

**Пак Андрей Олегович**, канд. техн. наук, доц., кафедра фізики і енергетики, Харьковський державний університет харчів та торгівлі. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-00.

**Pak Andriy**, Ph.D., Associate Professor, Department of physics and energetics, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska Str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-00.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. В.М. Михайловим.  
Отримано 15.03.2015. ХДУХТ, Харків.*

УДК 664.951.2

## **ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ НА ЗМІНУ КОЕФІЦІЄНТА МАСОВІДДАЧІ ПІД ЧАС СОЛІННЯ РИБИ**

**О.В. Яковлев, Г.М. Постнов, В.О. Потапов**

*Розглянуто теоретичний вплив ультразвукових хвиль на зміну коефіцієнта масовіддачі під час соління риби. За результатами досліджень підтверджено інтенсифікувальний вплив накладання ультразвукових хвиль на перебіг процесу соління. Доведено, що коефіцієнт масовіддачі під час соління риби в полі ультразвукових хвиль залежатиме від швидкості звуку в тузлуці та амплітуди коливальної швидкості ультразвукової хвилі. Подальші дослідження в цьому напрямі дозволять отримати математичні залежності перебігу процесу зовнішнього масообміну та внутрішнього масопереносу під час соління риби в полі ультразвукових хвиль.*

**Ключові слова:** риба, соління, ультразвук, масообмін, масопередача, масовіддача.

## **ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МАССООТДАЧИ ПРИ ПОСОЛЕ РЫБЫ**

**О.В. Яковлев, Г.М. Постнов, В.О. Потапов**

*Рассмотрено теоретическое влияние ультразвуковых волн на изменение коэффициента массоотдачи при посоле рыбы. По результатам исследований подтверждено интенсифицирующее влияние наложения ультразвуковых волн на ход процесса посола. Доказано, что коэффициент массоотдачи при посоле рыбы в поле ультразвуковых волн будет зависеть от скорости звука в тузлуке и амплитуды колебательной скорости ультразвуковой волны. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят получить математические зависимости протекания процесса*

*внешнего массообмена и внутреннего массопереноса при посоле рыбы в поле ультразвуковых волн.*

**Ключевые слова:** *рыба, посол, ультразвук, массообмен, массопередача, массоотдача.*

## **EFFECT OF ULTRASONIC WAVES TO CHANGE MASS TRANSFER COEFFICIENTS AT SALTED FISH**

**O. Yakovliev, G. Postnov, V. Potapov**

*According to the research the influence of ultrasonic waves on the change of mass-transfer coefficient during fish salting was analysed. It is proved that the mass transfer coefficient during fish salting in the field of ultrasonic waves will depend on the speed of sound in the brine, and the amplitude of the vibrational velocity of the ultrasonic wave. In contrast, the mass-transfer coefficient under natural convection mass transfer coefficient in superposition of the ultrasonic waves is not dependent on the viscosity of the solution since there are inside the boundary layer convection acoustic streaming. Since the value of the speed of sound depends on the density and temperature of the brine, in terms of salting it is constant and the coefficient of mass transfer actually depends only on the amplitude of the vibrational velocity of ultrasonic waves. Further research in this area will provide mathematical dependences of the process of external and internal mass transfer in fish salting in ultrasonic field.*

**Keywords:** *fish, raw material, salting, ultrasound, mass transfer.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Соління риби за своєю сутністю є дифузійно-осмотичним процесом. У відповідності до теоретичних основ дослідження процесу рушійною силою його є наявність різниці в концентрації солі в тузлуці та рибній сировині. На швидкість просоловання впливають різні фактори, серед яких можна визначити наступні: спосіб внесення солі до продукту, температура тузлуку, температура продукту, концентрація солі в тузлуці, вологовміст у рибній сировині, жорсткість води, яка використовується для приготування тузлуку, геометричні розміри рибної сировини, що засолюється тощо [1]. Перелічені ознаки включають декілька варіантів кожний, у результаті чого надається можливість вибору технологічних показників процесу соління з урахуванням хімічного складу та технологічних властивостей сировини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основною умовою успішного консервування риби солінням є забезпечення контакту усієї поверхні з розчином кухонної солі. У залежності від виду консервування риби з кухонною сіллю розрізняють три способи соління – сухий, мокрий (тузлучний) і змішаний. Дифузійний процес соління риби розпочинається лише тоді, коли сіль знаходиться в

розчиненому вигляді. За умови сухого соління сіль розчиняється вологою, що є у продукті і після цього переміщується в середину рибної сировини. Тому найбільша швидкість просолювання спостерігається за умов застосування мокрого способу соління [2].

