

УДК 539.16

<https://doi.org/10.18524/0367-1631.2026.64.361464>**Курятников В. В.**

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

E-mail: kuryatnikov1@ukr.netORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3886-4018>**Моделювання процесів масообміну з урахуванням дифузії радіонуклідів в порах та конвекції під час технологічної обробки харчової продукції**

З огляду на високу мобільність радіонуклідів у природних ланцюгах та їх здатність накопичуватися в харчовій продукції, питання ефективного технологічного очищення продуктів харчування набувають особливої актуальності.

Продукти харчування можна вважати ієрархією дисперсних газоподібних, рідких і твердих фаз, дисперсними системами, більшість яких мають пористу та волокнисту структуру, набувають вигляд піни, як то хлібно-булочні вироби.

Вміст радіонуклідів в цих структурах можна змінювати, застосовуючи фізичні процеси масообміну, які лежать в основі технологій їх кулінарної обробки вимочуванням, варінням, солінням та ін. Раціоналізація технологічної обробки кулінарної продукції може дозволити суттєво зменшити її радіоактивність та підвищити рівень харчової безпеки.

Метою дослідження є моделювання процесів масообміну під час технологічної та кулінарної обробки харчової продукції для зниження в ній вмісту радіонуклідів.

Радіаційні забруднення можуть бути розчиненими у воді, і процеси їх знешкодження можуть бути пов'язані із швидкістю виведення їх через пори у масообмінних процесах.

В рамках такого підходу розглянуті механізми фізичних процесів, що супроводжують виведення радіонуклідів з продуктів харчування. Це процеси внутрішньої дифузії сольового розчину радіонукліду в окремих порах, що виходять на зовнішню поверхню харчового продукту, а також конвективно-дифузійні механізми, включаючи стефанівські потоки.

Виконано моделювання процесів масообміну при виведенні радіоізотопів з продуктів харчування у водний розчин в технологіях їх кулінарної обробки. Розглянуті процеси внутріпористої дифузії розчину крізь капілярні пори, що виходять на зовнішню поверхню харчового продукту. Знайдений математичний вираз для дифузійних потоків крізь ці пори.

Показано, що при режимах, що відповідають температурній обробці харчових продуктів в процесах кип'ятіння, відварювання більш слушно описує динаміку радіоактивних домішок у водному розчині конвективно-дифузійна модель. Показана суттєва роль стефанівських потоків у процесі дифузії радіонуклідів і потреба врахування його при моделюванні динаміки процесу.

Ключові слова: радіаційне забруднення, дисперсна фаза, дифузія, моделювання.

Вступ. В результаті збільшення сфери використання радіоактивних речовин у господарчій діяльності країни, діючих ще довгий час наслідків аварії на ЧАЕС, ведення воєнних дій та ін. залишається небезпечним радіаційне забруднення навколишнього середовища і, як наслідок, відбувається забруднення сировини для харчової промисловості.

Радіонукліди, що потрапляють у харчові продукти, можуть мати як природне



походження (радій-226, калій-40, торій-232), так і техногенне (цезій-137, стронцій-90, плутоній-239). Основними джерелами радіоактивного забруднення харчової продукції можуть бути забруднені ґрунти або водні ресурси. Через агробіоценози радіонукліди накопичуються у рослинній та тваринній продукції, а в подальшому — у людському організмі.

Вивчення процесів знешкодження радіаційного забруднення харчової продукції в процесах технологічної та кулінарної її обробки входить до задач радіаційного убезпечення та охорони навколишнього середовища. До цих задач належать моделювання дифузійних процесів виведення радіоактивних забруднень з харчової продукції і оцінки ризиків радіаційного зараження харчових продуктів.

Мета роботи полягає у моделюванні процесів масообміну під час технологічної та кулінарної обробки харчової продукції для зниження в ній вмісту радіонуклідів.

Результати дослідження мають теоретичне значення, оскільки розробка алгоритму для моделювання виведення радіонуклідних забруднень допомагає розширити знання про механізми дифузії радіоактивних речовин, розширити сферу використання методів фізичного моделювання дисперсних систем.

