

УДК 544.022.822:664.144

## KINETICS MODEL OF FORMATION OF ENCAPSULATED FOOD SYSTEMS ON THE BASE OF SODIUM ALGINATE

**Ye. Pyvovarov, O. Grinchenko**

*Kharkiv State University of Food Technology and Trade*

**S. Ivanov, V. Potapov**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Ionotropic gelation*

*Sodium alginate*

*Encapsulation*

*Kinetics of capsule formation*

*Extrusion forming of balls*

---

**ABSTRACT**

This paper discusses the kinetics modeling of encapsulation process during the extrusive food products formation in sodium alginate solution; provides theoretical and analytical justification for the production of ball-shaped foodstuff with a cavity conditioned upon the components extrusion into a sodium alginate solution; gives analytical determination and experimental confirmation of variation mechanisms of radius and mass of capsules; presents the calculation of optimal formation of the ball and the kinetics of the encapsulation process. The adequacy of the developed kinetics model has been experimentally proved. This model was used as the basis for determining the optimal process parameters for food systems encapsulation, as well as for determining the main features of industrial equipment used for the production of encapsulated products.

---

**Article history:**

Received 05.07.2013

Received in revised form  
09.09.2013

Accepted 15.10.2013

---

**Corresponding author:**

Ye. Pyvovarov

**E-mail:**

npnuht@ukr.net

---

## МОДЕЛЬ КІНЕТИКИ КАПСУЛОУТВОРЕННЯ ХАРЧОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ НАТРІЮ АЛЬГІНАТУ

**Є.П. Пивоваров, О.О. Гринченко**

*Харківський державний університет харчування і торгівлі*

**С.В. Іванов, В.О. Потапов**

*Національний університет харчових технологій*

*Метою роботи є моделювання кінетики процесу капсулоутворення за екструзійного формування харчових продуктів у розчині натрію альгінату; теоретичне й аналітичне обґрунтування виробництва харчових продуктів у формі кулі з порожниною за умови екструзії складових у розчин натрію альгінату; аналітичне визначення й експериментальне підтвердження закономірностей зміни радіуса та маси капсул, розрахунок оптимального часу формування кулі й кінетики технологічного процесу капсулоутворення. Розроблену модель кінетики капсулоутворення перевірено на адекватність шляхом постановки експериментів і покладено в основу визначення оптимальних параметрів технологічного процесу капсулювання харчових*

систем, а також визначення основних характеристик промислового устаткування для виробництва капсульованих продуктів.

**Ключові слова:** іонотропне гелеутворення, альгінат натрію, капсулювання, кінетика процесу утворення капсули, екструзійне формування кулі.

В останні роки спостерігається тенденція до збільшення попиту на нові види продукції, у тому числі структуровані, які є результатом впровадження у виробництво науково обґрунтованих високоефективних технологій [1]. Розробка та впровадження структурованої продукції дає змогу більш глибокої комплексної переробки сировини з одержанням кінцевої продукції з регульованими органолептичними, фізико-хімічними й структурно-механічними показниками якості, а розвиток наукових принципів її виробництва має суттєвий вплив на прогрес харчопереробної галузі [2, 3, 4].

Значний внесок у розробку наукових основ структуроутворення в харчових системах внесли такі вчені, як О.М. Несмеянов, С.В. Рогожин, В.Б. Толстогузов. Заслужують також на увагу дослідження вітчизняних і зарубіжних науковців [5—8].

Результатом системних наукових та прикладних досліджень і практичного впровадження є реалізація технології одержання альгінової кислоти та її солей, що визначила розвиток науково-практичного напрямку використання цієї речовини в технологічних процесах харчових виробництв, пов'язаних з функціональною властивістю фазових перетворень «розчин натрію альгінату ( $\text{Na-Alg}$ )  $\rightarrow$  гель кальцію альгінату ( $\text{Ca-Alg}_2$ )» [9—11]. Особливий інтерес викликає, одночасно з фазовим переходом, можливість надання продукту необхідної форми і текстури, наприклад, форми капсули, що є основою розробки технології нових харчових продуктів.

Одержання кулеподібних форм з різнополярних рідин у технології харчових продуктів, як правило, зводиться до екструзії рецептурної суміші з гідрофільними властивостями («вода») до гідрофобного середовища («олія») [12, 13].

У технології лікарських препаратів і дієтичних добавок використовується принцип капсулювання гідрофобного вмісту в желатинову оболонку. Капсулоутворення не знайшло широкого використання в технологічній практиці, що пояснюється низьким рівнем розробок у цьому напрямі. Розроблена технологія аналогу лососевої ікри в оболонці термотропного полісахариду не набула подальшого розвитку [12].

Одним з найбільш поширених із відомих способів капсулоутворення є використання плівкоутворюючих матеріалів, які утворюються на межі розподілу фаз при змішуванні двох термодинамічно несумісних рідин, кожна з яких має певний хімічний потенціал.