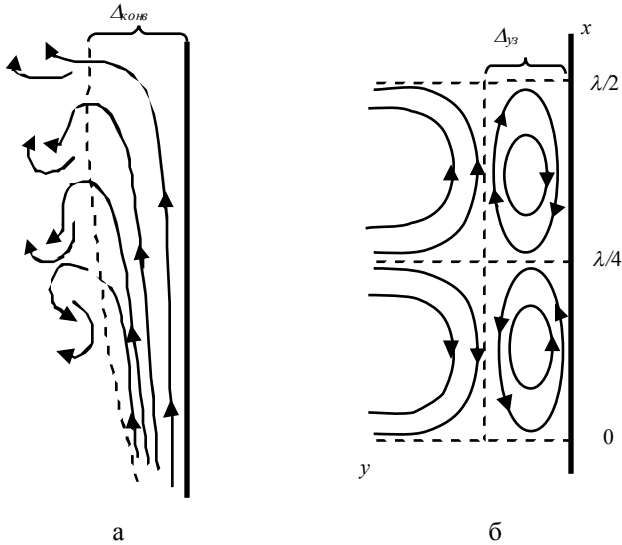
Сухий і змішаний способи використовують для соління оселедців, лососевих, тріскових і частикових риб; мокрий – для попередньої обробки риби, яку направляють на копчення, маринування або виготовлення консервів, а також малосолоної продукції з оселедців. Всі способи соління мають один недолік – значну тривалість самого дифузійного процесу, що обумовлено невисокими значеннями коефіцієнта масовіддачі. Із метою скорочення тривалості процесу соління необхідно забезпечити його інтенсифікацію, що можливо з накладанням ультразвукових хвиль.

**Мета статті** – обґрунтування зміни коефіцієнта масовіддачі під час соління риби за умови накладання ультразвукових хвиль.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Щоб визначити величину інтенсифікації зовнішнього масообміну у разі використання ультразвукових коливань необхідно порівняти значення коефіцієнтів масовіддачі під час соління риби в разі природної конвекції та конвекції в ультразвуковому полі. На сьогоднішній день таких даних у джерелах наукової літератури немає.

У найсуворішій постановці така задача зводиться до системи рівнянь Нав'є-Стокса та конвективної дифузії. Таке завдання, як відомо, є нелінійним і може бути вирішено тільки чисельно. Тому нижче наведено наближене рішення цієї задачі за наступних припущень:

- 1) розглядається плоска стаціонарна течія в прикордонному шарі (швидкість змінюється тільки за віссю  $y$ , рис. 1);
- 2) розподіл швидкості  $v_x(y)$  за віссю  $y$  відомо;
- 3) фізичні характеристики середовища – коефіцієнт дифузії, коефіцієнт в'язкості – не змінюються.



**Рис. 1. Схема конвективних потоків біля масообмінної поверхні:  
а – природна конвекція, б – конвекція в ультразвуковому полі**

У цьому випадку рівняння конвективної дифузії має вигляд:

$$v_x(y) \frac{dC}{dy} - D \frac{d^2C}{dy^2} = 0, \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація тузлуку,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $v_x(y)$  – швидкість течії вздовж осі  $x$ ,  $\text{м}/\text{с}$ ;  
 $D$  – коефіцієнт дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Коефіцієнт масовіддачі за визначенням залежить від градієнта концентрації на масообмінній поверхні та різниці концентрацій в об'ємі рідини та на поверхні тіла [3]

$$\beta = \frac{1}{C_\infty - C_n} D \left. \frac{dC}{dy} \right|_{y=0}, \quad (2)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі,  $\text{м}/\text{с}$ ;  
 $C_\infty$  – концентрація тузлуку в об'ємі розчину,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $C_n$  – концентрація тузлуку на поверхні риби,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\left. \frac{dC}{dy} \right|_{y=0}$  – градієнт концентрації на масообмінній поверхні, кг/м<sup>4</sup>.