Практичне значення досліджень полягає в розробці моделей дифузії та в прогнозуванні на основі їх критичних режимів фізичних процесів, які пов'язані з радіоактивними забрудненнями. Це має покращити наше розуміння механізмів поширення радіоактивних речовин у довкіллі та надати інструмент для управління ризиками, пов'язаними з радіоактивним забрудненням.

Постановка задачі та методика досліджень. Згідно з міжнародними стандартами та діючими в Україні нормативами [1-4] встановлені максимально допустимі рівні радіаційного забруднення для різних груп продуктів. Перевищення цих рівнів свідчить про небезпечний радіаційний стан продукції та потребує їх вилучення. Контроль здійснюється за допомогою методів радіометрії та спектрометрії — перевіряється наявність ізотопів цезію-137, стронцію-90.

Процеси кулінарної обробки харчової продукції – це складні фізичні та хімічні процеси. Радіаційний контроль харчових продуктів є складовою загального контролю якості та безпечності продукції харчової галузі [5].

В процесах технологічної обробки харчової продукції в них спостерігаються особливі явища та процеси структурних змін [5].

Саме в цей під час термічної або технологічної обробки харчової продукції проходять нелінійні фізико-хімічні процеси, які змінюють не лише хімічний склад, а й текстуру, смак, зовнішній вигляд і навіть поживну цінність продукту [5]. Наприклад, при варінні відбувається теплообмін і масообмін, при солінні — дифузія солей у тканини продукту, при випіканні тіста — розпушування, створення пористої структури. Кулінарні продукти, продукти їжі в процесах їх приготування часто є нерівноважними системами, де протікають хімічні реакції.

Фізичні та хімічні процеси, які відбуваються при цьому мають складний характер. Вони описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Складні тривимірні структури утворюють молекули, які мають здатність з'єднуватися між собою, утворюючи білки. Білки, як основні одиниці живих організмів виконують

численні функції в клітинах, які об'єднуються в більш складні утворення .

Нелінійність цих процесів означає, що навіть незначна зміна температури, вологості чи складу продукту може призвести до зовсім іншого результату. І навпаки, при дотриманні оптимальних умов відбуваються синергетичні ефекти, коли продукт структурується, тобто організовується у стійкі утворення [6]. Структури, зокрема комірки Бенара, утворюються самочинно завдяки одночасній дії тепло-масообмінних процесів у відкритих дисипативних системах.

Вивчаючи [6-8] нелінійні, нерівноважні процеси в рамках нелінійної динаміки та аналізу систем навколишнього середовища, фізики складних, нелінійних нерівноважних систем довкілля, які описуються поняттями- неврівноваженість, гідродинамічні нестійкості, дисипація, біфуркації, можна припускати, що складні структури речовини, якими є структура та властивості харчової продукції, можуть утворюватися і залежати від термодинаміки її приготування.

Термодинамічне спряження процесів, зміна ентропії відкритої системи, умови кінетичної необерненості, – ось поняття, які мають описати процеси технологічної обробки харчової продукції.

Постановка задачі включає розгляд знешкодження радіаційного забруднення харчової продукції шляхом масообмінних процесів під час її технологічної та кулінарної обробки. Радіаційні забруднення можуть бути розчиненими у воді, а процеси їх знешкодження можуть бути пов'язані із швидкістю виведення їх через пори у масообмінних процесах.

У роботі обрано за мету дослідити дифузію розчину солі радіоактивної речовини у деякі продукти харчування з пористою структурою у технологічних процесах соління, вимочування, варіння та ін. Теоретичним методом досліджень є метод моделювання процесів масообміну при дифузії сольового розчину по внутрішніх циліндричних порах при низьких температурах та процесів конвективної дифузії з врахуванням стефанівських потоків в процесах випаровування.

Кінетику процесів можна досліджувати, визначаючи радіоактивність харчового продукту на протязі масообмінного процесу за допомогою радіо-дозиметричного та спектрометричного обладнання.

Моделювання дифузії по внутрішніх циліндричних порах. Моделюється процес внутрішньої дифузії сольового розчину по циліндричних порах харчового продукту у процесах його засолювання або вимочування. Будемо вважати, що харчовий продукт має структуру у вигляді довгих циліндричних пор, які рівномірно розподілені по об'єму продукту. Дифузія сольового розчину відбувається через пори, що виходять на зовнішню поверхню. Таким чином, сольовий розчин може проникати у продукт на глибину порядку довжини пори.

