

К. О. ЛЕБЕДЄВА, Д. В. МАТЮХОВ, Г. М. ЧЕРКАШИНА, І. А. ТЕРЕЩЕНКО, Є. І. ЛИТВИНЕНКО

СУЧАСНІ ТРЕНДИ ВИКОРИСТАННЯ БІОЛОГІЧНО-АКТИВНИХ ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИХ ПОЛІСАХАРИДІВ У ХАРЧОВІЙ ГАЛУЗІ, КОСМЕТОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

В статті розглянуті сучасні тренди використання біологічно-активних гелеутворюючих полісахаридів у харчовій галузі, косметології та медицині. Показано, що полісахариди та їхні похідні природного походження набули останнім часом важливого значення для технологій, пов'язаних з піклуванням про здоров'я людини. Широкий спектр можливостей і прикладів застосування деяких з цих речовин обумовлений їхньою здатністю утворювати стабільні просторові структури за участю води і внаслідок цього підвищувати в'язкість, стабілізувати дисперсії, утворювати гелі. Стан системи в кожному випадку керується як природою самих полісахаридів, так і зовнішніми факторами: дією «зшиваючих агентів», температурою, рН-показником середовища. Одним з основних джерел полісахаридів з означеними властивостями є мікроводорості (Regnum Protista), з яких отримують агар, альгінат, каррагінан. Важливу роль відіграють продукти рослинного походження: пектин та різноманітні гуми (або камеді): гуарова, трагакантова, камедь рожкового дерева, гуміарабік. Не менш важливою характеристикою цих полісахаридів є біосумісність із організмом людини. В технологіях, що базуються на швидкому, надійному та керованому процесі гелеутворення в якості головного полісахариду часто виступає альгінат, який формує міцні гелі за рахунок утворення зв'язків між блоками гулурунової кислоти та іонами кальцію. Вельми різноманітне застосування гелеутворюючих полісахаридів в різних галузях базується на одних і тих самих властивостях і ефектах із урахуванням можливостей техніки внутрішнього чи зовнішнього гелеутворення і в першу чергу визначається типовими для сфери застосування задачами. Ефекти від внутрішнього гелеутворення застосовують для керування реологічними властивостями, об'ємною текстурою таких харчових продуктів як йогурти, соуси, аналоги м'ясних страв, і зрештою для досягнення потрібних органолептичних властивостей, а також – для підвищення фізичної, хімічної та мікробіологічної стабільності продукту. Пористі гелі дозволяють створювати харчові продукти низької щільності і як наслідок – знижувати калорійність раціону. Доведено, що альгінат та інші полісахариди також мають великий потенціал для створення засобів піклування про шкіру та біоматеріалів, які сприяють регенерації тканин, в тому числі із залученням технологій 3D-друку.

Ключеві слова: біологічно-активні, гідрогелі, полісахариди, харчова галузь, косметологія, медицина.

К. О. LEBEDIEVA, D. V. MATUKHOV, G. M. CHERKASHINA, I. A. TERESHCHENKO, E. Ye. LITVYNENKO

CURRENT TRENDS IN THE USE OF BIOLOGICALLY ACTIVE GEL-FORMING POLYSACCHARIDES IN THE FOOD INDUSTRY, COSMETOLOGY AND MEDICINE

The article reviews current trends in the use of biologically active gel-forming polysaccharides in the food industry, cosmetology and medicine. It is shown that polysaccharides and their derivatives of natural origin have recently acquired important importance for technologies related to human health care. A wide range of possibilities and examples of the application of some of these substances is due to their ability to form stable spatial structures with the participation of water and, as a result, increase viscosity, stabilize dispersions, and form gels. The state of the system in each case is governed by both the nature of the polysaccharides themselves and external factors: the action of "crosslinking agents", temperature, and pH of the environment. One of the main sources of polysaccharides with the above properties is microalgae (Regnum Protista), from which agar, alginate, and carrageenan are obtained. An important role is played by products of plant origin: pectin and various gums (or gums): guar, tragacanth, locust bean gum, gum arabic. An equally important characteristic of these polysaccharides is their biocompatibility with the human body. In technologies based on a fast, reliable and controlled gelation process, alginate is often the main polysaccharide, which forms strong gels by forming bonds between guluronic acid blocks and calcium ions. The very diverse application of gel-forming polysaccharides in different industries is based on the same properties and effects, taking into account the possibilities of the internal or external gelation technique and is primarily determined by the tasks typical for the field of application. The effects of internal gelation are used to control the rheological properties, bulk texture of food products such as yogurts, sauces, meat analogues, and ultimately to achieve the desired organoleptic properties, as well as to increase the physical, chemical and microbiological stability of the product. Porous gels allow the creation of low-density food products and, as a result, reduce the calorie content of the diet. It has been proven that alginate and other polysaccharides also have great potential for the creation of skin care products and biomaterials that promote tissue regeneration, including with the involvement of 3D printing technologies.

Key words: biologically active, hydrogels, polysaccharides, food industry, cosmetology, medicine.

Вступ. Гелі на основі полісахаридів знаходять широке застосування в різних галузях промисловості завдяки їх унікальним фізико-хімічним властивостям, таким як висока гідрофільність, біосумісність, нетоксичність та здатність до контрольованого вивільнення активних речовин. Їх використання охоплює харчову, косметичну, фармацевтичну, біомедичну та екологічну сфери, що зумовлено можливістю модифікації структури для отримання необхідних функціональних характеристик.