Враховуючи, що за межами прикордонного шару завтовшки  $\Delta$  градієнти концентрацій і швидкостей потоку дорівнюють нулю, отримуємо такий вираз:

$$\beta = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} v_x(y) dy. \quad (3)$$

Остання формула є вихідною для розрахунку коефіцієнта масовіддачі як у випадку природної конвекції, так і у випадку конвекції в ультразвуковому полі. Наступним етапом є визначення конкретних значень  $v_x(y)$  і  $\Delta$  в цих випадках.

Виходячи з теорії процесу масопереносу можна отримати вираз для визначення коефіцієнта масовіддачі в умовах використання ультразвукових коливань. Скористаємося рішенням, отриманим Шліхтінгом [4] для поздовжньої швидкості акустичної течії в прикордонному шарі:

$$v_x(x, y) = -\frac{v_0^2}{4c_0} \left[ \frac{y}{\delta_{yz}} - \left( \frac{y}{\delta_{yz}} \right)^2 \right] \sin(2kx), \quad (4)$$

де  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильове число для ультразвукової хвилі, м<sup>-1</sup>;

$v_0$  – амплітуда коливальної швидкості ультразвукової хвилі, м/с.

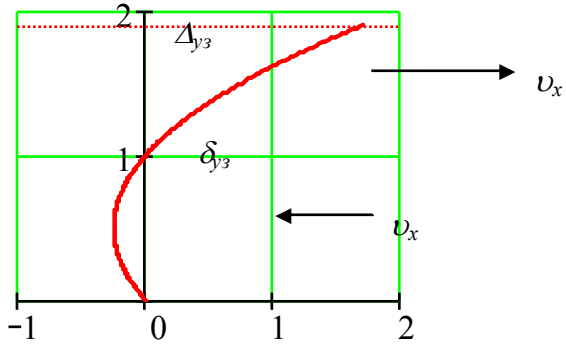
Згідно з цим рівнянням поздовжня швидкість акустичної течії періодично змінюється вздовж масообмінної поверхні, тому знайдемо її середнє значення на відстані  $\lambda/4$  (рис. 1б):

$$v_x(y) = -\frac{v_0^2}{4c_0} \left[ \frac{y}{\delta_{yz}} - \left( \frac{y}{\delta_{yz}} \right)^2 \right] \frac{4}{\lambda} \int_0^{\lambda/4} \sin(2kx) dx. \quad (5)$$

Після інтегрування одержуємо розподіл середньої швидкості акустичної течії за товщиною прикордонного шару

$$v_x(y) = -\frac{v_0^2}{2\pi c_0} \left[ \frac{y}{\delta_{y3}} - \left( \frac{y}{\delta_{y3}} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Згідно з останньою формулою акустична течія змінює свій напрямок при  $y = \delta_{y3}$  (рис. 2).



**Рис. 2. Профіль акустичної течії за товщиною прикордонного шару**

Цю обставину потрібно врахувати для коректного обчислення коефіцієнта масовіддачі в цьому випадку, а саме інтеграл у виразі (3) слід розбити на два інтервали без урахування зміни знака швидкості акустичної течії

$$\beta_{\text{ковн}} = \frac{1}{\Delta_{y3}} \left[ \int_0^{\delta_{y3}} |v_x(y)| dy + \int_{\delta_{y3}}^{\Delta_{y3}} |v_x(y)| dy \right]. \quad (7)$$

Підставляючи в (7) вираз для визначення швидкості акустичної течії (6), після інтегрування отримуємо:

$$\beta_{y3} = \frac{v_0^2}{12\pi c_0} \left[ \frac{2\delta_{y3}}{\Delta_{y3}} + \Delta_{y3} \frac{2\Delta_{y3} - 3\delta_{y3}}{\delta_{y3}^2} \right]. \quad (8)$$

З урахуванням того, що  $\Delta_{уз} \approx 1,9\delta_{уз}$ , отримуємо значення коефіцієнта масовіддачі в умовах використання ультразвукових коливань

$$\beta_{уз} = 0,068 \frac{v_0^2}{c_0}, \quad (9)$$

де  $c_0$  – швидкість звуку в середовищі (тузлуці), м/с.

