

ШВАЧКО Д.Г., асистент; ЩЕРБИНА В.Ю., д.т.н., проф.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО РОЗРАХУНКУ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ В ФАСОННОМУ ВОГНЕТРИВІ

*Представлені результати розробки аналітичного методу розрахунку теплового режиму футерівки обертової печі виконаної з фасонних вогнетривів, що мають підвищений тепловий опір. Запропоновану методику доцільно використовувати при розрахунку зміни теплового потоку і теплового опору вогнетривів з додатковою теплоізоляцією, а також для орієнтованої оцінки температурних полів. Вказане рішення дає можливість оперативно виконувати розрахунки технологічного режиму та енергоефективності теплових агрегатів, зокрема в ітераційних процесах визначення раціональних та оптимальних параметрів. Наведено порівняння результатів розрахунку отриманих числовим та запропонованим аналітичним методами. Похибка розрахунків не перевищує 5%. Результати розрахунку приведені в додатку у вигляді відео файлів.*

**Ключові слова:** тепловий агрегат, обертова піч, тепловий потік, аналітичний метод розрахунку, вогнетрив, футерівка, теплоізоляція.

© Швачко Д. Г., Щербина В. Ю., 2019.

**Постановка проблеми.** Високотемпературні теплові агрегати зазвичай футеруються вогнетривкою цеглою, що забезпечує стабільне протікання технологічного процесу, зменшення втрат тепла, захист поверхні корпусу від впливу високих температур і механічних пошкоджень. В металургійній, будівельній, цементній та ряді інших галузях промисловості широко застосовуються високотемпературні теплові агрегати барабанного типу. При цьому вони залишаються недосконалими тепловими установками з високим рівнем споживання енергетичних ресурсів, зокрема великими втратами тепла через корпус в навколишнє середовище [1]. Тому вкрай актуальною є задача розробки та впровадження футерівки з теплоефективними вогнетривами, що мають підвищений тепловий опір. Велика продуктивність, потужність, розміри та високі температури ускладнюють безпосереднє дослідження технологічних та теплових процесів на реальних установках. Тому особливого значення набувають модельні та чисельно-експериментальні дослідження.

**Метою** статті є розробка аналітичного методу розрахунку фасонного вогнетриву з комірками для теплоізоляційного матеріалу. Вказана методика дає можливість оперативно виконувати розрахунки технологічного режиму та енергоефективності теплових агрегатів, зокрема при ітераційних процесах для визначення раціональних та оптимальних параметрів теплових агрегатів [2, 3]. Використання кінцево-елементних числових методів суттєво збільшує термін розрахункових робіт та пред'являє підвищені вимоги до ресурсів комп'ютера.

**Виклад основного матеріалу.** Ефективним рішенням проблеми для поліпшення теплотехнічних властивостей футерівки обертових печей є використання фасонного вогнетриву з комірками які заповнені волокнистим теплоізоляційним матеріалом, наприклад базальтовим волокном або мулітокремнеземною ватою [4]. В даному технічному рішенні передбачено, що встановлення жорсткого теплоізоляційного матеріалу викликає суттєві термічні напруження за рахунок відмінностей коефіцієнтів лінійного розширення для різних матеріалів. Тому найбільш оптимальною є трикутна форма комірок так як опірна ніжка вогнетриву приймає форму трапеції, що зменшує градієнт температур та як результат – сприяє зменшенню температурних напружень у вогнетриві.

Для розрахунку теплового потоку через фасонний вогнетрив, комірки якого заповнені теплоізоляцією, прийняті наступні допущення:

- теплопровідність теплоізоляційного матеріалу вкрай мала відносно теплопровідності вогнетриву і тепловий потік через матеріал відсутній  $\partial T / \partial n = 0$ ;
- термічний опір металевого корпусу печі суттєво менше опору вогнетриву і в розрахунку не враховується;
- перетин  $u = \text{const}$  характеризується середньою температурою.

Останнє допущення, щодо строгої горизонтальності ізотерм, значно спрощує розрахунок, однак не дозволяє отримати детальну картину розподілу температури. В подальших викладках значення  $T$  відповідає усередненій температурі в перетині. Розрахункова схема вогнетриву приведена на рис.1.

