

УДК: 641.1:681.2.081(083)

**О.М. СКАРБОВІЙЧУК**, кандидат технічних наук, доцент  
**В.О. ОВЧАРУК**, кандидат технічних наук, доцент  
 Національний університет харчових технологій  
**В.Г. ФЕДОРОВ**, доктор технічних наук, професор  
 Уманський державний аграрний університет

## ЕМПІРИЧНІ ФУНКЦІЇ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗЧИНІВ NaCl ВІД ТЕМПЕРАТУРИ І КОНЦЕНТРАЦІЇ

Визначені емпіричні функції теплофізичних характеристик (ТФХ) водних розчинів NaCl від температури (на інтервалі: від температури замерзання до 30 °С) і концентрації (від 0 (нуль) до 23,1 %) за даними із літературних джерел.

**Ключові слова:** теплофізичні характеристики, водний розчин, хлористий натрій, NaCl.

Определены эмпирические функции теплофизических характеристик (ТФХ) водных растворов NaCl от температуры (на интервале: от температуры замерзания до 30 °С) и концентрации (от 0 (нуль) до 23,1 %) по данным из литературных источников.

**Ключевые слова:** теплофизические характеристики, водный раствор, хлористый натрий, NaCl.

Харчова промисловість є однією із галузей широко-го використання водних розчинів хлористого натрію для різноманітних потреб, серед яких визначимо одну — як теплоносія в теплообмінних апаратах [1—3], через велику масову теплоємність, низькі температури замерзання та безпеку прямого контакту розчину з продуктами харчування.

З боку зазначеної потреби проаналізовано залежність ТФХ розчину хлористого натрію за нормального атмосферного тиску, на інтервалі від температури замерзання  $t_3$  до 30 °С і концентрації  $\xi$  від 0 (нуль) до 23,1 %.

ТФХ розчину визначають інтенсивність процесів гідродинаміки та теплопередачі в теплообмінних апаратах, тому при конструюванні та експлуатації таких апаратів числові значення характеристик для заданих температур і концентрацій визначаються із таблиць довідників чи інших літературних джерел.

Прагнення до створення високоефективного теплообмінного обладнання вимагає математичного моделювання його конструкції та перебігу відтворюваних в ньому процесів. Такі моделі, за умови використання комп'ютерної техніки і відповідного програмного забезпечення, дозволяють виконувати розрахунково-кількісні експерименти з досліджуванним апаратом і обирати оптимальні конструкцію та режим його роботи. Під час виконання розрахунків виникає потреба багаторазового використання значень ТФХ для різних варіацій температури і концентрації використаного розчину. Процедура пошуку цих значень в таблицях алгоритмічно громіздка і потребує великих витрат машинного часу на її виконання.

З метою спрощення алгоритму обчислення ТФХ водних розчинів автори узагальнили за довідниковими даними [4, 5] найважливіші із них у вигляді емпіричних функцій від температури  $t$  і концентрації  $\xi$ : густини

$\rho(t, \xi)$ , кг/м<sup>3</sup>; ізобарної масової теплоємності  $c_p(t, \xi)$ , Дж/(кг | К); теплопровідності  $\lambda(t, \xi)$ , Вт/(м | К); динамічної в'язкості  $k(t, \xi)$ , Па | с. За потреби, інші ТФХ можна обчислити за відомими співвідношеннями.

Для визначення емпіричних функцій ТФХ розчину від температури і концентрації будували за довідниковими даними окремі графіки залежності кожної характеристики від температури і від концентрації, а за виглядом кривих підбирали емпіричну функцію.

Температура замерзання  $t_3$  розчину залежить від його концентрації, тому для обчислення ТФХ розчинів заданих температури  $t$  і концентрації  $\xi$  потрібно мати залежність температури замерзання  $t_3(\xi)$  розчину від заданої концентрації  $\xi$ , щоб не припуститися помилки, обчислюючи ТФХ розчину, який за заданих концентрації  $\xi$  і температури  $t$  має замерзнути.

За наведеними в [5] експериментальними даними побудовано графік залежності температури замерзання розчину  $t_3$  °С від його концентрації  $\xi$ , %, представлений на рис. 1. Він має вигляд параболи, тому емпіричною функцією обрано квадратичний поліном:

$$t_3(\xi) = -0,0181 \cdot \xi^2 - 0,479 \cdot \xi + 0,22 \quad (1)$$

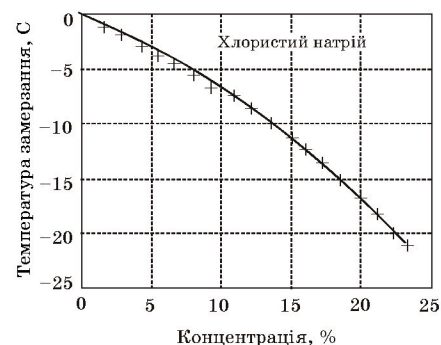


Рис.1. Залежність температури замерзання від концентрації розчину (символ +) — довідникові дані, (суцільна крива) — емпірична функція.