Аналіз публікацій виявив відсутність системних наукових досліджень основ капсулювання, які забезпечують вимоги концепції продуктів з капсульною структурою, що визначає необхідність обґрунтування параметрів технологічного процесу, за яких можливо одержати капсульовану харчову продукцію із заданими структурно-механічними, розмірними характеристиками й товщиною оболонки.

Умовою виникнення кулеподібної форми технологічної системи у стані рідини є перевищення величини поверхневого натягу  $\delta_{\text{пр}}$  системи, що формується, над поверхневим натягом формуючого середовища  $\delta_{\text{сер}}$ , тобто  $\delta_{\text{пр}} > \delta_{\text{сер}}$ .

За цих умов при потраплянні краплі рідкого продукту у рідке формуюче середовище обов'язково буде виникати кулеподібна форма нового продукту. За фізичною суттю стан краплі продукту буде квазістабільним, а для досягнення необхідних технологічних показників кінцевого продукту обов'язковим є дотримання такої умови: швидкість процесу утворення оболонки краплі повинна значно перевищувати швидкість процесу втрати форми краплі в середовищі формування.

Процеси, пов'язані з капсулюванням однофазних за розчинником, але, як мінімум, двокомпонентних за вмістом у розчиннику речовин, не використовуються в технологіях харчової продукції.

Згідно з розробленою технологією [14, 15], у розчинному стані Na-Alg і розчинна сіль кальцію хлорид ( $\text{CaCl}_2$ ) за екструзійного змішування порушують термодинамічну й хімічну рівновагу, що в результаті взаємної дифузії спричиняє іонообмін і зміну складу системи.

Процес взаємодії іонів  $\text{Ca}^{2+}$  і Na-Alg обов'язково необхідно враховувати при створенні капсул із заданими властивостями. Оскільки капсулюванню можуть бути піддані інкапсулянти з різною концентрацією іонів  $\text{Ca}^{2+}$  і Na-Alg, то з метою узагальнення розраховано модель масообміну системи «розчин іонів  $\text{Ca}^{2+}$  — розчин Na-Alg».

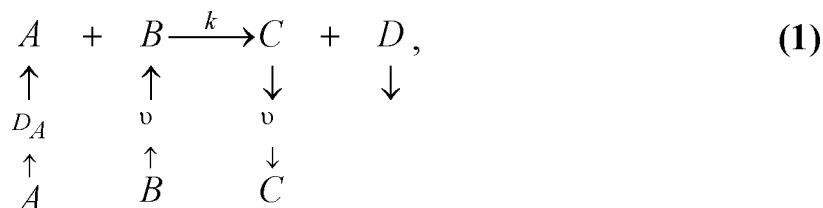
Особливістю процесу капсулоутворення є виникнення фізичної поверхні, а з колоїдної точки зору — нової фази, що формується на поверхні внесеної до формуючого середовища краплі речовини-інкапсулянту.

Метою роботи є визначення закономірностей капсулоутворення для забезпечення можливості цілеспрямованого формування властивостей кінцевого продукту.

Результати досліджень. Передумови моделювання такі: речовина  $A$  (екструдат) з молярною концентрацією  $C_A$  (а на поверхні частинки  $C_{SA}$  [моль/м<sup>2</sup>]), потрапляючи до формуючого приймального середовища (речовину  $B$ ) з молярною концентрацією  $C_B$  (а на внутрішній поверхні, яка контактує з екструдатом (інкапсулянт),  $A$  —  $C_{SB}$  [моль/м<sup>2</sup>]), утворює гетерогенну колоїдну частинку  $C$ , внутрішньою стороною повторюючи поверхню інкапсулянту з молярною концентрацією в зоні концентрацій речовин  $A$  і  $B$  —  $C_{SB}$  [моль/м<sup>2</sup>]. Добуток  $C_{SA} \cdot V_1 \leq C_{SB} \cdot V_2$  приймального розчину, де  $V_1$  — об'єм дози-краплі,  $V_2$  — об'єм приймального розчину.

Розглянемо кінетику хімічних реакцій на гетерогенній поверхні колоїдної частинки (речовина  $A$ ), що в крапельному режимі потрапляє при перемішуванні в реактор з рідким середовищем  $B$ , при цьому речовина  $B$  значно перевищує за масою речовину  $A$ . Концентрації хімічно активних речовин підбрано таким чином, щоб, незважаючи на те, що і речовина-інкапсулянт, і приймальне середовище є водорозчинними, субстанції під час з'єднання не змішувалися. Наслідком цього є те, що на поверхні внесеної частинки формується нова фаза речовини —  $C$ , утворюючи стінку (оболонку) капсули. Перенесення маси одного з хімічно активних компонентів речовини-інкапсулянта до місця локалізації реакції