У харчовій промисловості гелі застосовуються для стабілізації емульсій, покращення текстури продуктів та зменшення вмісту жирів, сприяють підвищенню споживання рослинної їжі та зниженню частки твердих жирів тваринного походження.

У косметичній та фармацевтичній галузях гелі відіграють важливу роль у формуванні стабільних емульсій, інкапсуляції біоактивних компонентів та покращенні сенсорних характеристик продуктів. Емульсії Пікерінга [1], стабілізовані наногелями забезпечують високу стабільність і здатність утримувати воду, що є важливим для розробки сучасних косметичних та дерматологічних засобів.

У нутрицевтиці гелі активно застосовуються для інкапсуляції пробіотичних мікроорганізмів і біоактивних сполук, що підвищує їхню біодоступність, термостабільність та контрольоване вивільнення. Гелі також знаходять застосування у біомедичних технологіях, включаючи тканинну інженерію, створення біосумісних імплантатів та

систем доставки лікарських засобів. У сфері збереження харчових продуктів гелеві покриття та їстівні плівки відіграють ключову роль у подовженні терміну зберігання та покращенні якості продукції, що робить їх перспективними для застосування в харчовій упаковці та кулінарії.

Екологічні технології також активно використовують гелі для очищення промислових стічних вод. Імобілізація мікрободоростей у альгінатних матрицях дозволяє ефективно видаляти органічні забруднення зі стічних вод м'ясопереробної промисловості, сприяючи біологічній ремедіації та зменшенню хімічного споживання кисню.

Мета статті – дослідження сучасних трендів використання біологічно-активних гелеутворюючих полісахаридів в харчовій, медичній та косметологічній галузях.

Матеріали та методи дослідження.

Матеріалами дослідження виступали сучасна наукова та науково-промислова література з питань застосування гелеутворюючих полісахаридів у харчовій галузі, косметології та медицині. Методами дослідження виступали узагальнення, систематизація та аналіз.

Результати та їх обговорення. Альгінат завдяки своїм біологічним і технічним характеристикам [2] часто використовується в якості базового компонента для гелів, але так само часто він виконує цю функцію разом із іншими речовинами вуглеводної природи для оптимізації властивостей композитів. Хітозан, агар, карагенан [3], ксантан, гелланова, персидська та трагакантова камеді, пектин [4], крохмаль [5], карбоксиметилпахімаран і карбоксиметилцелюлоза [6] застосовуються для створення гідрогелів, покриттів, стабілізації емульсій та інкапсуляції речовин і мікроорганізмів. Вони підвищують механічну міцність, стабільність, поліпшують текстуру та гелеутворюючі властивості продуктів, а також сприяють контрольованому вивільненню активних речовин. Хітозан і ксантан можуть використовуватись в інкапсуляції пробіотиків, карагенан – у виробництві молочних гелів. Пектин впливає на стабільність емульсій та кишкову ферментацію.

Інкапсуляція і імобілізація. Однією з найважливіших переваг контрольованого гелеутворення є можливість отримання капсул (капсуляція/інкапсуляція) [7]. Цей прийом застосовується з метою захистити активні інгредієнти від впливу зовнішніх факторів, таких як світло, кисень, волога, кислотність, дія ензимів чи субстратів тощо. Капсули можуть бути застосовані для поступового вивільнення активних інгредієнтів, що дозволяє забезпечити керовану ефективність процесу протягом тривалого часу. Те саме можна назвати в залежності від технологічного контексту імобілізацією активних речовин з уточненням того, чи мається на увазі фіксація молекул чи часток активного компонента або мікроорганізмів у самому гелі чи за стінкою; а також – чи являє собою капсула окреме

тіло, або комірку цього тіла; якого вона розміру тощо. Прикладами можуть бути інкапсуляція білків [8] в альгінатних мікрогелях, пробіотиків у харчових продуктах [9], ефірних олій [10], антиоксидантів [11], бактерицидних компонентів, ензимів [12], наночастинок [7]. Деякі з результатів досліджень інкапсуляції активних речовин наведено нижче:

Імобілізація ензимів. Захист капсулами на основі альгінату покращує термічну стабільність глюкозоксидози у 2,8-4,3 раза при 85°C. Фермент зберігав 80% активності після 4 тижнів при 4°C, при цьому 70% ферменту вивільнялося у шлунково-кишковому середовищі.

Протеаза, з *Aspergillus oryzae* [12], інкапсульована з використанням 2,0% альгінату та 0,2% хітозану, забезпечувала найвищий рівень ефективності інкапсуляції (ЕЕ) 77,2%. Збереження активності інкапсульованої протеази та термін придатності інкапсульованого ферменту становили 75,8 % та 27,2 тижнів відповідно після зберігання при 4 °C протягом 10 тижнів.

Ліпаза з *Thermomyces lanuginosus*, інкапсульована з використанням 2,0% альгінату та 0,4% ксантанової камеді, забезпечила найвищий рівень ЕЕ - 43,9%. Збереження активності інкапсульованої ліпази та період напіврозпаду становили 77,9 % та 27,8 тижнів відповідно після зберігання при 4 °C протягом 10 тижнів.