В об'ємі харчового продукту відбуваються сорбційні процеси, в технологіях засолювання відбувається адсорбція, а при вимочуванні харчового продукту – десорбція.

Вважаємо, що усі циліндричні пори мають однакові довжину і діаметр. Пори що виходять на зовнішню поверхню харчового продукту, мають заданий розподіл.

Доречно вважати, що кількість пор, що виходять на зовнішню поверхню ха-

рчового продукту, змінюється вдовж координати x в одновірній задачі за експоненціальним законом, тобто пропорційно e^{-bx} , де b – параметр розподілу пор, x – координата із напрямом усередину харчового продукту.

Тоді рівняння внутрішньої дифузії з врахуванням експоненціального розподілу пор, що виходять на зовнішню поверхню, має вигляд

$$\frac{d^2c}{dx^2} + ae^{-bx} = 0, \quad (1)$$

де c – концентрація сольового розчину всередині пори, a – константа масообміну.

Рівняння (1) підстановкою $c(x)=\eta(\xi)$, $\xi = e^{-bx}$ наводиться до наступного виду

$$\xi\eta'' + \eta' + \frac{a}{b^2}\eta = 0. \quad (2)$$

Розв'язком рівняння (2) є циліндрична функція Бесселя нульового порядку $Z_0(z)$

$$c(x)=\eta(\xi)= Z_0(z), \quad (3)$$

$$Z_0(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \left[A \cos\left(z - \frac{\pi}{4}\right) + B \sin\left(z - \frac{\pi}{4}\right) \right], \quad (4)$$

де
$$z = 2\sqrt{\frac{a}{b^2}} \xi = \frac{2}{b} \sqrt{ae^{-\frac{b}{2}x}}$$

Граничні умови: $x=0, c=c_0; x=R, dc/dx=0$.

З них отримаємо систему рівнянь для визначення коефіцієнтів A і B :

$$A \sin\left(z_1 - \frac{\pi}{4}\right) - B \cos\left(z_1 - \frac{\pi}{4}\right) = 0,$$

$$\sqrt{\frac{2}{\pi z_0}} \left[A \cos\left(z_0 - \frac{\pi}{4}\right) + B \sin\left(z_1 - \frac{\pi}{4}\right) \right] = c_0,$$

звідки знаходимо коефіцієнти A і B :

$$A = \frac{\cos\left(z_1 - \frac{\pi}{4}\right)}{\sin\left(z_1 - \frac{\pi}{4}\right)} B, \quad B = \frac{\cos\left(z_1 - \frac{\pi}{4}\right)\cos\left(z_0 - \frac{\pi}{4}\right)}{\sin\left(z_1 - \frac{\pi}{4}\right)\sin\left(z_0 - \frac{\pi}{4}\right)} - \frac{c_0 \sqrt{\frac{\pi z_0}{2}}}{\sin\left(z_0 - \frac{\pi}{4}\right)}.$$

Тут
$$z_0 = -\frac{2}{b} \sqrt{a}, \quad z_1 = -\frac{2}{b} \sqrt{ae^{-\frac{b}{2}x}}.$$

Потік розчину всередину продукту G_i дорівнює

$$G_i = -D_i \frac{dc}{dx}\Big|_0 = \lambda D_i th(|z_1| - |z_0|) = \lambda D_i th \lambda R. \quad (5)$$

При великих значеннях z величина $th(|z_1| - |z_0|) \rightarrow 1$. Тоді молекулярний потік сольового розчину дорівнює $G_i = \lambda D_i$, де D_i – коефіцієнт внутрішньої дифузії,

λ – параметр, що дорівнює
$$\lambda = \sqrt{\frac{a}{bD_i c_0}}.$$

3. Моделювання конвективної дифузії радіонуклідів у водному середовищі. Механізми перенесення маси середовища, як цілого із швидкістю v , яка являє собою швидкість конвективного потоку, є молярними механізмами. Для молярних механізмів характерні більші швидкості потоків мас. Коли молекулярними механізмами дифузії можна нехтувати, рівняння переносу маси можна записати у вигляді [9]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \text{grad} C = - \text{div} \vec{j} + I, \quad (6)$$

де C – концентрація радіонуклідів; I – функція джерела; \vec{j} – густина потоку радіонукліду, внаслідок якого відбувається розбавлення суміші.