відбувається двома шляхами: на першому етапі — з боку ядра колоїдної частинки внаслідок молекулярної дифузії речовини  $A$  до розчину речовини  $B$ , а після утворення нової фази  $C$  — на другому етапі — через стінку капсули, із зовнішньої сторони в результаті конвективної дифузії речовини  $B$ , що знаходиться в великому надлишку порівняно з речовиною  $A$  в об'ємі приймального середовища. При цьому кінцевий продукт (речовина  $C$ ) спроможний до інерційного розчинення внаслідок конвективної дифузії в розчині речовини  $B$ . Речовина  $C$  у вигляді сформованої капсули виводиться з приймального середовища шляхом примусового розділення. Формальний запис описаних процесів:



де  $A$  —  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $B$  —  $\text{Na-Alg}$ ;  $C$  —  $\text{Ca-Alg}_2$ ;  $D$  —  $\text{Na}^+$ .

З представлених умов закономірності утворення капсули з урахуванням схеми фізико-хімічних процесів (схема 1) з перенесенням маси можливо описати через зміну концентрацій реагуючих речовин  $A$ ,  $B$ ,  $C$  у системі:

$$\frac{dC_{SA}}{d\tau} = -kC_{SA}^nC_{SB}^m + D_A\nabla^2C_{SA}; \quad (2)$$

$$\frac{dC_{SB}}{d\tau} = -kC_{SA}^nC_{SB}^m + \nabla(\vec{v}C_{SB}), \quad (3)$$

$$\frac{dC_{SC}}{d\tau} = kC_{SA}^nC_{SB}^m - \nabla(\vec{v}C_{SC}), \quad (4)$$

де  $C_S$  — молярна концентрація речовин на поверхні реакції, моль/м<sup>2</sup> (поверхнева концентрація для сферичної частинки радіуса  $r_0$  пов'язана з об'ємною концентрацією  $C_V$  співвідношенням  $C_S = C_V r_0 / 3$ );  $n, m$  — порядок реакції за компонентами  $A, B$ ;  $k$  — константа хімічної реакції, моль<sup>1-(n+m)</sup>/с;  $D_A$  — коефіцієнт молекулярної дифузії, м<sup>2</sup>/с;  $\vec{v}$  — вектор швидкості конвективного потоку, м/с;  $\tau$  — поточний час, с.

Дана нелінійна система диференціальних рівнянь ( $n, m \neq 1$ ) може бути розв'язана тільки чисельними методами, оскільки, крім того, що необхідно враховувати радіус капсули, який постійно змінюється, важливо знати поле швидкостей конвективного потоку, розв'язуючи нелінійну гідродинамічну задачу (систему рівнянь Нав'є-Стокса). Спростимо математичну модель, рівняння (2)...(4), використовуючи такі обґрунтовані припущення: а) швидкість хімічної реакції набагато перевищує швидкість молекулярної дифузії і конвективного масопереносу (характерні швидкості цих процесів на поверхні поділу тверде тіло/рідина відрізняється на два порядки; б) з припущення (а) випливає, що концентрацію речовин  $A$  і  $B$  на зовнішній поверхні капсули можна прийняти рівною 0, а лімітуючим процесом реакції є дифузійні процеси, тоді в рівняннях (2), (3) швидкість зміни концентрації

речовин в результаті хімічної реакції можна не враховувати; в) коефіцієнти масопереносу є сталими величинами; г) конвективний потік опишемо в лінійному наближенні:

$$\nabla(\vec{v}C) \approx \frac{\beta}{r_0} C, \quad (5)$$

де  $\beta$  — коефіцієнт масовіддачі, м/с;  $r_0$  — радіус капсули в початковий момент часу, м; д) в рівнянні (4), що описує формування стінки капсули, врахований не лише процес зростання концентрації речовини  $C$  внаслідок реакції, але й зменшення її в результаті розчинення за час перебування в приймальному середовищі.

З урахуванням (2)...(4) можна сформувати систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{dC_{SA}}{d\tau} = -\frac{D_A}{r_0^2} C_{SA}, \quad (6)$$

$$\frac{dC_{SB}}{d\tau} = -\frac{\beta}{r_0} C_{SB}, \quad (7)$$

$$\frac{dC_{SC}}{d\tau} = k C_{SA}^n C_{SB}^m - \frac{\beta}{r_0} C_{SC}. \quad (8)$$

Розв'язок рівняння (6) з початковою умовою  $C_{SA}|_{\tau=0} = C_{SA}^0$  має вигляд:

$$C_{SA}(\tau) = C_{SA}^0 e^{-k_A \tau}, \quad (9)$$

де  $k_A = \frac{D_A}{r_0^2}$  — кінетичний коефіцієнт, 1/с;  $C_{SA}^0$  — початкова концентрація речовини А, моль/м<sup>2</sup>.