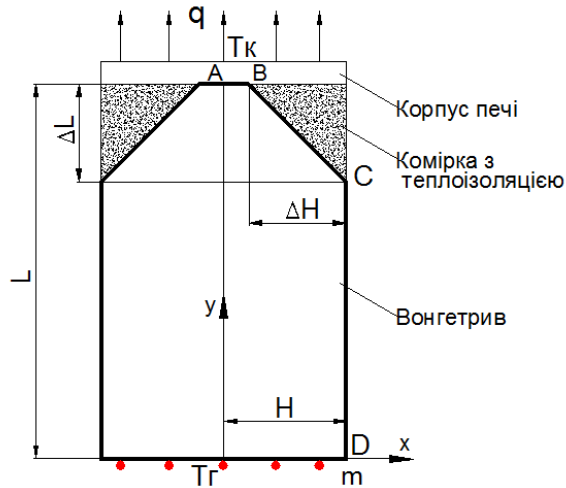


Рис. 1 – Конструкція вонгетриву

Визначення термічного опору вонгетриву. Вважається, що границя BCD задана у вигляді безперервної функції  $x = X(y)$ . У вонгетриві створюється температурний напір  $T_{\Gamma} - T_K$ . При цьому в перетині  $y=0$  встановлюється питомий тепловий потік:

$$q_0 = \frac{T_{\Gamma} - T_K}{R} \quad (1)$$

де  $R$  – шуканий термічний опір вонгетриву.

Відповідно до прийнятих допущень через границю BCD потік тепла відсутній, так як CD – площина симетрії, BC – площина контакту з теплоізоляційним матеріалом. Тому питомий тепловий потік через довільний перетин  $y = \text{const}$ .

$$q = q_0 \frac{m}{X(y)} \quad (2)$$

Відповідно до закону Фур'є  $q = -\lambda_0 \frac{dT}{dy}$ , та враховуючи (2) маємо:

$$\frac{dT}{dy} = -\frac{q_0}{\lambda_0} \frac{m}{X(y)} \quad (3)$$

Інтегруючи по висоті вонгетриву отримаємо:

$$T_K - T_{\Gamma} = -\frac{mq_0}{\lambda_0} \int_0^L \frac{dy}{X(y)}. \quad (4)$$

Зіставляючи останню рівність з (1), отримаємо термічний опір вонгетриву:

$$R = \frac{m}{\lambda_0} \int_0^L \frac{dy}{X(y)}. \quad (5)$$

Таким чином тепловий потік через футерівку становить:

$$q_0 = \frac{T_{\Gamma} - T_{oc}}{\frac{m}{\lambda_0} \int_0^L \frac{dy}{X(y)} + \frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

Інтегруючи рівняння (3), отримаємо поле температур по вонгетриву:

$$T = T_{\Gamma} - \frac{T_{\Gamma} - T_{oc}}{\int_0^L \frac{dy}{X(y)} + \frac{1}{\alpha}} \int_0^L \frac{dy}{X(y)} \quad (7)$$

де  $\lambda_0$  – теплопровідність;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від корпусу в оточуюче середовище,  $\alpha = A + B \cdot T_K$ .

Поверхня вонгетриву списується наступними рівняннями:

$$X(y) = \begin{cases} H & \text{для } y \in (0, L - \Delta L) \\ (H - \Delta H) + \beta(L - y) \frac{\Delta H}{\Delta L} & \text{для } y \in (L - \Delta L, L) \end{cases} \quad (8)$$

Підставляючи (8) у вирази (5)–(7) отримуємо формули для розрахунку теплового опору, температури та теплового потоку через вогнетрив:

$$R = \frac{H}{\lambda_o} \left[ \frac{L - \Delta L}{H} - \frac{1}{\beta} \ln \left( 1 - \frac{\Delta H}{H} \right) \right]; \quad \beta = \frac{\Delta H}{\Delta L}. \quad (9)$$

Температура поверхні вогнетриву  $T_K$ , що опирається на корпус, знаходиться по наступній залежності:

$$q_o = \frac{T_\Gamma - T_K}{R} = \frac{T_\Gamma - T_{oc}}{R + 1/\alpha}, \quad (10)$$

