів здійснюються впродовж останніх 15–20 років в рамках відомого замовлення НАН України, грантів Міністерства освіти і науки, грантів міжнародних наукових фондів, прямих контрактів з промисловістю. Більшість створених розробок визнані передовими в світі. Представлені в статті дослідження виконувалися в рамках Державної цільової науково-технічної програми «Нанотехнології та наноматеріали на 2010–2014 роки».

Серед існуючих напрямків розвитку нанотехнологій одним із найбільш актуальних є створення і використання наноматеріалів. Велика увага приділяється нанопрепаратам як носіям біологічно активних речовин і лікарських речовин, які за рахунок цільової доставки дозволяють підвищувати ефективність дії

нових препаратів. Серед таких препаратів цікавими є везикули з фосфоліпідів, які досить широко використовуються у фармакології, медицині та косметології [1, 4]. Існують значні перспективи використання цих наноматеріалів в інших галузях, наприклад у харчовій промисловості. У складі харчових продуктів ліпідні наноструктури виконують функції наноконтейнерів для транспортування біологічно-активних речовин (білків, амінокислот, вітамінів, мінеральних речовин та ін.) безпосередньо в середину клітини і вивільняють їх поступово, що збільшує тривалість впливу і сприяє підвищенню ефективності дії. Після утилізації фосфоліпіди використовуються організмом для побудови нових клітин [1, 2, 3]. Незважаючи на великі обсяги виробництва продукції у харчовій промисловості і перспективність використання наноматеріалів, в Україні відсутні сучасні енергоефективні промислові технології їх отримання.

Пріоритетом сучасних наукових розробок і впровадження наноматеріалів є створення високопродуктивних енергозберігаючих техно-

логій, які дозволяють одержувати якісну і конкурентоспроможну продукцію. Метою даної роботи було проведення комплексних аналітичних і експериментальних досліджень для інтенсифікації процесу формування ліпідних наноструктур і створення енергоефективних промислових технологій виробництва функціональних матеріалів з ними для застосування в харчовій промисловості.

Зниження енерговитрат і підвищення продуктивності процесу при утворенні ліпідних наноструктур можна досягти за рахунок використання переваг методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), що реалізується в обладнанні різних типів, наприклад в роторно-пульсаційних апаратах (РПА). Принцип ДІВЕ визначає шляхи прямого перетворення енергії на виконання корисної роботи для прискорення процесів міжфазного тепло- і масопереносу при обробці гетерогенних середовищ. При використанні методу ДІВЕ енергія, що безперервно вводиться в апарат у вигляді короткочасних імпульсів високої потужності, дискретно розподілена в робочому об'ємі і концентрується безпосередньо на поверхні окремої дисперсної частинки, де необхідно виконати корисну роботу [5–7]. Таким чином, метод ДІВЕ дозволяє спрямовано керувати процесом диспергування і гомогенізації, отримувати якісні високодисперсні матеріали, скорочувати питомі витрати електроенергії на одиницю продукції і виробляти препарати у промислових обсягах.

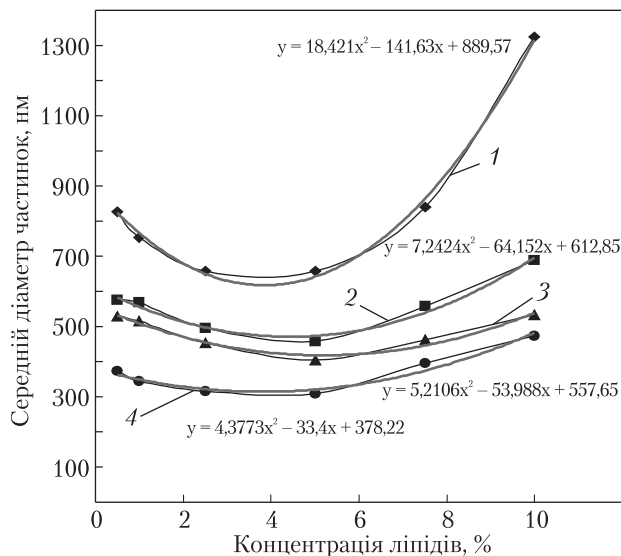
Для визначення особливостей процесу диспергування і гомогенізації складної гетерогенної системи з фосфоліпідами нами було проведено комплекс експериментальних досліджень по визначенню впливу вмісту фосфоліпідів, їх концентрації, температури проведення процесу, циклічності обробки та інших факторів на властивості утворених ліпідних везикул в умовах багатофакторного впливу за рахунок ДІВЕ. Основними характеристиками везикулярних фосфоліпідних частинок є їх розмір і внутрішній об'єм. Розмір утворених частинок