Крайові умови: на поверхні трубки току механізм масообміну вважаємо молярним і густина потоку радіонукліду

$$j|_{r_0} = \beta C,$$

де $\beta = \frac{Nu_D \cdot r}{D}$ – дифузійний критерій Нуссельта, D – коефіцієнт дифузії

Внаслідок стаціонарності усталеного процесу $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$.

Функція стоку знаходиться із закону радіоактивного розпаду, оскільки це кількість радіонукліда, яка розпадається за одиницю часу в одиниці об'єму речовини:

$$I = \frac{1}{V} \cdot \frac{dN}{dt} = \frac{dC}{dt} = -\lambda C,$$

де $\lambda = \frac{\ln}{T_{1/2}}$ – константа розпаду ($T_{1/2}$ – період напіврозпаду радіонукліда).

Направимо вісь X вздовж потоку води. Тоді в циліндричних координатах з віссю X у якості циліндричної осі з урахуванням радіальної симетрії:

$$\text{grad} C = \frac{\partial C}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{\partial C}{\partial x} \vec{e}_x$$

$$\text{div} \vec{j} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vec{j}) + \frac{\partial j}{\partial x}$$

Для молярного механізму дифузії

$$j = \beta C, \quad \text{div} \vec{j} = \frac{\beta C}{r} + \beta \cdot \frac{\partial C}{\partial x}.$$

З урахуванням наведених виразів рівняння (6) придбає вигляд:

$$(v + \beta) \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{\beta C}{r} - \lambda C, \quad (7)$$

або

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -a C, \quad (8)$$

де

$$a = \frac{\beta + \lambda}{v + \beta} \approx \frac{\beta \sqrt{\frac{\pi v}{Q}} + \lambda}{v} \quad (9)$$

оскільки $\beta \ll v$. Розв'язок рівняння (8) має вид

$$C = C_0 e^{-ax}. \quad (10)$$

Отже, зміна концентрації радіонукліда у конвективному потоці відбувається за експоненціальним законом, показник степені якого визначається константою розпаду λ і швидкістю масообміну β . Коефіцієнт масообміну β визначається з критеріального співвідношення

$$Nu_D = \frac{\beta \cdot r}{D}, \quad \text{звідки} \quad \beta = \frac{Nu_D \cdot D}{r}.$$

Тоді розв'язок рівняння (7) можна представити

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{x}{v} \cdot (b + \lambda)}, \quad (11)$$

де b – фактор розбавлення,

$$b = \beta/r = \text{Nu}_D \cdot D/r^2$$

Вважаємо, що радіаційна активність води пропорційна концентрації C радіонукліда у водному розчині. Тому на відстані X від поверхні активність A розчину дорівнює

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{x}{v}(b+\lambda)}, \text{ Бк} \quad (12)$$

Конвективно механізм поширення радіонуклідів має пояснювати процеси переміщення радіоактивної речовини конвективними (молярними) потоками. Роль його має зростати з підвищенням температури. Кип'ятіння, варіння відбуваються, коли дифузійні процеси переходять у турбулентний режим.

Інтенсивність конвективних потоків визначається просторовим масштабом турбулентності l , швидкістю турбулентних пульсацій, яка в свою чергу пов'язана з швидкістю конвективного потоку w . За формулою Прандтля кінематична в'язкість ν_τ дорівнює $\nu_\tau = l^2 \frac{dw}{dy}$, а динамічна в'язкість $\mu = \rho \cdot w'$, де w' - швидкість турбулентних пульсацій $w' = l \frac{dw}{dy}$, ρ - густина.

Просторовий масштаб турбулентності l має порядок розмірів, що визначають систему - розмір тіл, що обтікаються, діаметр або ширина каналів, діаметр комірок, зокрема комірок Бенара у структурованій системі харчового продукту.