звідки

$$T_K = \frac{\sqrt{R^2 (A + B \cdot T_{oc})^2 + 2 \cdot R (A + 2 \cdot B \cdot T_\Gamma - B \cdot T_{oc}) + 1 + B \cdot R \cdot T_{oc} - A \cdot R - 1}}{2 \cdot B \cdot R}. \quad (11)$$

Слід відзначити, що рівняння (11) суттєво спрощується при використанні значення  $T_{oc} = 0.0 \text{ }^\circ\text{C}$ . В цьому випадку воно має вигляд:

$$T_K = \frac{\sqrt{A^2 \cdot R^2 + 2 \cdot R (A + 2 \cdot B \cdot T_\Gamma) + 1 - A \cdot R - 1}}{2 \cdot B \cdot R} \quad (12)$$

При використанні коефіцієнта тепловіддачі виду  $\alpha = const$ , тобто  $\alpha = A$ , отримаємо:

$$T_K = T_{oc} + \frac{T_\Gamma - T_{oc}}{1 + A \cdot R}. \quad (13)$$

Тепловий потік визначається по залежності (10). Температурне поле у вогнетриві:

$$T = T_\Gamma - (T_\Gamma - T_{oc}) \frac{1}{\left[ \left( 1 - \frac{\Delta L}{L} \right) - \frac{1}{\beta} \frac{H}{L} \ln \left( 1 - \frac{\Delta H}{H} \right) \right] + \frac{\lambda_o}{\alpha L} \frac{y}{L}} \quad \text{для } y \in (0, L - \Delta L); \quad (14)$$

$$T = T_\Gamma - (T_\Gamma - T_{oc}) \frac{\left( 1 - \frac{\Delta L}{L} \right) - \frac{1}{\beta} \frac{H}{L} \ln \left[ \left( 1 - \frac{\Delta H}{H} \right) + \beta \frac{L}{H} \left( 1 - \frac{y}{L} \right) \right]}{\left[ \left( 1 - \frac{\Delta L}{L} \right) - \frac{1}{\beta} \frac{H}{L} \ln \left( 1 - \frac{\Delta H}{H} \right) \right] + \frac{\lambda_o}{\alpha L}} \quad \text{для } y \in (L - \Delta L, L). \quad (15)$$

Таким чином отримані рівняння які дають змогу визначити тепловий потік та температури в фасонному вогнетриві з довільною конфігурацією комірок для теплоізоляції.

**Рішення задачі.** Для перевірки запропонованій методики виконаний розрахунок фасонного вогнетриву конструкція якого приведена на рис. 1. Як показує практика вказаний вогнетрив з розмірами  $L=0.23 \text{ м}$ ,  $H=0.075 \text{ м}$ ,  $\Delta L=0.06 \text{ м}$ ,  $\Delta H=0.06 \text{ м}$  є найбільш технологічний при виготовленні.

При порівнянні отриманих даних використовувалось числове моделювання з врахуванням металевго корпусу та комірок заповнених теплоізоляційним матеріалом. Для розрахунків застосовувався програмний комплекс ВЕСНА [5], розроблений на кафедрі ХПСМ, КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Вихідні дані для розрахунку:

- довжина вогнетриву  $L=0.23 \text{ м}$ ,  $0.19 \text{ м}$ ,  $0.155 \text{ м}$ ,  $0.12 \text{ м}$ ,  $0.08 \text{ м}$ ;
- напівширина вогнетриву  $H=0.075 \text{ м}$ ;
- зріз по довжині  $\Delta L=0.06 \text{ м}$ ;
- зріз по ширині  $\Delta H=0.06 \text{ м}$ ;
- температура вогневої поверхні  $T_\Gamma=1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура навколишнього середовища  $T_{oc}=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- теплопровідність хромомagneзитового вогнетриву  $\lambda_o=1.900 \text{ Вт/(м К)}$ ;
- коефіцієнт тепловіддачі оточуюче середовище  $\alpha=3.5+0.062 \cdot T_K$ .

При числовому розрахунку додатково враховувались:

- металевий корпус  $L_K=0.02 \text{ м}$ ;
- теплопровідність корпусу  $\lambda_K=45 \text{ Вт/(м К)}$ ;
- теплопровідність теплоізоляційного матеріалу  $\lambda_T=0.15 \text{ Вт/(м К)}$ , мулітокремнеземна вата.