в залежності від зміни умов проведення процесу визначався на лазерному фотон-кореляційному спектрометрі ZetaSizer-3 Malvern Instrument (Великобританія), обладнаному He–Ne-лазером ЛГН-111 ( $P = 25$  мВт,  $\lambda = 633$  нм). Даний метод дозволяє визначити коефіцієнт дифузії дисперсних частинок у рідині шляхом аналізу характерного часу флуктуації інтенсивності розсіяного світла. Реєстрацію та статистичну обробку лазерного випромінювання, розсіяного від водної суспензії наночастинок (коефіцієнт заломлення води дорівнює 1,33), проводили протягом 90 с при температурі 22 °С під кутом розсіювання 90°. Діапазон вимірювання приладу — від 1 нм до 50 мкм. Отримані результати вимірювань обробляли за допомогою сервісної комп'ютерної програми PCS-Size mode v1.61 [8, 9].

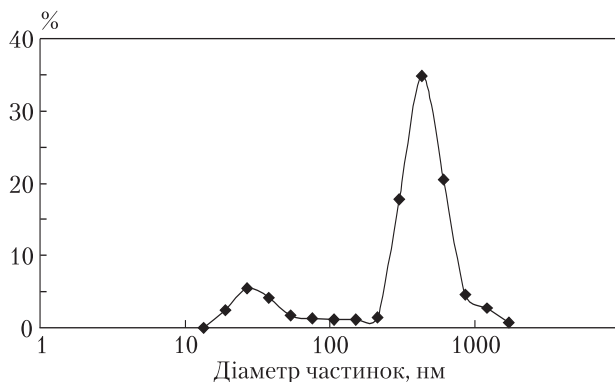
Експериментальні дослідження проводилися на проточному роторно-пульсаційному апараті (РПА) циліндричного типу, що складається з двох статорів і ротора з внутрішнім радіусом  $R_{rot1} = 35$  мм і зовнішнім радіусом  $R_{rot2} = 38$  мм. Ширина кільцевих зазорів між ротором і статорами  $\delta = 0,2$  мм. На поверхнях статорів і ротора розміщені  $n = 24$  щілинних отвори шириною  $a = 3$  мм, заввишки 25 мм і завглибшки  $l = 3$  мм, які взаємно перекриваються при обертанні ротора. Номінальне значення кутової швидкості ротора — 314 рад/с. Для приготування суспензії фосфоліпідів використовувався сухий соєвий лецитин «Солей»(ЕС).

Результати досліджень залежності середнього діаметра частинок від концентрації ліпідів при різних температурах диспергування наведені на рис. 1.

Дані, наведені на рис. 1, показують значний вплив температурних режимів проведення процесу ДІВЕ-обробки водної дисперсії фосфоліпідів на розміри отриманих частинок. Так, при температурі 20 °С розмір диспергованих частинок був найбільшим у всіх досліджуваних зразках, що зумовлено особливістю поведінки ліпідного матеріалу при температурах, нижчих за температуру фазового перехо-



**Рис. 1.** Залежність середнього діаметру частинок, утворених при ДІВЕ-обробці з кутовою швидкістю 314 рад/с, від концентрації матеріалу: 1 – 20 °С; 2 – 42 °С; 3 – 60 °С; 4 – 80 °С



**Рис. 2.** Розподіл за розміром частинок дисперсної системи, утворених в результаті обробки за раціональними параметрами технологічних режимів методом ДІВЕ

ду. Підвищення температури гомогенізації до 42 °С призводить до переведення дисперсії фосфоліпідів з твердокристалічного в рідкокристалічний стан і до послаблення міжмолекулярних зв'язків, що в свою чергу призводить до зменшення середнього діаметра утворених частинок.

Подальше підвищення температури проведення процесу до 60 і 80 °С призводить до по-

дальшого послаблення зв'язків між молекулами ліпідного матеріалу, тому середній діаметр отриманих частинок зменшується і ефективність гомогенізації покращується. Незважаючи на це, використання високих температур при ДІВЕ-обробці є недоцільним, тому що існує певна технологічна складність підтримки високих температур під час проведення процесу при значних витратах енергії. Крім того, висока температура є небажаною для нетермостабільних речовин, наприклад вітамінів. Тому найбільш раціональним є диспергування матеріалу при температурі  $42 \pm 2$  °С.

Дослідження показали, що циклічність обробки приводить до посилення дії на оброблюваний матеріал за рахунок збільшення часу його перебування в зоні активного впливу, тому розмір частинок зменшується після кожного циклу. Найбільш істотне збільшення дисперсності системи відбувається протягом перших трьох циклів обробки, коли середній діаметр частинок зменшується приблизно в півтора рази і складає 445 нм. Обробка в результаті п'яти і більше проходжень матеріалу через робочі органи апарату не приводить до значного збільшення дисперсності системи.