**Висновки.** Таким чином, було проаналізовано вплив ультразвукових хвиль на зміну коефіцієнта масовіддачі під час соління риби. На відміну від коефіцієнта масовіддачі в умовах природної конвекції  $\beta_{уз}$  не залежить від в'язкості розчину, оскільки, як уже зазначалося, всередині прикордонного шару виникають конвекційні акустичні течії. Оскільки величина швидкості звуку  $c_0$  визначається щільністю та температурою тузлуку, то в умовах соління вона є постійною, і значення коефіцієнта масовіддачі залежить фактично лише від амплітуди коливальної швидкості ультразвукової хвилі.

#### Список джерел інформації / References

1. Postnov, G., Deynichenko, G., Chekanov, M., Chervonyi, V., Yakovliev, O. (2013), "Physicochemical Basis for Intensification of the Process of Salting Fish", *RECENT*, Vol. 14, No. 4(40), November, pp. 307-310.

2. Шляхи удосконалення способів соління рибної сировини океанічного походження / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний, О. В. Яковлев // Рибне господарство України. – 2013. – № 2. – С. 51–53.

Postnov, G.M., Chekanov, M.A., Chervonyi, V.N., Yakovliev, O.V. (2013), "Ways of improving methods of salting fish raw oceanic origin" ["Shlyakhy udoskonalennya sposobiv solinnya rybnoyi syrovyny okeanichnoho pokhodzhennya"], *Fishery Ukraine*, No. 2, pp. 51-53.

3. Лабай В.Й. Тепломасообмін : підручник / В. Й. Лабай. – Львів : Триада Плюс, 2007. – 260 с.

Labay, V. (2007), *Heat and Mass Transfer [Teplomasoobmin]*, Triada Plus, L'viv, 260 p.

4. Мощные ультразвуковые поля / под ред. проф. Л. Д. Розенберга. – М. : Наука, 1968. – 265 с.

Rozenberg, L.D. (1968), *Powerful ultrasonic fields [Moshhnye ultrazukovoye polja]*, Nauka, Moscow, 265 p.

**Яковлев Олег Владимирович**, ст. викл., здобувач, кафедра технології та хімії морепродуктів, Керченський державний морський технологічний університет. Адреса: вул. Орджонікідзе, 82, м. Керч, Україна, 98300. Тел.: (057)349-45-56, e-mail: yakoleg@mail.ru.

**Яковлев Олег Владимирович**, ст. преп., соискатель, кафедра технологии и химии морепродуктов, Керченский государственный морской технологический университет. Адрес: ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, Украина, 98300. Тел.: (057)349-45-56, e-mail: yakoleg@mail.ru.

**Yakovliev Oleg**, Senior Instructor, seeker of Candidate of Technical Sciences, Department of technology and chemistry of marine products, Kerch State Marine Technical University. Address: Ordzhonikidze str., 82, Kerch, Ukraine, 98300. Tel.: (057)349-45-56, e-mail: yakoleg@mail.ru.

**Постнов Геннадій Михайлович**, канд. техн. наук, проф., кафедра устаткування харчової і готельної індустрії ім. М.І. Беляєва, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-56, e-mail: oborud.hduht@gmail.com.

**Постнов Геннадий Михайлович**, канд. техн. наук, проф., кафедра оборудования пищевой и гостиничной индустрии им. М.И. Беляева, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-56, e-mail: oborud.hduht@gmail.com.

**Postnov Gennady**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of food and hotel industry equipment named after M.I. Belyaev, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-56, e-mail: oborud.hduht@gmail.com.

**Потапов Володимир Олексійович**, д-р техн. наук, проф., факультет обладнання та технічного сервісу, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (067)349-45-88; e-mail: potapov@bigmir.net.

**Потапов Владимир Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., факультет оборудования и технического сервиса, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (067)349-45-88; e-mail: potapov@bigmir.net.

**Potapov Vladimir**, Chair of refrigerating and trade equipment; Dr. of technical sciences, Professor, Kharkiv state university of food technology and trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel: (057)349-45-88; e-mail: potapov@bigmir.net.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. Г.В. Дейниченком.  
Отримано 15.03.2015. ХДУХТ, Харків.*