Імобілізація нарингінази підвищувала її стабільність і активність, дозволяючи ефективний гідроліз нарингіну, зменшуючи гіркоту соків та покращуючи її застосування у фармацевтичних продуктах.

Інкапсуляція пробіотиків у сирі [13] з використанням альгінат-хітозанових мікрочастинок із додаванням гелю алое вера підвищила виживаність *Lactobacillus fermentum*, *L. rhamnosus*, *L. plantarum* на 8–10%. Також покращилася антиоксидантна активність (на 20–30%). Інгібування харчових патогенів відбувалося вдвічі ефективніше, ніж для контрольних зразків, при чому сенсорні властивості сиру не змінювалися.

Інкапсуляція пробіотиків у фруктових соках з використанням гідрогелю (альгінат-персидська камедь-пробіотики (фруктоолігосахариди, інулін)) забезпечило ефективність інкапсуляції $\geq 98,4\%$ та збереження $\geq 61\%$ життєздатних клітин у змодельованих умовах травлення. Пробіотик *Lactococcus lactis* залишався стабільним протягом 6 тижнів при 4 °C.

Імобілізація поліфенолів. Імобілізація поліфенолів чаю [14] в альгінатних плівках покращує функціональність активних їстівних плівок. Міцність на розрив, деформація розриву та проникність водяної пари плівок збільшуються зі збільшенням кількості поліфенолів.

Інкапсуляція екстракту какао [15] шляхом емульгування/внутрішнього гелеутворення в альгінатних мікросферах з використанням цитратних та карбонатних солей як джерел кальцію для

зшивання дає наступні результати: Гелеутворення було визначено з мінімальним вмістом $1,8 \times 10^{-4}$ моль альгілату $\text{Ca}^{2+}/\text{г}$. Мікросфери, виготовлені з цитрату, мали однорідну поверхню, а карбонатні – шорстку. Найбільш стабільними виявилися емульсії, приготовані за допомогою полігліцерол-полірицинолеату. Коефіцієнт усадки гелеутворення становив 0,8, зберігаючи форму і розподіл за розмірами. Інкапсуляція екстракту какао в мікросфери досягала близько 60% утримання.

3D-друк харчових продуктів [16], [17], [18], [19], [20], [21] та біодрук є перспективними методами для створення персоналізованих продуктів з унікальним дизайном і складом. Використання крохмальних композитних гелів та альгілату натрію дозволяє створювати тривимірні структури з високою точністю та стабільністю.

Біочорнила, що використовуються для 3D-друку, включають різні види альгілатів з різним співвідношенням β -D-маннуранової кислоти до α -L-гулуранової кислоти. Важливими параметрами для успішного друку є реологічні властивості, тиксотропність, розподіл води та друкарські характеристики.

Дослідження впливу попереднього гелеутворення на 3D-друк композитного гелю з горохових протеїнів та альгілату натрію показало, що регулювання часу перед желуванням може покращити реологічні властивості та здатність зв'язувати воду. Зокрема, композитний гель з попереднім гелеутворенням протягом 22 хвилин продемонстрував оптимальну в'язкість та відновлення, що сприяло екструзії та збереженню форми під час процесу 3D-друку. Крім того, композитний гель продемонстрував гладку якість поверхні у своїх структурах, надрукованих на 3D-принтері, а також виняткову самонесучу здатність.

Альгілат-желатинові композитні гелі також використовуються в харчових і біомедичних цілях, зокрема у біочорнилах для 3D-біодруку. Співвідношення змішування та температура впливають на фазову поведінку та структуроутворення альгілат-желатинових композитних гелів. При температурі 40 °C рідкий желатин затримував процес гелеутворення, буферизуючи зниження pH, тоді як при температурі 21 °C гелеподібний желатин призводив до швидшого гелеутворення.

Застосування в медицині. Гелеутворюючі полісахариди широко використовуються у дослідженнях травлення [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28] а також для вирішення проблем, пов'язаних із захворюваннями ШКТ і розладами харчової поведінки. Відомі дослідження впливу харчових гелів на ферментацію кишковою мікробіотою, всмоктування речовин у шлунково-кишковому тракті. Вони застосовуються для контролю кишкового ліполізу, регуляції апетиту, інгібування панкреатичної ліпази, регуляції глікемії та лікування неалкогольної жирової хвороби печінки.

Емульсійно-альгілатні кульки, призначені для контролю кишкового ліполізу показують, що ліполіз можна контролювати за допомогою варіації розміру кульок і сітки, що призводить до широкого діапазону профілів вивільнення.

Інкапсуляція ліпідів у гідрогелеві кульки захищає їх від проксимального всмоктування, що сприяє сигналам про насичення в дистальному відділі тонкої кишки.

Інкапсуляція ліпідів альгілатними кульками знижує біодоступність, затримуючи доступність ліпідів для перетравлення до вільних жирних кислот, необхідних для стимуляції рецепторів дванадцятипалої кишки та вивільнення холецистокініну (ХСК).

Альгілати пригнічують травні ферменти *in vitro*, що може мати потенціал у лікуванні ожиріння. Альгілати здатні впливати на відчуття насичення та регуляцію споживання їжі, затримуючи спорожнення шлунка та ослаблюючи постпрандіальні реакції на рівень глюкози. Альгілатний напій послаблює постпрандіальну глікемію у чоловіків, знижуючи пікову глікемію на 14%.