Теплові поля отримані в результаті числового моделювання та ізотерми при розрахунку по формулах (9)–(15) приведені на рис.2.

З рисунків видно, що результати отримані аналітичним та числовим методом близькі по отриманим значення, хоча в даних отриманих аналітичним методом ізолінія температур характеризується середньою температурою, що не дозволяє визначити детальну картину розподілу.

Результати розрахунку зі значеннями теплового потоку через вогнетрив представлені на рис. 3.

При порівнянні значень встановлено, що тепловий потік при числовому рішенні становить від  $6831 \text{ Вт/м}^2$  до  $11810 \text{ Вт/м}^2$ , при аналітичних розрахунках  $6497 \text{ Вт/м}^2$  –  $11896 \text{ Вт/м}^2$ . Таким чином максимальна похибка не перевищує 5%. Як слідує з аналізу даних похибка зменшується при підвищенні температури в зоні теплоізоляційної комірки. Отримані дані показують, що при вказаній конструкції вогнетриву тепловий потік через комірку з теплоізоляцією не суттєвий і його значення не впливають на загальний тепловий режим в футерівці тобто при оперативному розрахунку може не враховуватись, що було вказано в допущеннях.

Вказане дає можливість зробити висновок, що при збільшенні температури, за рахунок зменшення товщини футерівки, ефективність теплоізоляції зростає. Тобто, чим вища температура у вогнетриві тим вища ефективність шару теплоізоляції.

Значення температури в опірній ніжці вогнетриву  $T_k$  приведені на рис. 4.

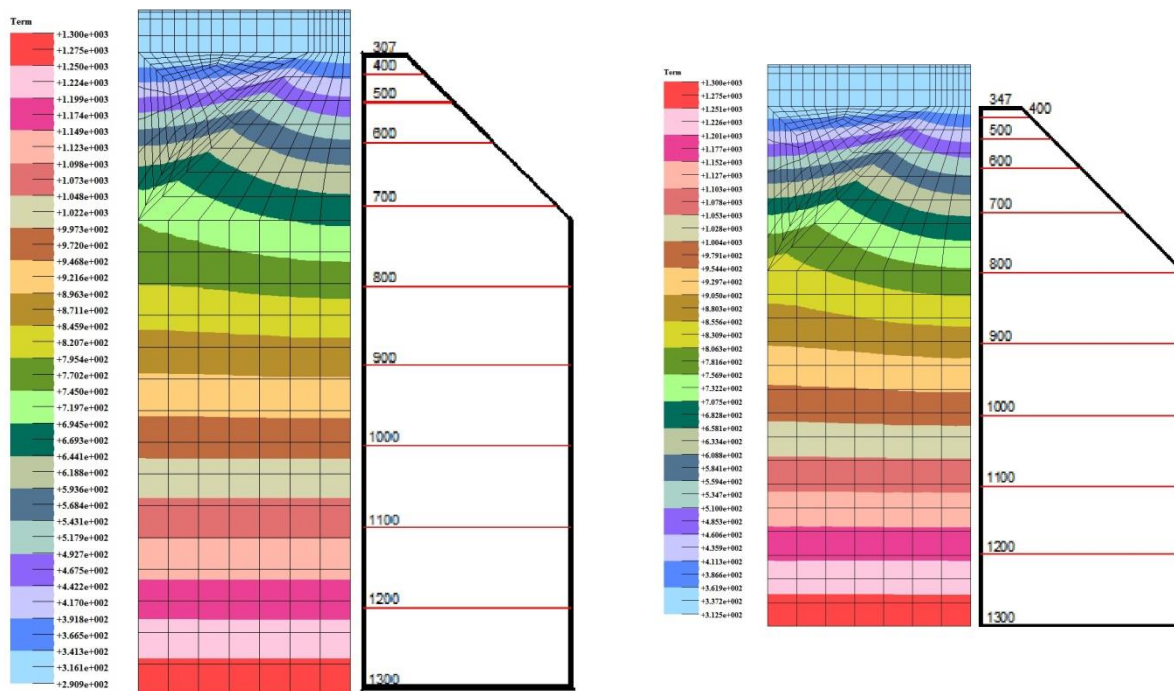
З графіків видно, що температура в ніжці вогнетриву  $T_k$  монотонно зростає при зменшенні товщини вогнетриву. По числовому розрахунку вона становить  $309.7 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $431 \text{ }^\circ\text{C}$ , аналітичному  $307 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $421 \text{ }^\circ\text{C}$ . Розбіжність між аналітичним та числовим методом не перевищує 2,3 %.