Якщо у системі протікають процеси фазового перетворення із зміненням об'єму газової фази, з'являється додатковий, стефанівський молярний потік

$$\vec{G}_v c = \vec{w}_c \cdot \frac{p_1}{RT}, \quad (13)$$

де w_c – швидкість стефанівського потоку, p_1 – тиск насиченої водяної пари, p_1/RT – мольна концентрація водяної пари. Стефанівський потік збільшує винесення пари від поверхні. З врахуванням стефанівського потоку повний конвективний потік дорівнюватиме

$$\vec{G}_v = \vec{v} \cdot C + \vec{w}_c \cdot \frac{p_1}{RT}. \quad (14)$$

У випадку $p_1 = 0$ (на великій відстані від поверхні) вважатимемо незмінним.

Визначимо конвективний дифузійний потік (з врахуванням стефанівського) при випаровуванні рідини з плоскої поверхні у газове середовище. Будемо вважати, що конвективний потік у рідині порядку дифузійного потоку пари у межах прикордонного шару, який для пари можна записати

$$G_1 = -\frac{D_{12}}{RT} \frac{dp_1}{dx} + w_c \cdot \frac{p_1}{RT}, \quad (15)$$

а потік повітря має дорівнювати нулю.

$$G_2 = -\frac{D_{12}}{RT} \frac{dp_1}{dx} + w_c \cdot \frac{p_2}{RT} = 0, \quad (16)$$

де D_{12} – коефіцієнт дифузії, w_c – швидкість стефанівського потоку, p_2 - тиск повітря.

Потік G_2 дорівнює потоку пари і спрямований назустріч у бік зменшення парціального тиску повітря p_2 . Тому загальний тиск $P = p_1 + p_2$.

Звідси

$$w_c = -D_{12} \frac{1}{P-p_1} \frac{dp_1}{dx} \quad (17)$$

З врахуванням виразу для швидкості стефанівського потоку потік G_1 дорівнює

$$G_1 = -D_{12} \frac{1}{1-p_1/p} \frac{dp_1}{dx}. \quad (18)$$

Інтегруючи вираз для G_1 , отримаємо

$$G_1 = \frac{1}{x} \frac{D_{12}}{RT} P \ln \frac{1 - \frac{p_1}{P}}{1 - \frac{p_{1\text{пов}}}{P}}. \quad (19)$$

Оцінимо вплив стефанівського потоку при випаровуванні рідини. Відношення повного дифузійного потоку (разом із стефанівським потоком) до чисто дифузійного потоку у газовій фазі

$$k = \frac{\ln \frac{1 - \frac{p_1}{P}}{1 - \frac{p_{1\text{пов}}}{P}}}{\frac{p_{1\text{пов}}}{P} - \frac{p_1}{P}} \quad (20)$$

На рис. 1 приведені залежності коефіцієнта k від відношення тиску пари на поверхні випаровування $p_{1\text{пов}}$ до загального тиску P .

З рис.1 видно, що у випадку, коли $p_1 = 0$, а $p_{1\text{пов}}/P = 0.5$, що відповідає температурі $T=373\text{K}$, відношення $k = 1.4$. Коли $p_{1\text{пов}}/P = 0.95$, відношення k зростає до 3,2. За формулою Прандтля, можна оцінити чисто дифузійний потік у рідині. Користуючись довідниковими даними, знаходимо, що при температурі кипіння води $T = 373 \text{ K}$ відношення кінематичних в'язкостей води і водяної пари складає 35.7. Тобто, можна очікувати, що стефанівські потоки майже на два порядки перевищують конвективні дифузійні потоки у рідині.

Це пояснює, чому швидкості таких технологічних процесів, як соління, вимочування малі, а самі ці процеси вимірюються годинами та добами. В них діють молекулярні дифузійні механізми. Проте, технологічні процеси, що пов'язані з кип'ятінням та варінням, характерні великими швидкостями конвективних потоків. При цьому суттєвими є стефанівські потоки, що обумовлені фазовими перетвореннями у системі. Тривалість цих процесів складає хвилини. Зрозуміло, що для виведення радіонуклідів у процесах вимочування потрібні години, а в процесах кип'ятіння – декілька хвилин.

4. Методи виведення радіонуклідів з продуктів харчування. Ці методи базуються на фізико-хімічних процесах дифузії, осмотичного переносу та розчинності радіонуклідів.