Розв'язок рівняння (7) з початковою умовою  $C_{SB}|_{\tau=0} = C_{SB}^0$  має вигляд:

$$C_{SB}(\tau) = C_{SB}^0 e^{-k_B \tau}, \quad (10)$$

де  $k_B = \frac{\beta}{r_0}$  — кінетичний коефіцієнт, 1/с;  $C_{SB}^0$  — початкова концентрація речовини В, моль/м<sup>2</sup>.

Підставляючи рівняння (9), (10) в рівняння (8), отримуємо диференціальне рівняння виду:

$$\frac{dC_{SC}}{d\tau} = k (C_{SA}^0)^n (C_{SB}^0)^m e^{-(nk_A + mk_B)\tau} - \frac{\beta}{r_0} C_{SC}. \quad (11)$$

Розв'язок рівняння (11) з початковою умовою  $C_{SC}|_{\tau=0} = 0$  має вигляд:

$$C_{SC}(\tau) = \frac{k_C}{k_{AB} - k_B} (e^{-k_B \tau} - e^{-k_{AB} \tau}), \quad (12)$$

де  $k_C = k (C_{SA}^0)^n (C_{SB}^0)^m$  — максимальна швидкість реакції в початковий момент часу, моль/(м<sup>2</sup> · с);  $k_{AB} = n \cdot k_A + m \cdot k_B$  — коефіцієнт масопереносу, 1/с.

Одержане рівняння (12) описує кінетику процесу зміни концентрації речовини  $C$  на поверхні стінки (оболонки) капсули.

Отримаємо вираз для швидкості зміни радіуса капсули. Швидкість зростання капсули можна записати на підставі закону збереження маси:

$$\rho_C \frac{dV}{d\tau} = \mu_C \frac{dC_{SC}}{d\tau} S, \quad (13)$$

де  $\rho_C$  — густина речовини  $C$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu_C$  — молекулярна маса речовини  $C$ ,  $\text{кг/моль}$ ;  $V$  — обсяг стінки капсули,  $\text{м}^3$ ;  $S$  — площа поверхні капсули,  $\text{м}^2$ .

Враховуючи вирази для об'єму і площі поверхні сфери:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3, \quad (14)$$

$$S = 4 \pi r^2, \quad (15)$$

рівняння (13) набуває такого вигляду:

$$\rho_C dr = \mu_C \frac{dC_{SC}}{d\tau} d\tau. \quad (16)$$

Розв'язуючи це диференціальне рівняння з урахуванням виразу для швидкості зміни концентрації  $C_{SC}(\tau)$  та початковою умовою  $r_{SC}(0) = 0 = r_0$ , отримуємо закономірність зміни радіуса капсули:

$$r(\tau) - r_0 = \frac{\mu_C}{\rho_C} \frac{k_C}{k_{AB} - k_B} (e^{-k_B \tau} - e^{-k_{AB} \tau}). \quad (17)$$

На рис. 1 зображено характер експериментальної кінетики радіуса капсули за різних значень кінетичних коефіцієнтів, що входять до рівняння (17).

Висхідна гілка кривих на рис. 1 описує процес утворення колоїдної частинки, спадна — процес її розчинення. Вочевидь, що оптимальний час процесу капсулювання не повинен перевищувати значення,  $\tau_{\text{опт}}$ ,  $\tau_{\text{опт1}}$ ,  $\tau_{\text{опт2}}$ , за якого досягається максимальний радіус капсули. Визначимо це значення з рівняння (18):

$$\frac{\mu_C}{\rho_C} \frac{k_C}{k_{AB} - k_B} (-k_B e^{-k_B \tau} + k_{AB} e^{-k_{AB} \tau}) = 0. \quad (18)$$

Для цього знайдемо першу похідну від функції рівняння (17) та прирівняємо її до нуля. Вирішуючи останнє рівняння відносно часу, знаходимо шукану величину:

$$\tau_{\text{опт}} = \frac{1}{k_{AB} - k_B} \ln \left( \frac{k_{AB}}{k_B} \right), \quad (19)$$

де  $\tau_{\text{опт}}$  — оптимальний час процесу капсулоутворення, с.

Максимальний радіус капсули, який досягається в момент часу  $\tau_{\text{опт}}$ , визначимо, підставляючи рівняння (19) у вираз для швидкості зміни радіуса (17):

$$\Delta r_{\text{max}} = \frac{\mu_C}{\rho_C} C_{SC}^{\text{max}}, \quad (20)$$

де  $\Delta r_{\text{max}} = r_{\text{max}} - r_0$  — максимальне збільшення радіуса капсули, ( $\cdot 10^{-3}$ ) м.