Важливим фактором для вибору теплоізоляційного матеріалу є визначення максимальної температури в теплоізоляційній комірці, що є необхідним при виборі матеріалу. На рис. 5 приведені порівняння вказаних даних отриманих при аналітичному та числовому методах розрахунку. З графіків видно, що температура в комірці змінюється від  $720 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $1180 \text{ }^\circ\text{C}$  при аналітичному та  $746 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $1229 \text{ }^\circ\text{C}$  числовому розрахунку. Розбіжність даних по максимальних температурах у комірці з теплоізоляцією не перевищує 5 %. Результати розрахунку приводяться також в додатку до статті у вигляді відео файлів.

Отримані дані показують, що вказані допущення для аналітичного обчислення вибрані вірно і загалом для розглянутої конструкції вогнетриву та конфігурації комірки з теплоізоляційним матеріалом похибка розрахунків є допустимою.

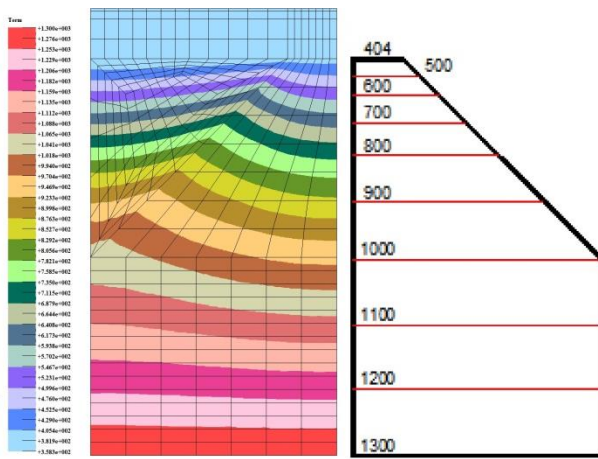
**Висновок.** Розроблений аналітичний метод розрахунку теплового режиму в фасонних вогнетривах, що використовуються для футерування високотемпературних теплових агрегатів.

Запропоновану методику можливо застосовувати для розрахунку зміни теплового потоку і теплового опору футерівки з додатковою теплоізоляцією, а також для при моделювання зміни теплового потоку і теплового опору вогнетривів з додатковою теплоізоляцією.

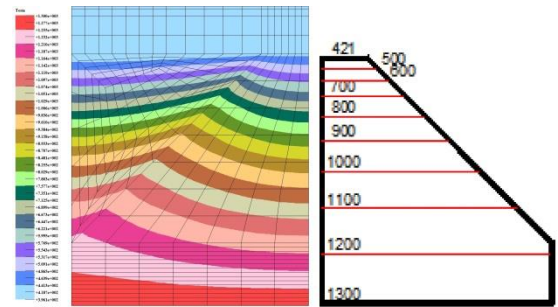


а) висота вогнетриву  $L=0.23 \text{ м}$

б) висота вогнетриву  $L=0.19 \text{ м}$



г) висота вогнетриву  $L=0.12$  м



д) висота вогнетриву  $L=0.08$  м

Рис. 2 – Температури у фасонному вогнетриві визначені числовим та аналітичним методом

При порівнянні результатів з числовою моделлю похибка не перевищує 5%.

Рішення зазначеної проблеми дозволяє досліджувати технологічні системи методом числового експерименту, підвищити якість їхнього проектування, удосконалити та визначити раціональні та оптимальні режими технологічних процесів і конструктивні параметри устаткування.

**Перспективи подальших досліджень.** Впровадження розробленої аналітичної методики розрахунку для програмних комплексів та систем, що орієнтовані на моделювання обертових печей з підвищеною теплоізоляцією корпусу при визначенні технологічних режимів та енергоефективності вказаних теплових агрегатів.