Альгілат натрію використовується в офтальмології для створення очних крапель [29], гелів та інтраокулярних імплантатів, які забезпечують тривале зволоження, контрольоване вивільнення ліків та зниження внутрішньоочного тиску при глаукомі. Дослідження показали, що гелі на основі альгілату натрію сприяють регенерації рогівки та покращують комфорт пацієнтів із сухістю очей.

Створення їстівних плівок. Існує тренд застосування альгілату для створення захисних їстівних плівок [30] з метою збереження та консервування їжі та продовження терміну зберігання продуктів.

Дослідження показали, що використання їстівних плівок та покриттів на основі альгілату натрію може значно покращити якість збереження та консервування різних продуктів. Композитні плівки альгілату натрію, функціоналізовані екстрактом лущиння фіолетової цибулі, мають антиоксидантні властивості та підвищену міцність на розрив. Їстівні композитні плівки на основі альгілату натрію та гелю алое вера з ефірною олією гвоздики продовжують термін зберігання чорниці [10], а покриття на основі альгілатів з лимонною та аскорбіною кислотою зберігають якість свіжозрізаних яблук. Покриття з альгілату з ефірною олією також підвищують термін зберігання філе пангасіуса при охолодженню зберіганні.

Гелі і плівки на їх основі грають важливу роль для самого процесу приготування їжі. Використання плівок альгілату натрію з додаванням солі або приготованих на курячому бульйоні може значно покращити якість приготування їжі в мікрохвильовій печі. Ці плівки забезпечують більш рівномірний нагрів, коротший час приготування та підвищену хрусткість продуктів.

Відоме використання плівки альгінатного гелю з високою концентрацією солі між субстратом і тістом для уникнення проблеми відсутності хрусткості під час приготування або розігрівання продуктів у мікрохвильовій печі.

Цікаві фізико-хімічні властивості термічно оброблених плівок альгінату кальцію, приготовлених на курячому бульйоні є наслідком нагрівання, що розвивало темно-бордовий колір продукту і збільшувало крихкість цих плівок.

Сферифікація як інструмент кулінарії.

Приготування аналогів ікри та сферифікація в кулінарії можуть бути оптимізовані за допомогою використання альгінату натрію та кальцію.

При оптимізації обробки аналогів ікри білуги отримали сферичність аналогів ікри відповідну до натурального аналогу (понад 94%). Концентрація CaCl_2 впливала на всі залежні змінні великою мірою.

Дослідження впливу термічної, сольової та гідроколоїдної обробки на аналоги ікри *Cypselurus ago*, приготовані з використанням гелю альгінату кальцію показало, що міцність на розрив шляхом затвердіння 2%-им хлоридом натрію була дещо збільшена по відношенню до оригіналу.

Дослідження текстури та переваг ікри «Mentsuyu» [31], приготовленої з альгінату натрію та лактату кальцію, показало, що сила розриву ікри збільшується з часом після приготування, тривалим впливом лактату кальцію та низькою концентрацією NaCl . Візуальний вигляд ікри «Mentsuyu» був новим і високоефективним у порівнянні з рідкою формою Mentsuyu, що робить її корисною для розробки нових страв японської кухні.

Модифікація текстури та структуризатори їжі. У дослідженні потенціалу сумішей рибного желатину та альгінату натрію як гелеутворювачів та системи доставки для кокосової олії [32] першого віджиму всі склади пудингу продемонстрували сильну еластичну характеристику. Оптимізована формула складалася з 10,68% олії, 3,41% рибного желатину, 0,59% альгінату натрію та 68,33% води.

Застосування альгінату робить можливим виробництво нових реструктурованих продуктів, як персикове пюре без додаткового джерела кальцію чи цукру.

Стабілізація емульсій Пікерінга. Емульсії Пікерінга [1], [27], [33], — це тип емульсій, стабілізованих твердими частинками замість поверхнево-активних речовин. Особливістю емульсій Пікерінга є те, що тверді частинки адсорбуються на межі розділу фаз, утворюючи стабільний шар, який запобігає коалесценції крапель.

Емульсійні системи Пікерінга можуть бути стабілізовані наногелями білка качиноного яйця та альгінатом натрію. Розмір крапель емульсії демонстрував зменшення зі збільшенням концентрації альгінату натрію.

Дослідження потрібних композитних гелів, приготованих методом контролю рН шляхом додавання нерозчинних харчових волокон із побічних

продуктів пагонів бамбука до бінарних гелів ізоляту горохового білка-альгінату натрію продемонстрували високу міцність цих гелів та здатність утримувати воду.

Дослідження частинок комплексу зеїн-пропіленгліколю альгінат-рамноліпідів для стабілізації емульсій Пікерінга з високим вмістом внутрішньої фази (HIPE) показали, що складні частинки утворюють щільно упакований шар навколо крапель олії та тривимірну мережу в безперервній фазі, що підкреслює потенціал складних частинок діяти як ефективні стабілізатори HIPE.

Утворення і стабілізація складних емульсій.

Для доставки пробіотиків, захисту гідрофільних сполук від агресивних середовищ та створення інтелектуальних упаковок харчових продуктів можуть бути використані складні емульсії [34]. Складні емульсії — це багатофазні системи, в яких одна емульсія (наприклад, вода в олії) інкапсульована в іншу емульсію (наприклад, олія у воді). Вони викликають цікавість у контексті гелеутворюючих сахаридів, оскільки дозволяють створювати стабільні системи для інкапсуляції біоактивних сполук, покращити їх життєздатність та контрольоване вивільнення.