Правильний вибір технологічної обробки харчових продуктів з таких, як відварювання, вимочування, бланшування, дозволяє значно знизити вміст радіонуклідів у продуктах. Найбільш результативними є процеси, що забезпечують перехід ізотопів у воду. Так, вимочування та бланшування знижують вміст Cs-137 на 20–

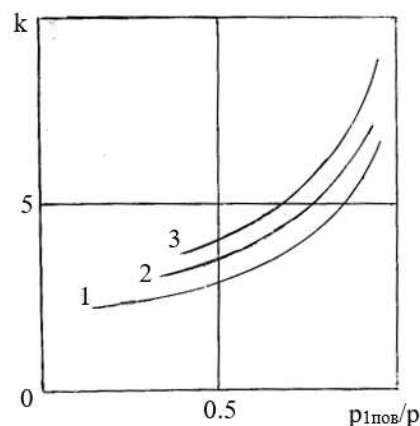


Рис.1 Роль стефанівських потоків при випаровуванні в процесах кип'ятіння та варіння
 1 – $p_1 = 0$; 2 – $p_1 = 0,2 P$; 3 – $p_1 = 0,4 P$

Таблиця 1. Середні значення коефіцієнта технологічної (кулінарної) обробки

Технологічна операція	Коефіцієнт К.т.о
Відварювання м'яса та кип'ятіння 10 хв	0.4
Відварювання риби	0.7
Сепарація молока на вершки	0.1
Переробка молока на сир	0.1
Очищення митої картоплі від шкірки	0.5
Вимочування картоплі впродовж 3—4 год.	0.6
Відварювання грибів	0.2

Таблиця 2. Ступеня зниження радіоізоотопів з харчових продуктів

Продукти	Спосіб зниження	Ступень зниження, разів
Томати, огірки	Промивання	5–7
Капуста	Видалення верхніх листків	До 40
Буряк, морква	Зрізання верхівки	8–12
Картопля	Вимочування впродовж 3-4 год.	5–20
Зерняткові, овес	Дроблення	10–15

40%, соління, маринування огірків знижує вміст цезію-137 до 15%, консервування шпинату і капусти до 20%, кип'ятіння – до 50%.

Відварювання знижує концентрацію радіонуклідів у грибах, м'ясі й овочах до 50-80%. Тушіння томатів, очищеної моркви знижує вміст в них цезію-137 на 50%, очищеного буряка до 30%. У вареному м'ясі зазвичай залишається 40%, а в бульйоні 60% від цезію-137, що міститься в початковому м'ясі. Тому бульйон потрібно злити після 8-10 хвилин кип'ятіння м'яса.

Для оцінки зниження активності продуктів після технологічної і кулінарної обробки використовують [5] коефіцієнт технологічної або кулінарної обробки, який розраховують за формулою:

$$K_{т.о} = A_{т.о} / A_0 \quad (21)$$

де $A_{т.о}$ – питома активність продуктів після технологічної (кулінарної) обробки, Бк/кг; A_0 – питома активність продуктів до обробки, Бк/кг.

Солі цезію мають тенденцію залишатися у водній фазі. Тому переробка молока у продукти тривалого зберігання є ефективним способом зниження вмісту радіонуклідів в кінцевих молочних продуктах. Переробляючи молоко на жирні молочні продукти (вершки, масло), можна істотно понизити вміст радіонуклідів в харчовому ланцюжку. Для цього потрібно кип'ятити його впродовж 8–10 хвилин.

У табл. 2 наведені дані з ступеня зниження радіоізоотопів з харчових продуктів.

Практичне значення роботи полягає в розробці алгоритмів моделі виведення радіонуклідів, придатної для прогнозування критичних режимів фізичних процесів технологічної та кулінарної обробки харчової продукції. Отримані результати можуть бути використані: під час оцінювання безпечності продуктів харчових підприємств із метою зниження вмісту радіонуклідів, а також у випадку розробки рекомендацій щодо раціонального харчування на радіаційно забруднених територіях.

Висновки

У роботі розглянуто радіоактивне забруднення продуктів харчування, встановлені основні механізми знешкодження радіаційного забруднення харчової продукції під час її технологічної та кулінарної обробки, виконано моделювання процесів масообміну при виведенні радіоізотопів з продуктів харчування у водний розчин в технологіях їх кулінарної обробки.