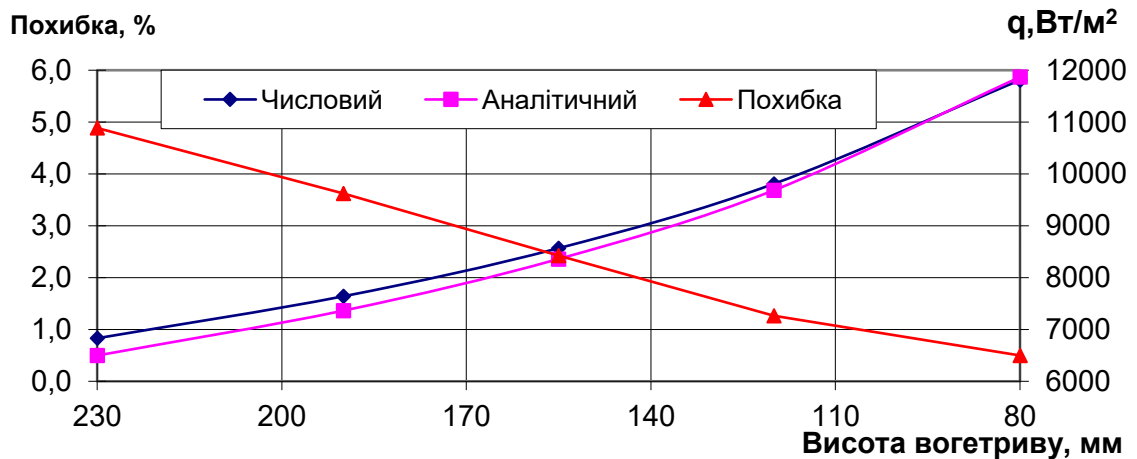


Рис. 3 – Тепловий потік через фасонний вогнетрив

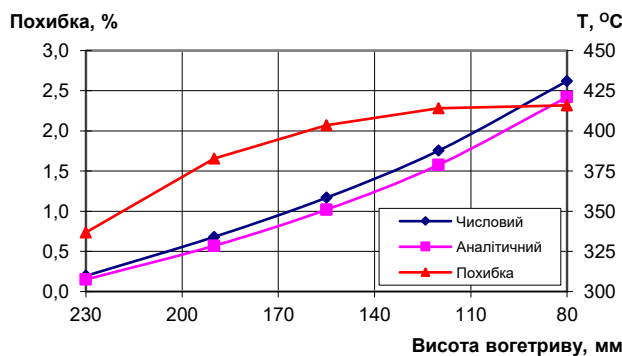


Рис. 4 – температура  $T_k$

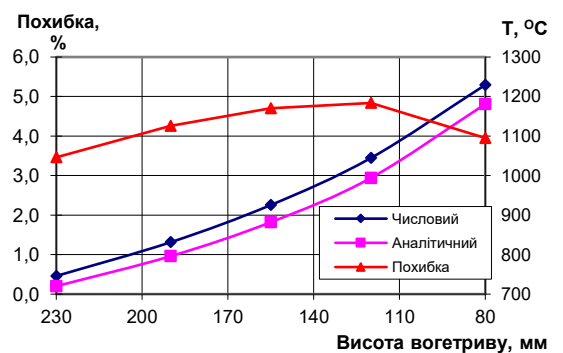


Рис. 5 – температура теплоізоляційній

### Список використаної літератури

1. Лисиенко В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справочное издание : в 2 кн / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. - Москва: Теплотехник, 2004. Кн.1.- 688 с, 24см.
2. Щербина В.Ю. Підвищення енергоефективності обертових теплових агрегатів / В.Ю. Щербина, Д.Г. Швачко // Вчені записки таврійського національного університету імені В. І. Вернадського, Серія: Технічні науки Том 29 (68), Ч.2, № 4, 2018, ст. 68-72.
3. Щербина В. Ю. Підвищення ресурсу роботи бандажів обертових печей / В. Ю. Щербина, Т. В. Дегодя, Ю. М. Новохатська // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. - 2016. - № 1. - С. 110-115.
4. Сахаров О.С. Моделирование влияния формы огнеупора на тепловую эффективность футеровки вращающейся печи / О.С. Сахаров, В.Ю. Щербина, Чжан Юлін(张佑林), В.В. Бобах // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — №4/10(40). — С. 58—65.
5. Сахаров О. С. САПР. Застосування програмного комплексу ВЕСНА в розрахунках процесів і обладнання з врахуванням термосилових навантажень.: Навчальний посібник / О.С. Сахаров, В.Ю. Щербина, О. В. Гондляр, В. І. Сівецький. – К.: Видавництво “ЕКМО”, 2009. – 180 с.