Таким чином, для обчислення значень перерахованих вище ТФХ розчину із заданою концентрацією  $\xi$ , потрібно за виразом (1) обчислити його температуру замерзання  $t_z(\xi)$  і, якщо  $t_z(\xi)$  менша за задану температуру  $t$  визначення ТФХ, то за відповідною емпіричною залежністю обчислюється потрібна ТФХ.

На рис. 2 представлені графіки залежності густини  $\rho$  розчину від температури  $t$  при сталих концентраціях і від концентрації  $\xi$  при сталих температурах, побудовані за даними із [4]. Із графіків видно, що густина розчину  $\rho(t, \xi)$  лінійно залежить і від температури, зменшуючись пропорційно її підвищенню, і від концентрації, збільшуючись пропорційно її збільшенню. Тому для аналітичного описання залежності густини розчину від температури  $t$  і концентрації  $\xi$  обрано лінійний поліном:

$$\rho(t, \xi) = -0,358 \cdot T + 7,746 \cdot \xi + 1099, \quad (2)$$

де  $T = (t + 273,15)$ .

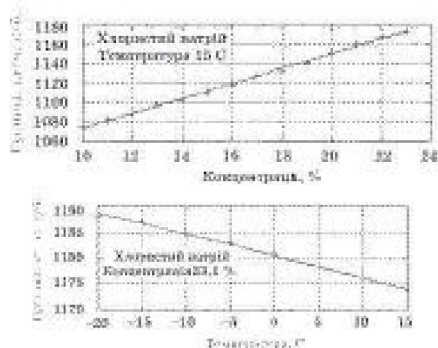


Рис. 2. Залежність густини розчину від концентрації і температури (символ +) — довідникові дані, (суцільна крива) — емпірична функція.

Максимальна відносна похибка обчислення густини розчину за емпіричною функцією (2) дорівнює 0,5 %.

Для визначення емпіричної функції залежності ізобарної масової теплоємності  $c_p$  від температури  $t$  і концентрації  $\xi$  за даними із [4] також були побудовані відповідні графіки, які представлені на рис. 3. За виглядом кривих на графіках можна прийняти, що на зазначених інтервалах температури і концентрації, ця характеристика розчину також лінійно залежить від температури і концентрації, тому її поведінку описує (з найбільшою відносною похибкою 1,4 %) теж лінійний поліном:

$$c_p(t, \xi) = 0,778 \cdot T - 32,177 \cdot \xi + 3837 \quad (3)$$

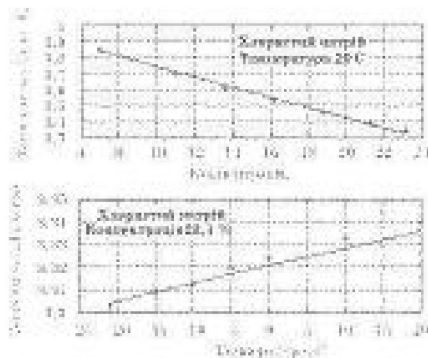


Рис. 3. Залежність теплоємності розчину від концентрації і температури (символ +) — довідникові дані, (суцільна крива) — емпірична функція.

Експериментальні вимірювання теплоємності водних розчинів хлористого натрію різних концентрацій на широкому інтервалі температур від 20 до 200 °С, наведені в [7], свідчать про нелінійну залежність теплоємності від температури. Але на жаль, результати цих досліджень представлені тільки графічно, тому побудувати емпіричну залежність за цими даними неможливо.

