

## ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 66.023:006.354

АНДРЕЄВ І. А.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКУ ТРУБНОЇ РЕШІТКИ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛОБМІННОГО АПАРАТА НА МІЦНІСТЬ

Метою роботи є удосконалення розрахунку трубної решітки кожухотрубного теплообмінника на міцність, який нормується чинним в Україні міждержавним стандартом. На основі стандартних таблиць побудовано і проаналізовано точкові графіки зміни коефіцієнтів, що враховують підтримуючий вплив труб  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  залежно від безрозмірного параметра системи решітка – труби  $\omega$  і залежність коефіцієнта жорсткості перфорованої плити  $\psi_0$  від коефіцієнта впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору  $\eta_T$ . Запропоновано апроксимувати ці залежності нескладними математичними рівняннями. Отримані формули дозволяють при виконанні розрахунків відмовитись від використання стандартних таблиць, додаткової інтерполяції проміжних значень коефіцієнтів  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  і  $\psi_0$ , що в свої чергу спрощує як сам розрахунок, так і розробку відповідних комп'ютерних програм. Середнє значення похибок виконаних апроксимацій при цьому знаходиться в діапазоні від 0 % до 2,05 %, що свідчить про високий рівень збігу рівнянь регресії з фактичними величинами.

**Ключові слова:** кожухотрубний теплообмінник, трубна решітка, розрахунок на міцність.

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2023.283515

\*Corresponding author: Andreiev@ukr.net

Received 02 May 2023; Accepted 08 June 2023

**Постановка проблеми.** Спрощені розрахунки кожухотрубних теплообмінників або окремих їх елементів на міцність надаються багатьма авторами [1–5]. Чинним діючим нормативним документом, за яким повинен виконуватися розрахунок кожухотрубних теплообмінних апаратів, є ГОСТ 34233.7 [6], який був введений вперше у 2018 році. Відповідно до цього стандарту умові статичної міцності трубної решітки повинна відповідати залежність

$$\max\{\tau_{p1}; \tau_{p2}\} \leq 0,8[\sigma]_P,$$

де  $\tau_{p1}$  – дотичні напруження в трубній решітці в місці з'єднання з кожухом, МПа;  $\tau_{p2}$  – дотичні напруження в перфорованій частині трубної решітки, МПа;  $[\sigma]_P$  – допустиме напруження для матеріалу решітки при розрахунковій температурі, МПа.

Розрахунок дотичних напружень  $\tau_{p1}$  і  $\tau_{p2}$  потребує визначення допоміжних величин, серед яких коефіцієнти, що враховують підтримуючий вплив труб  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  і коефіцієнт жорсткості перфорованої плити  $\psi_0$  обираються з таблиць [6, 7]. Коефіцієнти  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  були отримані за допомогою громіздких залежностей, які вміщують функції Бесселя-Кельвіна і подаються у міждержавному стандарті окремими величинами залежно від безрозмірного параметра системи решітка – труби  $\omega$  у діапазоні змінювання від 0 до 11 спочатку з кроком 0,5, а далі з кроком 1. Коефіцієнт  $\psi_0$  наводиться у діапазоні змінювання коефіцієнта впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору  $\eta_T$  від 0,40 до 0,85 з кроком 0,05. При цьому проміжні значення коефіцієнтів  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  і  $\psi_0$  визначають інтерполяцією, що потребує звертання до таблиць і ускладнює розробку комп'ютерних програм розрахунку.

Тому виникає потреба у спрощені методики розрахунку трубної решітки, а конкретно – у використанні простих формул для розрахунку коефіцієнтів  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  і  $\psi_0$  без використання довідкових таблиць, що і реалізується у статті.

**Аналіз попередніх досліджень.** За стандартною методикою [6] при розрахунку кожухотрубних теплообмінників товщина трубної решітки спочатку вибирається довільно з подальшою перевіркою. У посібнику [7] було запропоновано формулу для розрахунку початкової товщини трубної решітки, що зменшує

кількість послідовних наближень. Інших пропозицій щодо удосконалення розрахунків на міцність за час після введення стандарту запропоновано не було. Тому невирішеною частиною наукової проблеми є апроксимування залежностей  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  від  $\omega$  і  $\psi_0$  від  $\eta_T$  простими рівняннями, які б були зручними як для інженерних розрахунків, так і для розробки комп'ютерних програм.