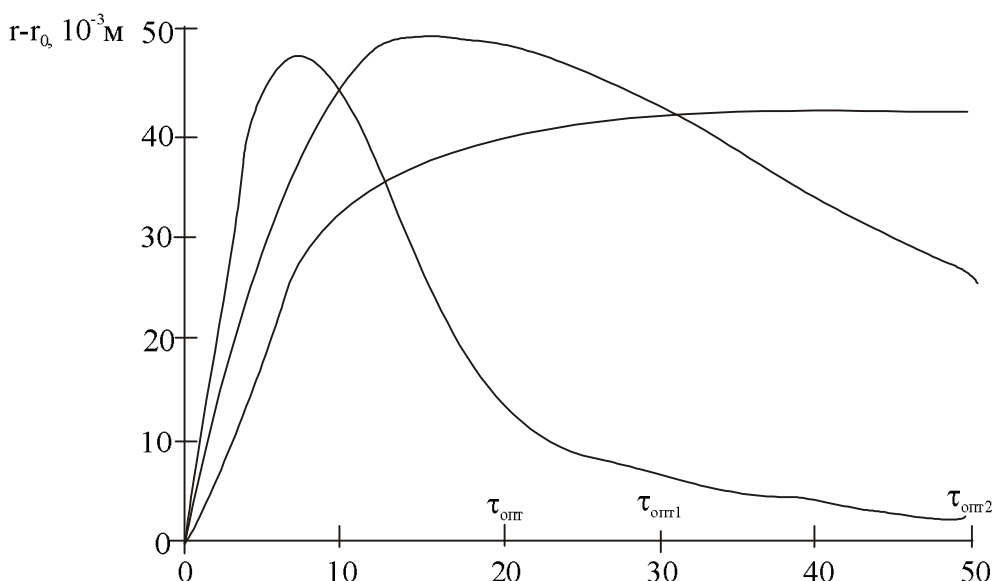


Рис. 1 Характер зміни радіуса капсули протягом часу

$$C_{SC}^{\max} = \frac{k_C}{k_{AB} - k_B} \left( 1 - \frac{k_B}{k_{AB}} \right) \left( \frac{k_B}{k_{AB}} \right)^{\frac{k_B}{k_{AB} - k_B}}, \quad (21)$$

де  $C_{SC}^{\max}$  — максимальна концентрація речовини С, моль/м<sup>2</sup>.

Для аналізу швидкості зміни маси капсули виразимо поточну площу поверхні капсули через її масу з урахуванням рівнянь (14), (15):

$$dm = (36\pi)^{1/3} \mu_C \left( \frac{m}{\rho_C} \right)^{2/3} \frac{dC_{SC}}{d\tau} d\tau, \quad (22)$$

де  $m$  — поточна маса капсули, кг.

Розв'язуючи це диференціальне рівняння з урахуванням виразу для швидкості накопичення речовини  $C_{SC}(\tau)$  та початковою умовою  $m|_{C_{SC}(0)=0} = m_0$ , отримуємо закономірність зміни маси капсули (23):

$$m(\tau)^{1/3} - m_0^{1/3} = \left( \frac{4}{3} \pi \right)^{1/3} \frac{\mu_C}{\rho_C^{2/3}} \frac{k_C}{k_{AB} - k_B} (e^{-k_B \tau} - e^{-k_{AB} \tau}), \quad (23)$$

де  $m_0$  — початкова маса капсули, кг.

Аналіз зміни швидкості маси капсули потрібно проводити в безрозмірних координатах, визначених на підставі рівняння (23) таким чином:

$$m^*(\tau) = A \frac{k_C}{k_{AB} - k_B} (e^{-k_B \tau} - e^{-k_{AB} \tau}), \quad (24)$$

$$\text{де } m^* = (m^{1/3} - m_0^{1/3}) / m_0^{1/3}; \quad A = \left( \frac{4}{3} \pi \right)^{1/3} \frac{\mu_C}{m_0^{1/3} \rho_C^{2/3}}.$$

Використовуючи рівняння (24), можна визначити кінетичні коефіцієнти: швидкість реакції і коефіцієнти масопереносу.

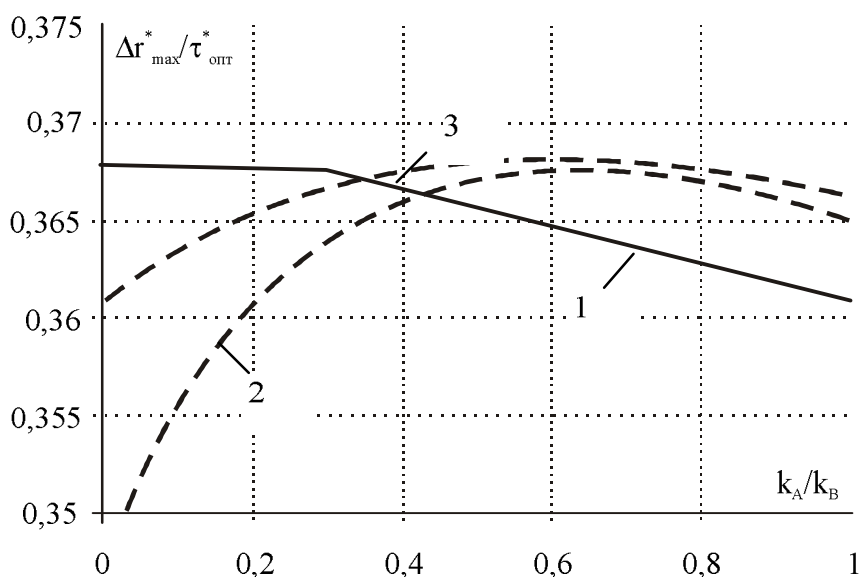
Проаналізуємо швидкість процесу капсулювання. Визначимо інтенсивність процесу як відношення максимального радіуса капсули до оптимального часу капсулювання (рівняння (25)). Підставивши вирази для максимального радіуса капсули, рівняння (20), (21) і значення оптимального часу капсулювання, рівняння (19), одержуємо залежність:

$$\frac{\Delta r_{\max}}{\tau_{\text{опт}}} = \frac{\mu_C}{\rho_C} \frac{C_{SC}^{\max}}{\tau_{\text{опт}}}, \quad (25)$$

$$\frac{\Delta r_{\max}}{\tau_{\text{опт}}} = \frac{\mu_C}{\rho_C} k_C \frac{(n\xi + m)^{-\left(\frac{n\xi+m}{n\xi+m-1}\right)}}{\ln(n\xi + m)} (n\xi + m - 1), \quad (26)$$

де  $\xi = k_A / k_B$ .

Як видно з одержаного виразу, швидкість процесу капсулювання прямо пропорційна функції, яка залежить від співвідношення коефіцієнтів внутрішнього і зовнішнього масопереносу ( $k_A/k_B$ ) та порядку хімічної реакції  $n, m$  за компонентами  $A, B$ .



**Рис. 2. Характер зміни інтенсивності капсулювання від співвідношення швидкостей внутрішнього і зовнішнього масопереносу:**  
1 —  $m/n=1$ ; 2 —  $m/n=0,3$ ; 3 —  $m/n=0,5$

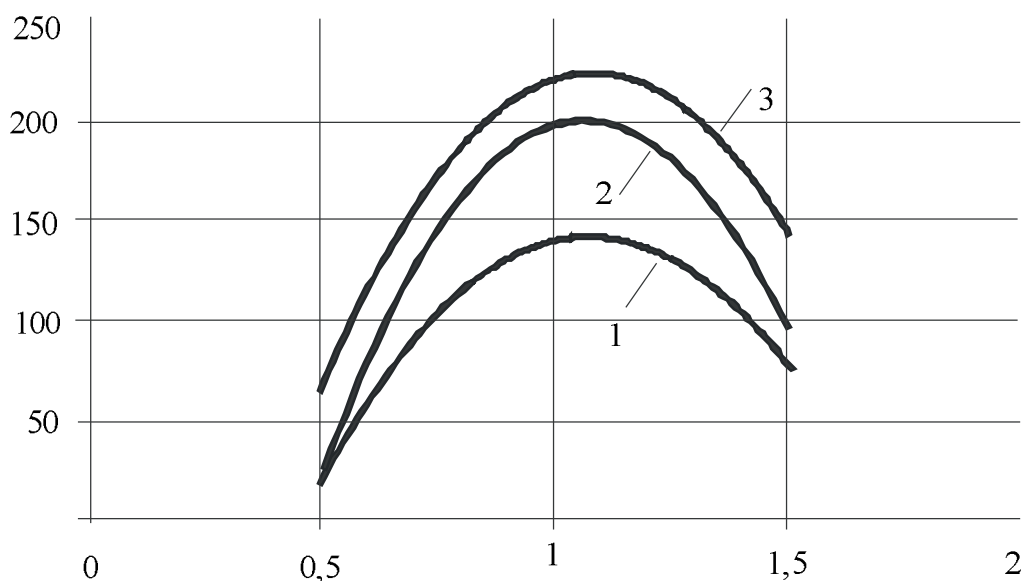
На рис. 2 відображено характер зміни інтенсивності процесу капсулювання, що залежить від співвідношення між внутрішнім і зовнішнім масопереносом. Швидкість процесу капсулювання представлено у відносних одиницях:

$$\frac{\Delta r_{\max}^*}{\tau_{\text{опт}}^*} = \frac{(n\xi + m)^{-\left(\frac{n\xi+m}{n\xi+m-1}\right)}}{\ln(n\xi + m)} (n\xi + m - 1). \quad (27)$$



Як впливає з розрахунків за рівнянням (29), при відношеннях  $m/n < 1$  існує оптимальне значення коефіцієнта зовнішнього масообміну  $k_B = \beta / r_0$ , при якому швидкість капсулювання максимальна. Коефіцієнт масовіддачі  $\beta$ , як відомо, прямо пропорційний швидкості конвективного потоку, в даному випадку швидкості мішалки в реакторі. Коефіцієнт внутрішнього масопереносу  $k_A = D_A / r_0^2$  не залежить від гідродинамічних умов у реакторі з приймальним середовищем. Таким чином, швидкість перемішування повинна бути оптимальною для одержання максимальної продуктивності реактора у процесі капсулювання. Слід зазначити, що порядок реакції для в'язких середовищ (у даному випадку це приймаючий розчин у реакторі), як правило, менший за одиницю, що пов'язано зі зменшенням рухливості реагуючих молекул із зростанням в'язкості.