На графіках, представлених на рис. 4, за даними із [4], видно, що в зазначеній області визначення, теплопровідність  $\lambda$  збільшується з підвищенням температури і пропорційно зменшується зі збільшенням концентрації розчину, тому емпіричною функцією для обчислення теплопровідності  $\lambda(t, \xi)$  обрано лінійний поліном:

$$\lambda(t, x) = 2,317 \cdot 10^{-3} \cdot T - 2,11 \cdot 10^{-3} \cdot \xi - 0,055 \quad (4)$$

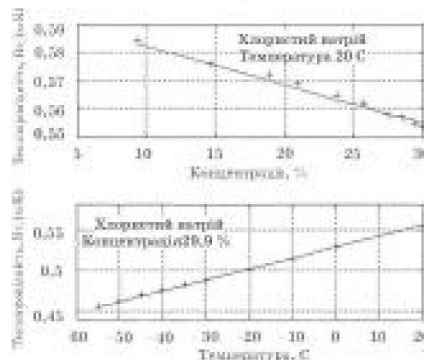


Рис. 4. Залежність теплопровідності розчину від концентрації і температури (символ +) — довідникові дані, (суцільна крива) — емпірична функція.

Відносна похибка визначення величини  $\lambda(t, \xi)$  за поліномом (4) не перевищує 2 %.

Слід зауважити, що емпіричні функції (3) і (4) допускають зазначені найбільші похибки при обчисленні відповідних характеристик розчинів, коли температура розчину близька до температури замерзання води, де найбільше проявляється її аномальна поведінка. Використовуючи поліном другого порядку, можна отримати більш точні емпіричні функції, але, в такому випадку, значно ускладниться вигляд функції та її використання.

Криві динамічної в'язкості  $k$ , побудовані за даними із [4] (рис. 5), свідчать про показникову функцію залежності цієї характеристики розчину від обох аргументів: температури  $t$  і концентрації  $\xi$ . Щоб надати зручну емпіричну функцію для обчислення значень цієї властивості, її залежність від температури і концентрації подано у такому вигляді:

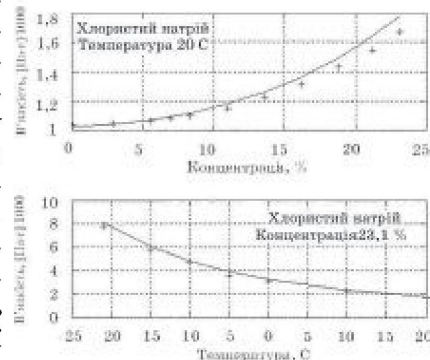


Рис. 5. Залежність в'язкості розчину від концентрації і температури (символ +) — довідникові дані, (суцільна крива) — емпірична функція.



$$\ln(k \cdot 10^4) = 41,091 - 0,243 \cdot T + \\ + 3,131 \cdot 10^{-3} \cdot \xi + 3,778 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 9,109 \cdot 10^{-4} \cdot \xi^2 \quad (5)$$

Відносна похибка обчислення значень динамічної в'язкості  $k$  на зазначених інтервалах температури і концентрації складає не більше 5 %.

**Висновок.** Наведені емпіричні функції (1) — (5) є не тільки засобом кількісного обчислення розглянутих теплофізичних характеристик розчину хлористого натрію, але й розкривають фізичну картину впливу температури  $t$  і концентрації  $\xi$  на властивості розчину. Вони значно спрощують алгоритми програмного забезпечення для комп'ютерного проектування оптимальних процесів і обладнання харчової промисловості.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Титлов А.С., Завертаный В.В., Проць Р.Н.* Разработка холодильников для непрерывной холодильной цепи в условиях фермерских и крестьянских хозяйств Украины. Молочна промисловість, 2008, № 1 (№44), с. 60—65.

2. *Федоров В.Г., Пахомов В.Н., Штыхир В.С., Карпенский И.М.* Теплопроводность насыщенного раствора поваренной соли в смеси с кристаллами. /В кн. Реферативная информация о НИР в вузах УССР. Пищевая промышленность, Киев: Вища школа. 1978, вып. 13, с. 43—44.

3. *Ересько Г.А., Скарбовийчук А.М.* Оптимизация режимов работы скребковых охладителей. Молочная промышленность, 1982, № 6, с. 21—23.

4. *Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянова А.В.* Холодильная техника. Свойства веществ, Справочник. Л.: «Машиностроение», 1976. с.166.

5. *Чубик И.А., Маслов А.М.* Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: «Пищевая промышленность», 1970. с.184.

6. *Пепинов Р.И., Лобкова Н.В., Панахов И.А.* Влияние температуры и давления на вязкость раствора хлористого натрия. /В кн. Теплообмен и теплофизические свойства воды, водного пара и органических веществ. — М.: ЭНИМ, 1974. Вып.46. с 42 — 47.

7. *Юсуфова В.Д., Пепинов Р.И., Туаев Т.Д.* Исследование теплоемкости  $c_p$  растворов NaCl. /В кн. Теплообмен и теплофизические свойства воды, водного пара и органических веществ. — М.: ЭНИМ, 1974. Вып.46. с 52—56.