**Метою** статті є опис залежностей коефіцієнтів, що враховують підтримуючий вплив труб  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  від безрозмірного параметра системи решітка – труби  $\omega$  і залежність коефіцієнта жорсткості перфорованої плити  $\psi_0$  від коефіцієнта впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору  $\eta_T$  простими математичними рівняннями з середньою похибкою апроксимації не більше 2,5 %.

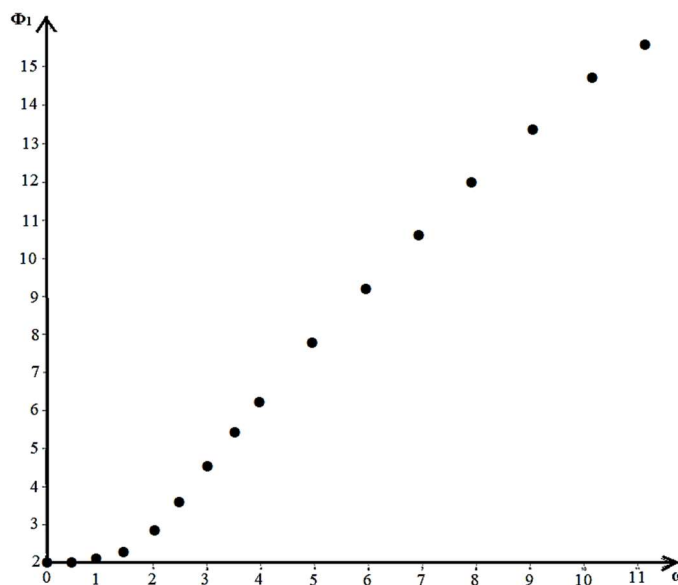
**Виклад основного матеріалу.** Значення коефіцієнтів, що враховують підтримуючий вплив труб  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ , наведено у таблиці 1.

**Таблиця 1 – Коефіцієнти, що враховують підтримуючий вплив труб  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  [6]**

$\omega$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Phi_1$	2	2,0	2,06	2,28	2,79	3,58	4,5	5,39	6,19	7,65	9,08	10,51	11,94	13,36	14,78	$\sqrt{2}\omega$
$\Phi_2$	0	0,02	0,19	0,62	1,32	2,16	2,94	3,59	4,13	5,13	6,15	7,17	8,19	9,2	10,21	$\omega$
$\Phi_3$	0	0,19	0,76	1,65	2,75	3,76	4,65	5,36	6,03	7,38	8,81	10,24	11,66	13,08	14,5	$\sqrt{2}\omega$

Запропоновано апроксимувати залежності коефіцієнтів  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  від параметра  $\omega$  нескладними рівняннями, для чого були побудовані і проаналізовані точкові графіки  $\Phi_1 = f_1(\omega)$ ,  $\Phi_2 = f_2(\omega)$ ,  $\Phi_3 = f_3(\omega)$  за даними табл. 1.

Точковий графік  $\Phi_1 = f_1(\omega)$ , побудований за табл. 1, наведено на рис. 1.



**Рис. 1 – Точковий графік залежності  $\Phi_1 = f_1(\omega)$**

Для більш точного опису залежності  $\Phi_1 = f_1(\omega)$  математичним рівнянням розглянемо окремо 2 ділянки: 1 – в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0 до 3 (рис. 2) і 2 – в діапазоні змінювання  $\omega$  від 3 до 11 (рис. 3).

В результаті було запропоновано застосувати для опису залежності  $\Phi_1 = f_1(\omega)$  в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0 до 3 кубічну регресію  $\Phi_1 = 0,0422\omega^3 + 0,2305\omega^2 - 0,2367\omega + 2,0179$  (середня похибка апроксимації дорівнює 1,07 %), а при змінюванні  $\omega$  від 3 до 11 – квадратичну регресію  $\Phi_1 = -0,0286\omega^2 + 1,8012\omega - 0,6171$  (середня похибка апроксимації дорівнює 0,82 %).