Дослідження залежності приросту мас капсул для різних концентрацій Na-Alg показало (рис. 3), що концентрації Na-Alg (1,0; 1,5 та 2,0 %), які забезпечують утворення капсул правильної форми, зростання маси оболонок спостерігається в діапазоні концентрації  $\text{CaCl}_2$  в інтервалі концентрацій з 0,5 до 1,0 %. При зростанні концентрацій  $\text{CaCl}_2$  в інтервалі концентрацій з 1,0 до 1,5 % за один і той же час приріст маси суттєво зменшується. Такі дані свідчать, що за кожним вибраним співвідношенням виникає власна структура стінки капсули, проникність якої для іонів  $\text{Ca}^{2+}$  зменшується зі зростанням концентрації Na-Alg (рис. 3, криві 2, 3 порівняно з кривою 1), що і визначає падіння величини приросту мас. Одержані дані є практичним підґрунтям для обґрунтування параметрів технологічного процесу одержання капсул. Крім того, дані підтверджують, що існують усі передумови одержання капсул як з високою, так і з низькою проникністю стінок як з боку інкапсулянта, так і з зовнішнього середовища в бік інкапсулянта.



**Рис. 3. Залежність приросту мас оболонок капсул від концентрації  $\text{CaCl}_2$  за концентрації Na-Alg:**

1, 2, 3 — 1,0; 1,5; 2,0 % відповідно

Аналізуючи дані, наведені на рис. 3, можна дійти висновку, що при збільшенні концентрації  $\text{CaCl}_2$  до критичних показників відбувається зменшення приросту маси стінки капсул. Цей факт пов'язаний з утворенням певного стану гелю в системі  $\text{Ca-Alg}_2$  —  $\text{Na-Alg}$ , який ускладнює дифузійний рух іонів  $\text{Ca}^{2+}$ .

Завдяки можливості регулювання процесу одержання капсул із заданими властивостями цілком реальним є використання одержаних капсул у різноманітних технологічних системах. На рис. 4 представлено залежності величини  $A \cdot k_c$  для досліджуваних концентрацій  $\text{CaCl}_2$  0,5...2,0 %, які пропорційні швидкості реакції.

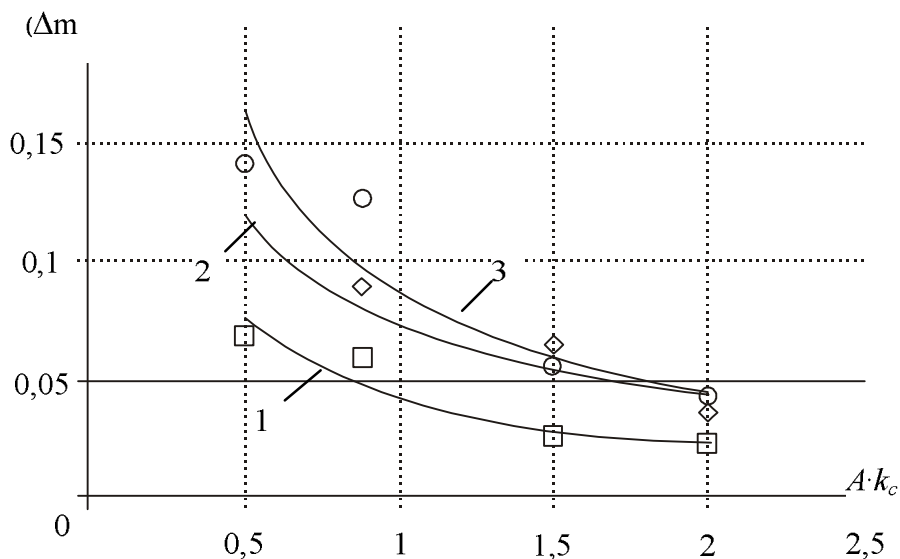


Рис. 4. Коефіцієнт швидкості реакції  $A \cdot k_c$  залежно від концентрації  $\text{Na-Alg}$  за концентрації  $\text{CaCl}_2$ , %:  
1 — 0,5; 2 — 1,0; 3 — 1,5

### Висновок

У результаті дослідження розраховано й експериментально підтверджено, що розроблена теоретична модель утворення капсул і формалізоване представлення процесу капсулоутворення в межах експериментальних параметрів  $0,5 \leq \text{Na-Alg} \leq 2,0$  і  $0,5 \leq \text{CaCl}_2 \leq 1,5$  повністю відображають структуру й функцію системи експериментів і можуть бути використані для розрахунку ключових параметрів технологічного процесу капсулювання. При цьому доведено як явище утворення капсул, так і теоретично визначено час  $\tau_{\text{опт}}$  їх утворення.