Конвективно-дифузійна модель перенесення радіонуклідів у водному розчині слушно описує динаміку радіоактивних домішок, Показана суттєва роль стейфанівських потоків у процесі дифузії радіонуклідів і потреба врахування його при моделюванні динаміки процесу. Розрахунки за конвективно-дифузійною моделлю пояснюють експериментально встановлені швидкості виведення радіоізотопів з харчових продуктів в технологіях їх кулінарної обробки - вимочування, бланшування, подвійне варіння.

Надані приклади технологічних рішень доводять ефективність такого підходу у наукових дослідженнях та демонструють потенціал моделювання для оптимізації харчових технологій.

Література

1. Закон України «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів»: наук.-практ. комент. Київ, 2018. 160 с.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80/uk>
2. Норми радіаційної безпеки України. НРБУ-97. К.: МОЗ, 1997. 121с.
<http://www.insc.gov.ua/docs/nrbu97.pdf>
3. Про затвердження державних санітарних правил "Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України" (ОСПУ). Верховна Рада України, док. z0552-05, чинний, поточна редакція від 23.12.2025
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05#>
4. Державні гігієнічні нормативи. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у продуктах харчування та питної води (ДР-2006) // Офіційний вісник України. – 2006. – № 29. – С. 142–150.
5. Попова Н. В., Арсеньєва Л. Ю., Мисюра Т. Г. Контроль якості та безпечності продукції галузі: Курс лекцій для студ. напряму 6.051701 "Харчові технології та інженерія" ден. та заоч. форм навч. — К.: НУХТ, 2012.175 с.
6. Анісімов І.О. Синергетика: навч. посіб. Київ: КНУ ім.Т.Г. Шевченка, 2006, 159с.
7. Герасимов О.І. Фізичні основи технологій захисту навколишнього середовища: підручник. Одеса: ОДЕКУ, 2023. – 168 с.
8. Герасимов О.І. Технології захисту навколишнього середовища: підручник/ Одеськ. держ. еколог. ун-т. Одеса: ТЕС, 2019. 268 с.
9. Герасимов О.І., Курятников В.В. Фізичне моделювання в технологіях водоочищення // Фізика аеродисперсних систем. 2023. №61. С.17-31.
DOI: <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.290835>

Дата надходження: 02.03.2026

Дата прийняття до друку: 17.04.2026

Дата публікації: 28.05.2026

V. V. Kuriatnykov

Modeling of mass transfer processes taking into account radionuclide diffusion in pores and convection during technological processing of food products

Summary

Given the high mobility of radionuclides in natural chains and their ability to accumulate in food products, the issue of effective technological purification of food products is becoming particularly relevant.

Food products can be considered a hierarchy of dispersed gaseous, liquid and solid phases, dispersed systems, most of which have a porous and fibrous structure, taking the form of foam, such as bread and bakery products.

The content of radionuclides in these structures can be changed by applying physical processes of mass transfer, which are the basis of the technologies of their culinary processing by soaking, boiling, salting, etc. Rationalization of technological processing of culinary products can significantly reduce its radioactivity and increase the level of food safety.

The aim of the study is to model mass transfer processes during technological and culinary processing of food products to reduce the content of radionuclides in them.

Radiation contaminants can be dissolved in water, and the processes of their neutralization can be associated with the rate of their removal through pores in mass transfer processes.

Within the framework of this approach, the mechanisms of physical processes accompanying the removal of radionuclides from food products are considered. These are the processes of internal diffusion of a salt solution of the radionuclide in individual pores that open onto the outer surface of the food product, as well as convective-diffusion mechanisms, including Stefan flows.

The modeling of mass transfer processes during the release of radioisotopes from food products into an aqueous solution in the technologies of their culinary processing has been performed. The processes of intraporous diffusion of the solution through capillary pores that extend to the outer surface of the food product have been considered. A mathematical expression for diffusion flows through these pores has been found.

It is shown that at regimes corresponding to the temperature treatment of food products in the processes of boiling, the dynamics of radioactive impurities in an aqueous solution is more accurately described by the convective-diffusion model. The significant role of Stefan flows in the diffusion process of radionuclides and the need to take it into account when modeling the dynamics of the process are shown.

Keywords: *radiation contamination, dispersed phase, diffusion, modeling.*