Аналогічно проаналізуємо залежності  $\Phi_2 = f_2(\omega)$  і  $\Phi_3 = f_3(\omega)$ .

Точковий графік  $\Phi_2 = f_2(\omega)$  наведено на рис. 4.

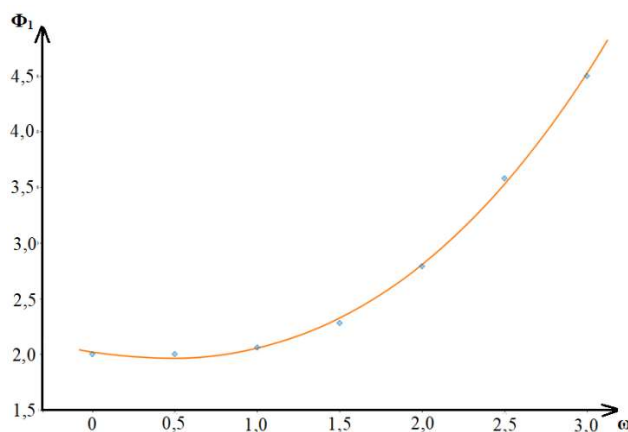


Рис. 2 – Залежність  $\Phi_1 = f_1(\omega)$  в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0 до 3

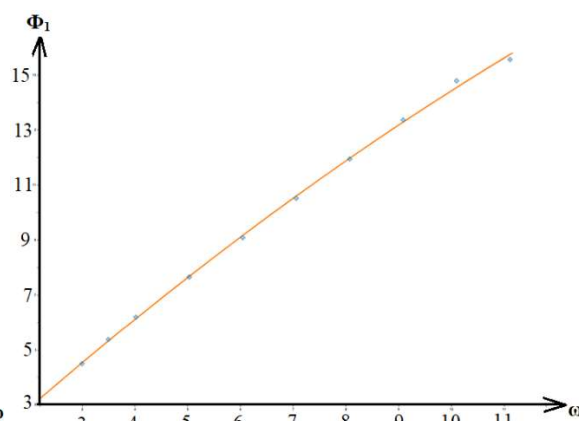


Рис. 3 – Залежність  $\Phi_1 = f_1(\omega)$  в діапазоні змінювання  $\omega$  від 3 до 11