### Література

1. *Інноваційні технології виробництва харчової продукції масового споживання*: монографія / П.П. Пивоваров, О.О. Гринченко, В.М. Михайлов, С.В. Іванов та ін.; / за заг. ред. П.П. Пивоварова / Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. — Х., 2011. — 444 с.
2. *Наукові принципи технології аналогів ікри*: монографія / О.Ю. Рябець, Є.П. Пивоваров, С.В. Іванов та ін. ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. — Х., 2010. — 164 с.

3. *Сучасні напрямки в технології переробки дині: монографія* / Г.О. Пестіна, Є.П. Пивоваров ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. — Х., 2010. — 163 с.
4. *Технологія реструктурованих напівфабрикатів на основі рибної сировини: монографія* / Н.Г. Гринченко, Л.Ф. Товма, М.О. Янчева та ін.; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. — Х., 2013. — 168 с.
5. *Толстогузов В.Б. Новые формы белковой пищи (технологические проблемы и перспективы производства)* / В.Б. Толстогузов. — М.: Агропромиздат, 1987. — 303 с.
6. *Пивоваров П.П. Технология термофумованной продукции из нетрадиционного сырья в условиях централизованного производства: диссертация д-ра техн. наук: 05.18.16* / П.П. Пивоваров. — Харьков, 1992. — 468 с.
7. *Stephen A.M. Alginates* / A. M. Stephen. — New York.: Marcel Dekker, — 1995. — 266 p.
8. *Moe S.T. Alginates. In: Food polysaccharides and their applications* / S. T. Moe, K. I. Draget, G. Skjak-Braek, O. Smidsrod; Eds. A. M. Stephen. — New York: Marcel Dekker. — 1995. — P. 245—266.
9. *Grant G.T. Biological interaction between polysaccharides and divalent cations: the egg-box model* / G. T. Grant // FEBS Letters. — 2003, — № 32. — P. 195—198.
10. *Mancini M. Mechanical properties of alginate gels: empirical characterization* / M. Mancini, M. Moresi, R. Rancini // J. Food Eng. — 1999. — Vol. 39, № 4. — P. 369—378.
11. *Morris E.R. Molecular interaction in polysaccharides gelation* / E.R. Morris // British Polymer Journal. — 1986. — Vol. 18, № 1. — P. 18—24.
12. *Перцевой Ф.В. Разработка технологии получения икры белковой красной: диссертация канд. техн. наук: 05.18.04* / Ф.В. Перцевой. — М., 1983.
13. *Ridgway K. Hard capsules: Development a technology* / Ridgway K. — London: Pharmaceutical press, 1987. — 309 p.
14. *Патент 91616 Україна, МПК (2009) А 23 Р 1/00, А 61 J 3/07 Пристрій для виробництва капсульованих продуктів* / П.П. Пивоваров, Є.П. Пивоваров. — а 200813946; заявл. 04.12.2008; опубл. 10.08.2010.
15. *Патент 92250 Україна, МПК (2009) А 23 Р 1/00, А 61 К 9/00 Спосіб одержання багатошарових капсул* / П.П. Пивоваров, Є.П. Пивоваров. — а 200901896; заявл. 03.03.2009; опубл. 11.10.2010.

## **МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ КАПСУЛООБРАЗОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АЛЬГИНАТА НАТРИЯ**

**Е.П. Пивоваров, О.А. Гринченко**

*Харьковский государственный университет питания и торговли*

**С.В. Иванов, В.А. Потапов**

*Национальный университет пищевых технологий*

*Цель работы состоит в моделировании кинетики процесса капсулообразования при экструзивном формировании пищевых продуктов в растворе натрия альгината; теоретическом и аналитическом обосновании производства пищевых продуктов в форме шара с пустотой при условии экструзии составляющих в раствор натрия альгината; аналитическом определении и экспериментальном подтверждении закономерностей изменения радиуса и массы капсул, расчете*

оптимального формирования шара и кинетики технологического процесса капсулообразования. Разработанная модель кинетики капсулообразования проверена на адекватность путем постановки экспериментов и положена в основание определения оптимальных параметров технологического процесса капсулирования пищевых систем, а также определения основных характеристик промышленного оборудования для производства капсулированных продуктов.

**Ключевые слова:** ионотропное гелеобразование, альгинат натрия, капсулирование, кинетика процесса образования капсулы, экструзивное формирование шара.