На основі результатів комплексних досліджень були обрані раціональні параметри проведення технологічних процесів і розроблена промислова енергоефективна технологія виробництва стабільних при зберіганні ліпідних наноструктур для застосування у харчовій промисловості. Результати досліджень розподілу частинок за розміром при обраних раціональних параметрах технологічних режимів ДІВЕ-обробки наведені на рис. 2.

Аналіз отриманих результатів показав, що 80 % частинок мають розмір від 215 до 850 нм і відносяться до великих одношарових везикул. Внутрішній об'єм захвату утворених везикул становить 1,75 мг/г ліпідів, середній діаметр частинок – 440 нм.

Комплекс проведених досліджень теплома-

замкнених стабільних при зберіганні наноструктур дали змогу запропонувати новий напрямок у технології виробництва спеціального дієтичного харчування – виробництво функціональних продуктів харчування з використанням ліпідних наноструктур. Їх унікальні медико-біологічні властивості дозволяють створити цілий асортимент сучасних вискоєфективних функціональних харчових продуктів: для дитячого харчування, харчування вагітних жінок та людей похилого віку, для спеціального дієтичного харчування при різноманітних захворюваннях.

Лікувальне харчування є важливим фактором комплексного лікування хворих різного профілю. Особливо гостро проблема харчування стоїть для хворих в критичних станах, в перед- і післяопераційних періодах, при опіках, розладах свідомості, при пошкодженнях щелепно-лицьової області та ін. Сучасні засоби нутритивної підтримки дозволяють забезпечити ефективну корекцію енергетичних і пластичних потреб організму при порушеннях харчового статусу хворих у критичному стані. Як правило, до їх складу входять гідролізати білків різного ступеню гідролізу. Інститут технічної теплофізики НАН України створив промислову технологію виробництва гідролізованих білків – «білки гідролізовані сухі» з ліпідними наноструктурами згідно з ТУ У 15.8-05417118-041:2011 для спеціального та лікувально-профілактичного харчування людей з підвищеною білковою потребою. Білкові гідролізати, отримані методом ферментативного гідролізу, представляють собою суміш фізіологічно активних пептидів та вільних амінокислот, наближену за складом до «ідеального білка», і містять до 70 % фізіологічно активних пептидів та вільних амінокислот з молекулярною масою до 6 кДа, що легко засвоюються.

Технологія виробництва передбачає отримання як рідкої, так і сухої форми препаратів за допомогою використання сушіння методом розпилювання [10]. У порівнянні з існуючими

технологіями економічний ефект досягається за рахунок зниження питомих витрат електроенергії на одиницю продукції при ДІВЕ-обробці щонайменше в 5 разів. Використання методу розпилювання для сушіння функціональних матеріалів з ліпідними наноструктурами порівняно з сублімаційним сушінням, яке традиційно використовується для таких матеріалів, призводить до зниження питомих витрат електроенергії на одиницю продукції в 3–10 разів при збереженні високої якості сухого продукту. Вартість нового функціонального продукту з ліпідними наноструктурами при випуску з підприємства становить 450 грн., що в 2–5 разів нижча за вартість імпортованих аналогів.

Ефективність застосування сухого високобілкового продукту на основі гідролізованих білків з ліпідними наноструктурами підтверджена клінічними дослідженнями, проведеними в Київському дитячому гастроентерологічному центрі при ДКЛ №9 Подільського р-ну м. Києва і Військовому госпіталі в/ч А 2923. У результаті досліджень виявлено покращення результатів загального аналізу крові: нормалізація кількості еритроцитів; зменшення кількості лейкоцитів (на 8 %) і моноцитів (на 15 %); зниження рівня швидкості осідання еритроцитів (СОЕ) – на 10 %. Також виявлено покращення динаміки біохімічних показників крові: підвищення рівня загального білка на 8–9 % за рахунок збільшення альбумінів крові і нормалізації їх рівня; зменшення кількості сечовини – на 11 %; трансаміназ (АЛТ, АСТ) – на 15–22 %.

## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано доцільність використання принципу ДІВЕ для спрямованого управління процесом при утворенні ліпідних наноструктур.
2. Встановлено зниження енерговитрат і підвищення продуктивності процесів за рахунок методу ДІВЕ.

3. Обрано раціональні режими проведення процесів для одержання ліпідних везикул із заданими властивостями для застосування в харчовій промисловості.

4. Розроблено технологію виробництва функціонального харчового продукту на основі гідролізованого білка з ліпідними наноструктурами.