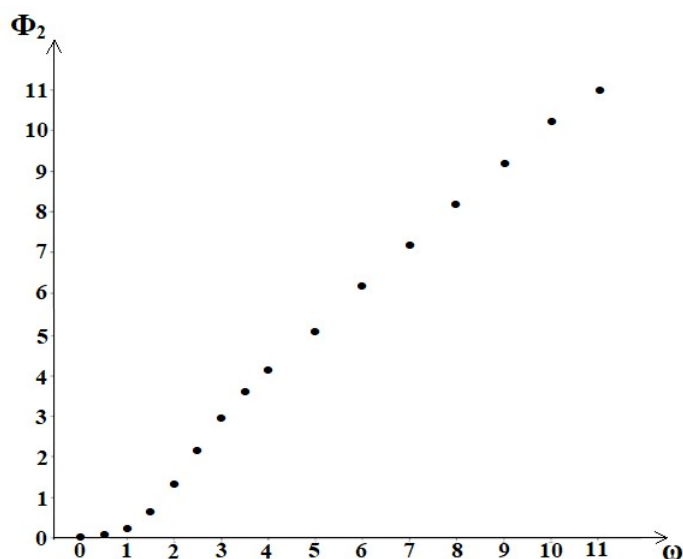


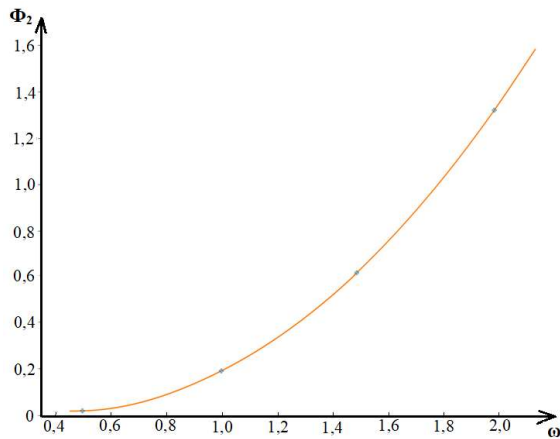
Рис. 4 – Точковий графік залежності  $\Phi_2 = f_2(\omega)$

Для опису змінювання коефіцієнта  $\Phi_2$  запропоновано такі ділянки: перша – в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0 до 0,5, друга – в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0,5 до 2 (рис. 5) і третя – в діапазоні змінювання  $\omega$  від 2 до 11 (рис. 6).

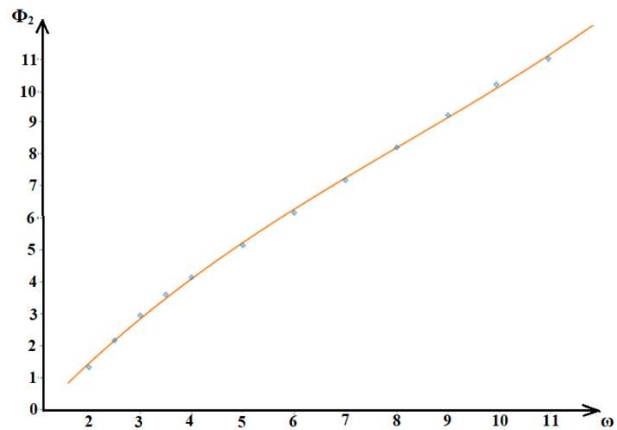
В цьому випадку залежність  $\Phi_2 = f_2(\omega)$  в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0 до 0,5 через незначну зміну функції можна описати лінійним рівнянням  $\Phi_2 = 0,04\omega$ , при змінюванні  $\omega$  від 0,5 до 2 – кубічною регресією  $\Phi_2 = 0,0133\omega^3 + 0,48\omega^2 - 0,4033\omega + 0,1$  (середня похибка апроксимації дорівнює 0 %), а при змінюванні  $\omega$  від 2 до 11 – кубічною регресією  $\Phi_2 = 0,0046\omega^3 - 0,1129\omega^2 + 1,8692\omega - 1,8821$  (середня похибка апроксимації дорівнює 2,05 %).

Точковий графік  $\Phi_3 = f_3(\omega)$  наведено на рис. 7.

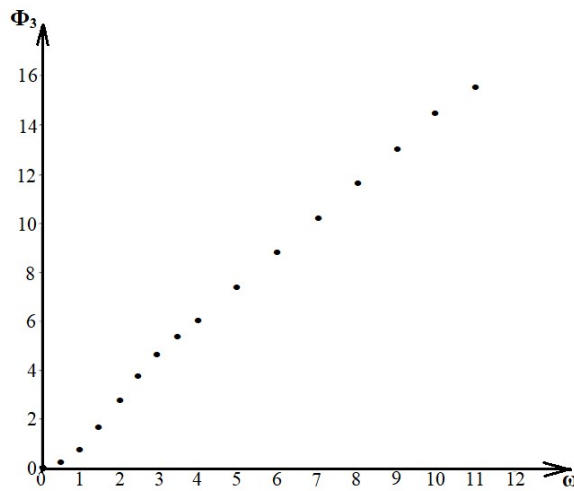
Для опису змінювання коефіцієнта  $\Phi_3$  запропоновано 3 ділянки: перша – в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0 до 0,5, друга – в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0,5 до 3 (рис. 8) і третя – в діапазоні змінювання  $\omega$  від 3 до 11 (рис. 9).