Надійшла до редакції 22.02.2019

*Shvachko D. G., Shcherbyna V. Yu.*

### METHODS OF OPERATIONAL CALCULATION OF THERMAL CONDITIONS IN PACKAGED REFRACTORIES

*High-temperature thermal units are usually lined with refractory bricks, which ensures a stable process flow, reducing heat loss, and protecting the surface of the body from high temperatures and mechanical damage. In the metallurgical, construction, cement and a number of other industries, high-temperature drum-type thermal units are widely used.*

*The goal is to develop an analytical method for calculating shaped refractories with cells for thermal insulation material. This technique allows you to quickly perform calculations of the technological mode and energy efficiency of thermal units, in particular for iterative processes to determine the rational and optimal parameters of thermal units. The use of finite-element numerical methods significantly increases the term of computational work and imposes increased requirements on computer resources.*

*The results of the development of an analytical method for calculating the thermal regime of the lining of an overturning furnace made of shaped refractories with increased thermal resistance are presented. The proposed method is advisable to use when calculating changes in heat flow and thermal resistance of refractories with additional thermal insulation, as well as for oriented assessment of temperature fields. This solution allows you to quickly perform calculations of the technological mode and energy efficiency of thermal units, including in iterative processes for determining rational and optimal parameters. The comparison of the calculation results obtained by numerical and proposed analytical methods is given. Calculation error does not exceed 5%. The calculation results are presented in the appendix in the form of video files.*

*Solving this problem allows you to explore technological systems using numerical experiments, improve the quality of their design, improve and determine the rational and optimal modes of technological processes and design parameters of the equipment. The developed analytical method for calculating technological modes and energy efficiency of thermal units including rotary kilns with increased thermal insulation of the case.*

**Keywords:** *thermal unit, rotary kiln, heat flux, analytical method of calculation, lining, thermal insulation.*

### References

1. Lisienko V. G. Vrashchayushchiesya pechi: teplotekhnika, upravlenie i ehkologiya: [Rotary kilns: heat engineering, control and ecology:] spravocnoe izdanie : v 2 kn / V.G. Lisienko, YA.M. Shchelokov, M.G. Ladygichev; pod red. V.G. Lisienko. - Moskva: Teplotekhnika, 2004. Kn.1.- 688 s, 24sm.
2. Shcherbina V.Yu. Pidvishchennya energoefektivnosti obertovih teplovih agregativ [Increasing the energy efficiency of rotary heat generators] / V.Yu. Shcherbina, D.G. Shvachko // Vcheni zapiski tavrjiskogo nacionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo, Seriya: Tekhnichni nauki Tom 29 (68), CH.2, № 4, 2018, st. 68-72.
3. Shcherbina V. Yu. Pidvishchennya resursu roboti bandazhiv obertovih pechej [Increasing the working life of rotary furnace bandages] / V. Yu. Shcherbina, T. V. Degodya, Yu. M. Novohatska // Visnik Nacionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukraїni "Kiїvskij politekhnichnij institut". Himichna inzheneriya, ekologiya ta resursozbezheniya. - 2016. - № 1. - S. 110-115.
4. Saharov O.S. Modelirovanie vliyanija formy ogneupora na teplovuyu ehffektivnost futerovki vrashchayushchejsya pechi [Modeling the influence of the shape of the refractory on the thermal efficiency of the lining of the rotary kiln] / O.S. Saharov, V.Yu. Shcherbina, CHzhan Yulin, V.V. Bobah // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij. — 2009. — №4/10(40). — S. 58—65.

Saharov O. S. SAPR. Zastosuvannya programnogo kompleksu VESNA v rozrahunkah procesiv i obladnannya z vrahuvannyam termosilovih navantazhen [*Application of the software complex VESNA in the calculation of processes and equipment taking into account the thermosetting loads.*]: Navchalnij posibnik / O.S. Saharov, V.Yu. Shcherbina, O. V. Gondlyah, V. I. Siveckij. – K.: Vidavnictvo “EKMO”, 2009. – 180 s.