5. Доведено значний науково-технічний, економічний і соціальний ефект від застосування нового виду харчування спеціального дієтичного призначення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Branche C.M. *Approaches to Safe Nanotechnology: managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials* // Washington: National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Publication, 2009. — 88 p.
2. Балабанов В. Нанотехнологии. Наука будущего. — К.: Эксмо, 2009. — 256 с.
3. Елисеєв А.А. Функциональные наноматериалы. — М.: Физматлит, 2010. — 456 с.
4. Геннис Р. Биомембраны. Молекулярная структура и функции: пер. с англ. / Р. Геннис. — М.: Мир, 1997. — 597 с.
5. Долинский А.А. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий. — К.: Наук. думка, 2008. — 382 с.
6. Долинский А.А., Басок Б.И., Гулый И.С., Накорчевский А.И., Шурчкова Ю.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях. — К.: Наук. думка, 1996. — 208 с.
7. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТГТУ. — 2008. — Т. 14, № 4. — С. 861—869.
8. Yegin B., Lamprecht A. Lipid nanocapsule size analysis by hydrodynamic chromatography and photon correlation spectroscopy // *Intern. J. of Pharmaceutics*, 2006. — No 320. — P. 165—170.
9. Henk G. Merkus. *Particle Size Measurements. Fundamentals, Practice, Quality* // Springer, 2009. — 533 p.
10. Шаркова Н.А., Жукотский Э.К., Декуша А.В., Иванов С.А. Особенности производства гидролизованых белковых продуктов // *Промышленная тепло-техника*. — 2013. — Т. 35, № 7. — С. 187—190.

## REFERENCES

1. Branche C. M. *Approaches to Safe Nanotechnology: managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials*. Washington: National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Publication, 2009.
2. Balabanov B. *Nanotechnology. The future of science*. Kyiv: Eksmo, 2009 [in Russian].
3. Eliseev A.A. *Functional Nanomaterials*. Moskva: FIZMATLIT, 2010 [in Russian].
4. Gennis R. *Biomembranes. Molecular structure and function*: Per. from English. R. Gennis. Moskva: Mir, 1997 [in Russian].
5. Dolinskiy A.A., Ivanitskii G.K. *Heat and mass transfer and hydrodynamics in the vapor-liquid dispresnyh environments*. Kyiv: Nauk. Dumka, 2008 [in Russian].
6. Dolinsky A.A., Basok B.I., Guly I.S., Nakorchevsky A.I., Shurchkova Y.A. *Discrete pulse input of energy in teplotekhnologiyah*. Kyiv: Nauk. Dumka, 1996 [in Russian].
7. Promtov M.A. Prospects of cavitation technologies for intensification of chemical-engineering processes. *Herald TSTU*. 2008, 14(4): 861—869 [in Russian].
8. Yegin B., Lamprecht A. Lipid nanocapsule size analysis by hydrodynamic chromatography and photon correlation spectroscopy. *Intern. J. of Pharmaceutics*, 2006, No 320: 165—170.
9. Henk G. Merkus. *Particle Size Measurements. Fundamentals, Practice, Quality*. Springer, 2009.
10. Sharkova N.A., Zhukotskii E.K., Dekusha A.V., Ivanov S.A. Features of production of hydrolyzed protein products. *Industrial teplotehnika*. 2013, 35(7): 187—190 [in Russian].

*L.I. Avdieieva*

Institute of Engineering Thermophysics,  
the NAS of Ukraine,  
2a, Zhelyabova Str., Kyiv, 03680, Ukraine,  
tel. +38 (044) 453-28-44

IMPLEMENTATION  
OF THE PRINCIPLE OF DISCRETE-PULSE  
ENERGY INPUT TO CREATION  
OF NANOTECHNOLOGIES  
FOR FOOD INDUSTRY

The expediency of using the principle of discrete-pulse energy input in directional control of lipid nanostructures' formation and industrial production of functional materials with them in order to reduce energy consumption and increase process productivity is grounded. The example of using lipid nanostructures for improving a new type of food for special dietary purpose is presented.

*Keywords:* lipid nanostructures, discrete-pulse energy input, disperse systems, products of special dietary purpose.

*Л.Ю. Авдеева*

Институт технической теплофизики НАН Украины,  
ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина,  
тел. +38 (044) 453-28-44

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА  
ДИСКРЕТНО-ИМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕНИЯ  
ЭНЕРГИИ ПРИ СОЗДАНИИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ  
ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Обоснована целесообразность использования принципа дискретно-импульсного введения энергии для направленного управления процессом образования липидных наноструктур и промышленного производства функциональных материалов с ними для снижения энергозатрат и повышения производительности процессов. Приведен пример использования липидных наноструктур для повышения эффективности нового вида питания специального диетического назначения

*Ключевые слова:* липидные наноструктуры, дискретно-импульсный ввод энергии, дисперсные системы, продукты специального диетического назначения.

Стаття надійшла до редакції 04.04.16