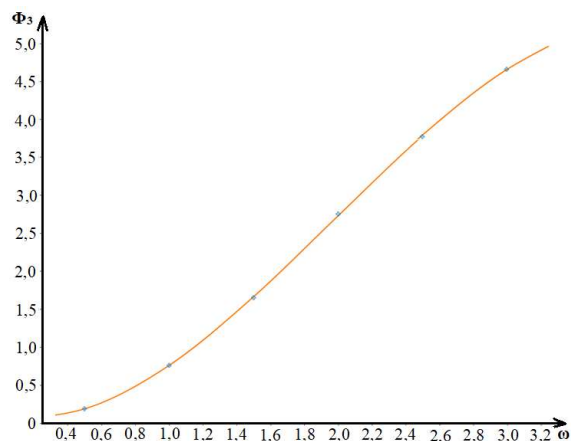
**Рис. 5 – Залежність  $\Phi_2 = f_2(\omega)$  в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0,5 до 2**



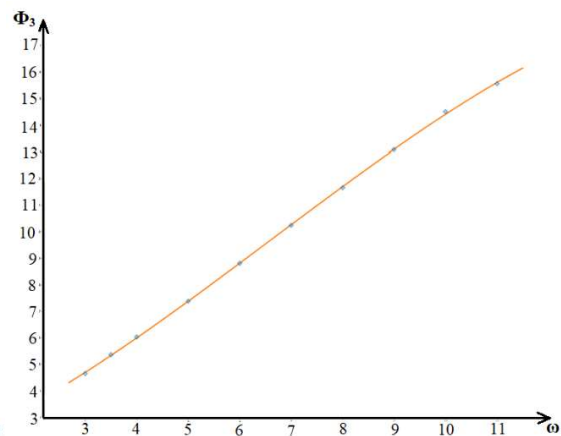
**Рис. 6 – Залежність  $\Phi_2 = f_2(\omega)$  в діапазоні змінювання  $\omega$  від 2 до 11**



**Рис. 7 – Точковий графік залежності  $\Phi_3 = f(\omega)$**



**Рис. 8 – Залежність  $\Phi_3 = f_3(\omega)$  в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0,5 до 3**



**Рис. 9 – Залежність  $\Phi_3 = f_3(\omega)$  в діапазоні змінювання  $\omega$  від 3 до 11**

Залежність  $\Phi_3 = f_3(\omega)$  в діапазоні змінювання  $\omega$  від 0 до 0,5 описується лінійним рівнянням  $\Phi_3 = 0,38\omega$ , при змінюванні  $\omega$  від 0,5 до 3 – кубічною регресією  $\Phi_3 = -0,2296\omega^3 + 1,3541\omega^2 - 0,4884\omega + 0,1233$  (середня похибка апроксимації дорівнює 0,47 %), а при змінюванні  $\omega$  від 3 до 11 – кубічною регресією  $\Phi_3 = -0,0054\omega^3 + 0,1060\omega^2 + 0,7576\omega + 1,6129$  (середня похибка апроксимації дорівнює 0,37 %).

Коефіцієнт жорсткості перфорованої плити  $\psi_0$  залежить від коефіцієнта впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору  $\eta_T$  і визначається за табл. 2.

Табл. 2 – Коефіцієнт жорсткості перфорованої плити  $\psi_0$  [6]

$\eta_T$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
$\psi_0$	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,37	0,44	0,51	0,59	0,68

Дискретну табличну залежність  $\psi_0$  від  $\eta_T$  можна апроксимувати кубічною регресією  $\psi_0 = -0,3419\eta_T^3 + 1,8834\eta_T^2 - 0,6915\eta_T + 0,1153$  (рис.10). При цьому середня похибка апроксимації становить 1,04 %