Життєздатність вільних клітин *Lactobacillus plantarum*, у подвійній емульсії (W1/O/W2) в альгінатних кульках оцінювали шляхом впливу на них термічної обробки та моделювання умов шлунково-кишкового тракту. Після кишкової стадії травлення виживаність вільних бактерій збільшувалася з 38% до 84% для та емульсійних гранул.

У дослідженні одноетапної процедури інтеграції крапель емульсії «вода в олії» (W/O) безпосередньо в мікрогелі Са-альгінату подвійну емульсію «вода в олії у воді» (W1/O/W2) готували з використанням високошвидкісного гомогенізатора з подальшим використанням мікрофлюїдизатора. Середні діаметри крапель емульсії W1/O/W2 та отриманих мікрогелів знаходилися в межах 27.8–65.4 мкм та 160–420 мкм відповідно. Вивільнення гідрофільних сполук з мікрогелів значно зменшувалося при інкапсуляції в краплі емульсії W/O.

Система казеїнат натрію (NaCas)- κ -Карагенан (κCar) була приготована як зовнішній емульгатор за допомогою реакції Майяра. Емульгування відбувалося в поєднанні з гідрогелевими оболонками системи: альгінат натрію-карбоксиметилхітозан для інкапсуляції внутрішньої водної фази *L. rhamnosus* з метою кишкової цілеспрямованої доставки. Система також продемонструвала чудову реакцію на рівень рН і хорошу термічну стабільність. Моделювання травного процесу *in vitro* показало контрольоване вивільнення пробіотиків через набухання капсул із рівнем виживаності $90,69 \pm 0,04\%$.

Оптимізація властивостей високожирних продуктів. Важливою є група задач, пов'язана з оптимізацією вживання людиною високожирних продуктів. Потрібно просувати можливості

збільшення споживання рослинної їжі, зменшення споживання твердих жирів та жирів тваринного походження [35]. Прагнути досягти у харчових рецептурах на основі емульсій низького вмісту жиру, при цьому їхню текстуру бажано зберегти подібною до текстури повножирних аналогів. Необхідно знайти способи зниження рівня насичених і трансжирних кислот в оброблених харчових продуктах і запропонувати виробництво відповідних замінників жирів для продуктів з високим вмістом жиру, які забезпечують всі або деякі функціональні властивості жирів і мають користь для здоров'я.

Системи білкових мікрогелів на основі альгілату мають потенціал для приготування харчових рецептур на основі емульсій з низьким вмістом жиру, текстуру яких можна порівняти з текстурою повножирових аналогів. Збільшення вмісту білкового мікрогелю змушує 30% олійні емульсії демонструвати подібну реологічну поведінку до емульсій, що містять 50% олії.

Дослідження, спрямоване на зниження рівня насичених і трансжирних кислот в оброблених харчових продуктах шляхом виробництва замінників жирів на основі інуліну, перської камеді та альгілату демонструє, що оптимізовані значення інуліну, перської камеді та альгілату забезпечують максимальну термічну стабільність, найнижчий відсоток міграції олії та бажані текстурні властивості.

Використання технологічних вдосконалень, таких як мікрофлюїдний барботажний пристрій для приготування мікропористих гелів кальцієвого альгілату може покращити відчуття та текстуру їжі та напоїв у роті, а також знизити загальний вміст жиру в продуктах на основі емульсій. Гомогенні зразки гелю мали щільність 365 кг/м³ та високий вміст газу, що підтверджено вимірюваннями відбивної здатності ультразвуку.

Із переліченими вище задачами при модифікації високожирових продуктів добре можуть впоратися олеогелі, створення яких також можливо на основі полісахаридів.

Олеогелі [36], [37] – це їстівні гелі, що містять значну кількість рідких олій, утримуваних у тривимірній структурі. Вони можуть використовуватися як альтернатива твердим жирам у харчових продуктах, допомагаючи знижувати вміст насичених жирів без втрати бажаної текстури та органолептичних властивостей [38].

Капсули з олеогелевим ядром та ультратонкою оболонкою з альгілату кальцію, отримані методом мікрофлюїдних технологій мають високу однорідність (CV < 5%), стабільні в кислому середовищі (pH = 2.0) і швидко набухають при pH 6.8–7.4. Структура воскової кристалічної сітки в ядрі підвищує стабільність і забезпечує термочутливість.

Для кріогелів на основі альгілату як носія для формування олеогелів із різними рослинними оліями встановлено, що швидке заморожування в рідкому азоті забезпечує низьку щільність, високу пористість і здатність до поглинання олії. Олеогель із оливковою

олією мав найвищу здатність до утримання олії (82%) та оптимальні текстурні властивості.

Розроблено гелеві кульки на основі альгілатного гідрогелю та олеогелю з гліцерилмонопальмітату. Виявлено, що збільшення вмісту олеогелю знижує міцність гелю, але підвищує рівень заповнення олією.

Моделювання та вдосконалення м'ясних та рибних продуктів. Застосування альгілатних та композитних гелів для м'ясних, рибних продуктів та у їх рослинних аналогах [39] дозволяє покращити смак, текстуру, стабільність кольору та загальну якість продуктів, забезпечуючи кращі сенсорні характеристики та споживчі властивості.