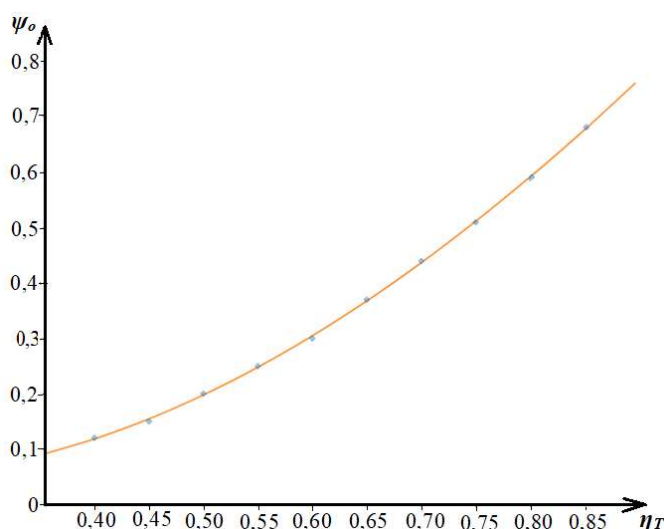


Рис. 10 – Графік залежності  $\psi_0 = f(\eta_T)$

**Висновки.** Отримані формули для розрахунку коефіцієнтів, що враховують підтримуючий вплив труб  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  і коефіцієнта жорсткості перфорованої плити  $\psi_0$ , які пропонуються використовувати при перевірці умов статичної міцності трубної решітки кожухотрубного теплообмінника. Максимальне значення похибки апроксимації при цьому дорівнює 2,05 %, що свідчить про високий рівень збігу рівнянь регресії з фактичними величинами. Використання наведеного удосконалення сприяє спрощенню розрахунку кожухотрубних теплообмінників на міцність.

**Перспективи подальших досліджень.** В подальшому планується продовжити роботу з удосконалення розрахунку на міцність елементів посудин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв.

#### Список використаної літератури

1. Андреев І. А., Мікульонюк І. О. Розрахунок лінзових і сильфонних компенсаторів: навч. посіб. Київ: Політехніка, 2008. 88 с.
2. Шевель Є. В. Теплообмінні апарати та теплоносії: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 164 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46170>.
3. Смірнова О. С., Опарін С. О., Біла А. А. Розрахунок кожухотрубного теплообмінника-підігрівача: метод. вказ. Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2008. 38 с. URL: [https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/08/Paht\\_1627.pdf](https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/08/Paht_1627.pdf).
4. Ринкова Т. О., Баб'як В. П., Шкляр В. І. Кожухотрубний теплообмінник: метод. вказ. Київ: Політехніка, 2005. 49 с.
5. Бойко В. С., Буденко С. Ф. Розрахунок параметрів кожухотрубного теплообмінного апарата: метод. вказ. Мелітополь: Таврійський державний агротехнологічний університет, 2016. 18 с. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/>

[/ophv/wp-content/uploads/sites/13/rozrakhunok-parametriv-kozhuhotrubnoho-teploobminnoho-aparata.pdf](#).

- ГОСТ 34233.7-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Теплообменные аппараты. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2018-08-01]. Вид. офіц. М.: Стандартинформ, 2018. 54 с.
- Андреев Игор. Конструювання і розрахунок кожухотрубних теплообмінників: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 140 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50426>.

**Igor Andreiev**

## IMPROVEMENT OF THE STRENGTH CALCULATION OF THE TUBE PLATE OF THE SHELL-TUBE HEAT EXCHANGER

*The purpose of the article is to improve the strength calculation of the tube plate of the shell-and-tube heat exchanger, which is regulated by the interstate standard in force in Ukraine.*

*On the basis of standard tables, dot plots of the change in coefficients were constructed and analyzed, which take into account the supporting effect of pipes  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  depending on the dimensionless parameter of the board-pipe system  $\omega$  and the dependence of the stiffness coefficient of the perforated board  $\psi_0$  on the coefficient of pressure effect on the tube plate from the side of the tube space  $\eta_T$ . It is proposed to approximate these dependencies with simple mathematical equations.*

*As a result, it was proposed to use the cubic regression  $\Phi_1 = 0,0422\omega^3 + 0,2305\omega^2 - 0,2367\omega + 2,0179$  to describe the dependence of  $\Phi_1 = f_1(\omega)$  in the range of  $\omega$  from 0 to 3 and when changing  $\omega$  from 3 to 11, apply quadratic regression  $\Phi_1 = -0,0286\omega^2 + 1,8012\omega - 0,6171$ . The dependence of  $\Phi_2 = f_2(\omega)$  in the range of changing  $\omega$  from 0 to 0,5 due to a slight change in the function can be described by the linear equation  $\Phi_2 = 0,04\omega$ , when changing  $\omega$  from 0,5 to 2 - by the cubic regression  $\Phi_2 = 0,0133\omega^3 + 0,48\omega^2 - 0,4033\omega + 0,1$ , and when changing  $\omega$  from 2 to 11 - by cubic regression  $\Phi_2 = 0,0046\omega^3 - 0,1129\omega^2 + 1,8692\omega - 1,8821$ . The dependence  $\Phi_3 = f_3(\omega)$  in the range of  $\omega$  change from 0 to 0,5 is described by the linear equation  $\Phi_3 = 0,38\omega$ , when  $\omega$  changes from 0,5 to 3 - by cubic regression  $\Phi_3 = -0,2296\omega^3 + 1,3541\omega^2 - 0,4884\omega + 0,1233$ , and when  $\omega$  changes from 3 to 11 - cubic regression  $\Phi_3 = -0,0054\omega^3 + 0,1060\omega^2 + 0,7576\omega + 1,6129$ . The discrete tabular dependence of  $\psi_0$  on  $\eta_T$  can be approximated by cubic regression  $\psi_0 = -0,3419\eta_T^3 + 1,8834\eta_T^2 - 0,6915\eta_T + 0,1153$ .*

*The obtained formulas make it possible to abandon the use of standard tables and additional interpolation of intermediate values of the coefficients  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  and  $\psi_0$  when performing calculations, which in turn simplifies both the calculation itself and the development of appropriate computer programs.*

*The average value of the errors of the performed approximations is in the range from 0% to 2.05%, which indicates a high level of coincidence of the regression equations with the actual values.*

*The use of the proposed formulas for the dependences of the coefficients  $\Phi_1 = f_1(\omega)$ ,  $\Phi_2 = f_2(\omega)$ ,  $\Phi_3 = f_3(\omega)$  and  $\psi_0 = f(\eta_T)$  makes it possible to simplify the calculation of the tube plate of shell-and-tube heat exchangers for strength.*

**Keywords:** shell-and-tube heat exchanger, tube grid, strength calculation.

### References

- Andreiev I. A., Mikulonok I. O. (2008). Rozrakhunok linzovykh i sylfonnykh kompensatoriv: navch. posib. Kyiv: Politehnika [In Ukrainian].
- Shevel Ye. V. (2022). Teploobminni aparaty ta teplonosii: navch. posib. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46170> [In Ukrainian].
- Smirnova O. S., Oparin S. O., Bila A. A. (2008). Rozrakhunok kozhuhotrubnoho teploobminnyka-pididhrivacha: metod. vказ. Dnipropetrovsk: DVNZ UDKhTU. URL: [https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/08/Paht\\_1627.pdf](https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/08/Paht_1627.pdf) [In Ukrainian].
- Rynkova T. O., Babiak V. P., Shkliar V. I. (2005). Kozhuhotrubnyi teploobminnyk: metod. vказ. Kyiv: Politehnika [In Ukrainian].
- Boiko V. S., Budenko S. F. Rozrakhunok parametriv kozhuhotrubnoho teploobminnoho aparata: metod. vказ. Melitopol: Tavriyskiy derzhavnyi ahrotekhnolohichniy universytet. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/rozrakhunok-parametriv-kozhuhotrubnoho-teploobminnoho-aparata.pdf> [In Ukrainian].
- (2018) HOST 34233.7-2017. Sосуды y apparaty. Normy y metody raschiota na prochnost'. Teploobmennye apparaty. (Mezhhosudarstvennyj standart). [Chynnyj vid 2018-08-01]. Vyd. ofits. M.: Standartynform [In Russian].
- Andreiev Igor (2022). Konstruiuvannya i rozrakhunok kozhuhotrubnykh teploobminnykiv: navch. posib. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50426> [In Ukrainian].