Гелі на основі альгілату кальцію, що були розроблені для покращення вивільнення смаку в рослинних аналогах забезпечували вивільнення смакових компонентів на рівні 51% при нагріванні, тоді як у повітрі цей показник не перевищував 1%.

Для стабілізації кольору яловичини використовували комплекси альгілату натрію та хітозану, які містили ериторбат натрію. Вони значно покращували почервоніння та стійкість кольору стейків під час зберігання, а також демонстрували антиоксидантну активність.

Вплив структури та властивостей гелю міофібрилярного білка на якість курячої грудки виявився важливим фактором для текстурних характеристик. Утворений бар'єр знижував втрати вологи, а посилені міцність гелю та модуль пружності покращували загальну текстуру.

Вплив сумішей хлоридних солей на гелі м'язового білка блакитного путасу суттєво залежав від типу гелеутворювача. NaCl підвищував міцність на розрив у йота-карагенанових гелях, KCl збільшував адгезивність, особливо для йота-карагенану, тоді як CaCl₂ підвищував еластичність усіх типів гелів, але знижував їх когезію.

У виробництві рибних гелів важливу роль відіграють карагенани та альгілат натрію, що визначають реакцію білків на комбінований вплив тиску та температури. Гелеутворення при атмосферному тиску створювало твердіші та жовтіші гелі, тоді як високий тиск підвищував когезійність і ламкість, але знижував твердість.

Вплив кальцієвих солей на рослинні білково-полісахаридні гідрогелі, що містять картопляний білок [40] та альгілат натрію, показав, що різні солі впливають на текстурні характеристики по-різному. Гелі, отримані з CaHPO₄, були найбільш міцними, тоді як CaCO₃ спричиняв утворення бульбашок CO₂, що впливало на текстуру.

Висновки. Полісахариди та їхні похідні природного походження набули останнім часом важливого значення для технологій, пов'язаних з піклуванням про здоров'я людини. Широкий спектр можливостей і прикладів застосування деяких з цих речовин обумовлений їхньою здатністю утворювати стабільні просторові структури за участю води і внаслідок цього підвищувати в'язкість, стабілізувати дисперсії, утворювати гелі. Стан системи в кожному

випадку керується як природою самих полісахаридів, так і зовнішніми факторами: дією «зшиваючих агентів», температурою, рН-показником середовища. Одним з основних джерел полісахаридів з означеними властивостями є мікроводорості (Regnum Protista), з яких отримують агар, альгінат, каррагінан. Важливу роль відіграють продукти рослинного походження: пектин та різноманітні гуми (або камеді): гуарова, трагакантова, камедь рожкового дерева, гуміарабік. Не менш важливою характеристикою цих полісахаридів є біосумісність із організмом людини.

В технологіях, що базуються на швидкому, надійному та керованому процесі гелеутворення в якості головного полісахариду часто виступає альгінат, який формує міцні гелі за рахунок утворення зв'язків між блоками гулуринової кислоти та іонами кальцію. Вельми різноманітне застосування гелеутворюючих полісахаридів в різних галузях базується на одних і тих самих властивостях і ефектах із урахуванням можливостей техніки внутрішнього чи зовнішнього гелеутворення і в першу чергу визначається типовими для сфери застосування задачами. Ефекти від внутрішнього гелеутворення застосовують для керування реологічними властивостями, об'ємною текстурою таких харчових продуктів як йогурти, соуси, аналоги м'ясних страв, і зрештою для досягнення потрібних органолептичних властивостей, а також – для підвищення фізичної, хімічної та мікробіологічної стабільності продукту. Пористі гелі дозволяють створювати харчові продукти низької щільності і як наслідок – знижувати калорійність раціону.

Легкість утворення плівок через техніку зовнішнього гелеутворення також знаходить широке застосування у кулінарній творчості в межах напряму «молекулярної кухні». Плівки в процесі приготування їжі використовуються заради рівномірнішого перебігу процесу або створення скоринки. Альгінатні плівки на харчових продуктах протягом періоду зберігання запобігають механічному пошкодженню, висиханню та мікробіологічному псуванню.

Інкапсуляція молекул окремих речовин та цілих фаз – це гнучкий і потужний інструмент отримання цілої низки переваг і функціональних можливостей, що можуть проявлятися одночасно: захист речовин від окислення, дії шкідливої мікрофлори, ферментів, впливу кислотності середовища; можливість керування доставкою, контрольованим вивільненням активних речовин та мікрофлори в організмі. Олеогелі як продовження ідеї інкапсуляції фаз, отримані за допомогою альгінату, – це інноваційний продукт з рідких рослинних олій, що має напівтвердий стан за рахунок каркасної структури, для створення якої можна обійтись без насичених жирів.

Альгінат та інші полісахариди також мають великий потенціал для створення засобів піклування про шкіру та біоматеріалів, які сприяють регенерації тканин, в тому числі із залученням технологій 3D-друку.

Список літератури

- Chen Z., Cui B., Guo X. et al. Fabrication and characterization of Pickering emulsions stabilized by desalted duck egg white nanogels and sodium alginate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. Vol. 102, Issue 3. P. 949–956. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11427>.
- Dragnet K. I. Alginates. *Handbook of Hydrocolloids: Second Edition*. Elsevier Inc., 2009. P. 807–828. <https://doi.org/10.1533/9781845695873.807>.
- Alba K., Kontogiorgos V. Seaweed polysaccharides (agar, alginate carrageenan). *Encyclopedia of Food Chemistry*. Elsevier, 2018. P. 240–250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21587-4>.
- Urbanova M., Macku J., Kubova K. et al. Structure, dynamics, and functional properties of hybrid alginate-pectin gels dually crosslinked by Ca^{2+} and Zn^{2+} ions designed as a delivery device for self-emulsifying systems for lipophilic phytotherapeutics. *Food Hydrocolloids*. Vol. 150, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109693>.
- Wang K., Sui J., Gao W. et al. Effects of xanthan gum and sodium alginate on gelatinization and gels structure of debranched pea starch by pullulanase. *Food Hydrocolloids*. Vol. 130, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107733>.
- Guo Z., Ren J., Song C. Enhanced Thermal and Storage Stability of Glucose Oxidase via Encapsulation in Chitosan-Coated Alginate and Carboxymethyl Cellulose Gel Particles. *Foods*. Vol. 14, Issue 4. DOI:10.3390/foods14040664.
- Paques J. P. Alginate Nanospheres Prepared by Internal or External Gelation with Nanoparticles. *Microencapsulation and Microspheres for Food Applications*. Elsevier Science Ltd., 2015. P. 39–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800350-3.00004-2>.
- Zhang Z., Zhang R., Zou L. et al. Protein encapsulation in alginate hydrogel beads: Effect of pH on microgel stability, protein retention and protein release. *Food Hydrocolloids*. Vol. 58, 2016. P. 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.03.015>.
- Krunić T. Alginate as a carrier for probiotic immobilization: Extrusion and spray dry technique. *Properties and Applications of Alginate*. Nova Science Publishers, Inc., 2022. P. 131–150.
- Cui Z., Li Y., Feng X. et al. Development, RSM-Based Optimization, and Characterization of a Unique Edible Composite Film by Incorporating Clove Essential Oil Based on Sodium Alginate and Aloe vera Gel to Preserve the Quality of Blueberries. *Journal of Food Processing and Preservation*. Vol. 2023, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/3578799>.
- Arriola N. D. A., Chater P. I., Wilcox M. et al. Encapsulation of stevia rebaudiana Berton aqueous crude extracts by ionic gelation – Effects of alginate blends and gelling solutions on the polyphenolic profile. *Food Chemistry*. Vol. 275, 2019. P. 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.086>.
- Mong Thu T. T., Krasackoort W. Encapsulation of protease from *Aspergillus oryzae* and lipase from *Thermomyces lanuginosus* using alginate and different copolymer types. *Agriculture and Natural Resources*. Vol. 50, Issue 3. P. 155–161. DOI:10.1016/j.anres.2016.06.002.
- Ahmed S., Muhammad T., Zaidi A. Cottage cheese enriched with lactobacilli encapsulated in alginate–chitosan microparticles forestalls perishability and augments probiotic activity. *Journal of Food Processing and Preservation*. Vol. 45, Issue 6. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15473>.
- Biao Y., Yuxuan C., Qi T. et al. Enhanced performance and functionality of active edible films by incorporating tea polyphenols into thin calcium alginate hydrogels. *Food Hydrocolloids*. Vol. 97, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105197>.
- Lupo B., Maestro A., Porras M. et al. Preparation of alginate microspheres by emulsification/internal gelation to encapsulate cocoa polyphenols. *Food Hydrocolloids*. Vol. 38, 2014. P. 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.11.003>.
- Cui Y., Yang F., Wang C.-S. et al. 3D Printing windows and rheological properties for normal maize starch/sodium alginate composite gels. *Food Hydrocolloids*. Vol. 146, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109178>.
- Feng C., Zhang M., Bhandari B. et al. Improvement of 3D printing properties of rose-sodium alginate heterogeneous gel by adjusting rose material. *Journal of Food Process Engineering*. Vol. 44, Issue 1. DOI:10.1111/jfpe.13583.

18. TSAI C.-R., LIN Y.-K. Artificial steak: A 3D printable hydrogel composed of egg albumen, pea protein, gellan gum, sodium alginate and rice mill by-products. *Future Foods*. Vol. 5, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100121>.
19. Zhang Y.-X., Luan Q.-Y., Ma Y.-Z. et al. Effect of Pre-gelation on 3D Printing and in Vitro Release Properties of Pea Protein-sodium Alginate Composite Gel. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*. Vol. 32, Issue 4. P. 121–128. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.04.015.
20. Zhong Q., Chen Y., Zhang X. et al. Correlation between 3D printability and rheological properties of biopolymer fluid: A case study of alginate-based hydrogels. *Journal of Food Engineering*. Vol. 370, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.111970>.
21. Zhu S., Wang W., Stieger M. et al. Shear-induced structuring of phase-separated sodium caseinate - sodium alginate blends using extrusion-based 3D printing: Creation of anisotropic aligned micron-size fibrous structures and macroscale filament bundles. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. Vol. 81, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103146>.
22. Aguirre-Calvo T. R., Molino S., Perullini M. et al. Effect of in vitro digestion-fermentation of Ca(II)-alginate beads containing sugar and biopolymers over global antioxidant response and short chain fatty acids production. *Food Chemistry*. Vol. 333, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127483>.
23. Gao J., Liu C., Shi J. et al. The regulation of sodium alginate on the stability of ovalbumin-pectin complexes for VD3 encapsulation and in vitro simulated gastrointestinal digestion study. *Food Research International*. Vol. 140, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110011>.
24. Guo L., Goff H. D., Xu F. et al. The effect of sodium alginate on nutrient digestion and metabolic responses during both in vitro and in vivo digestion process. *Food Hydrocolloids*. Vol. 107, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105304>.
25. Hu M., Wu Y., Wang J. et al. Emulsions Stabilization and Lipid Digestion Profiles of Sodium Alginate Microgels: Effect of the Crosslink Density. *Food Biophysics*. Vol. 16, Issue 3. P. 346–354. <https://doi.org/10.1007/s11483-021-09673-z>.
26. Lin D., Kelly A. L., Miao S. Alginate-based emulsion micro-gel particles produced by an external/internal O/W/O emulsion-gelation method: Formation, suspension rheology, digestion, and application to gel-in-gel beads. *Food Hydrocolloids*. Vol. 120, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106926>.
27. Niu J., You T., Wang X. et al. Study on stability and in vitro digestion property of Lutein Pickering emulsions encapsulated with whey protein isolate /sodium alginate/tea polyphenols. *Journal of Food Measurement and Characterization*. Vol. 18, Issue 12. P. 9736–9751. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02906-y>.
28. Wang H., Zhang J., Han L. et al. Calcium ion regulation of sodium alginate in pure buckwheat noodles shown by in vitro simulated digestion. *Frontiers in Nutrition*. Vol. 9, 2023. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1105878>.
29. Karmakar S., Manna S., Kabiraj S. et al. Recent progress in alginate-based carriers for ocular targeting of therapeutics. *Food Hydrocolloids for Health*. Vol. 2, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2022.100071>.
30. Hadi A., Nawab A., Alam F. et al. Physical, mechanical, optical, barrier, and antioxidant properties of sodium alginate-aloe vera biocomposite film. *Journal of Food Processing and Preservation*. Vol. 45, Issue 5. DOI:10.1111/jfpp.15444.
31. Yuasa M., Tagawa Y., Tominaga M. The texture and preference of “mentsuyu (Japanese noodle soup base) caviar” prepared from sodium alginate and calcium lactate. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. Vol. 18, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100178>.
32. Fan H. Y., Ko B. Z., Siew C. K. et al. Evaluation of fish gelatin and sodium alginate blend as gelling agents for pudding containing virgin coconut oil. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*. Vol. 42, Issue 4. P. 1209–1217.
33. Dai L., Zhan X., Wei Y. et al. Composite zein - propylene glycol alginate particles prepared using solvent evaporation: Characterization and application as Pickering emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids*. Vol. 85, 2018. P. 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.07.013>.
34. Karakas C. Y., Yildirim R. M., Karadag A. Encapsulation of Lactobacillus plantarum ELB90 by electrospraying in a double emulsion (W1/O/W2) loaded alginate beads to improve the gastrointestinal survival and thermal stability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. Vol. 103, Issue 7. P. 3427–3436. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12494>.
35. Su C.-Y., Li D., Wang L.-J. et al. Development of corn starch-sodium alginate emulsion gels as animal fat substitute: Effect of oil concentration. *Food Hydrocolloids*. Vol. 157, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110439>.
36. Meseldzija S., Ruzic J., Spasojevic J. et al. Alginate cryogels as a template for the preparation of edible oleogels. *Foods*. Vol. 13, Issue 9. <https://doi.org/10.3390/foods13091297>.
37. Shi Y., Tang J., Yan W. et al. Novel pH- and thermal-responsive oleogel capsules: Featuring an oleogel core and ultrathin calcium-alginate shell. *Food Chemistry*. Vol. 454, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139663>.
38. Matveeva T., Mazaeva V., Papchenko V., Khareba V., Khareba O. Development of oleogels with a reduced content of saturated fatty acids. *Journal of Food Science and Technology*. 2022. Vol. 16(4). P. 31–39. <https://doi.org/10.15673/fst.v16i4.2549>.
39. Kang Y. K., Jeong E., Baek Y. et al. Development of emulsion-filled calcium alginate gels for thermoresponsive release of flavor in plant-based meat analogs. *Food Chemistry*. Vol. 461, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140885>.
40. Ryu J., Rosenfeld S. E., McClements D. J. Creation of plant-based meat analogs: Effects of calcium salt type on structure and texture of potato protein-alginate composite gels. *Food Hydrocolloids*. Vol. 156, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110312>.

Відомості про авторів / About the Authors

Лебедєва Катерина Олександрівна (Lebedieva Kateryna) – аспірантка кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: oazis.ruk@gmail.com

Матюхов Дмитро Володимирович (Matiukhov Dmytro) – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології жирів та продуктів бродіння, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4700-9064>; e-mail: dmytro.matiukhov@kphi.edu.ua

Черкашина Ганна Миколаївна (Cherkashina Ganna) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5239-6364>; e-mail: annikcherkashina@gmail.com

Терещенко Ілля Андрійович (Tereshchenko Illia) – студент кафедри технології жирів та продуктів бродіння, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4113-2526>; e-mail: illia.tereshchenko@ihti.kphi.edu.ua

Литвиненко Євгенія Ігорівна (Lytvynenko Yevheniia) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0691-2014>; e-mail: gutentagfater@gmail.com