

**Ільїн Сергій Віталійович**, кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3563-9536

**Погребна Юлія Сергіївна**, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0003-0976-8964

**Волков Єгор Володимирович**, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0002-8659-4964

**Карпенко Ганна Володимирівна**, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3504-0283

## РОЗРАХУНОК ТА ВИКОРИСТАННЯ КОТЛА-УТИЛІЗАТОРА У ВІТЧИЗНЯНІЙ МЕТАЛУРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ

Рациональне використання паливно-енергетичних ресурсів, охорона навколишнього середовища відносяться до найважливіших проблем, що стоять перед людством. Високотемпературні процеси здійснюються у технологічних печах (металургійна, хімічна, нафтохімічна та інші галузі промисловості) за надзвичайно низького коефіцієнта використання органічного палива (20–40%). Як результат ці виробництва викидають гази, температури яких перевищують іноді 1000 °С, токсичні речовини, дрібнодисперсний пил застосовуваної сировини та інші технологічні відходи, які забруднюють довкілля. Тому переробка та експлуатація відходів цих технологічних процесів є важливим завданням, виконання якого можливе на основі використання їх теплоти в котлах-утилізаторах або при спільній організації технологічного та енергетичного процесів в енерготехнологічних агрегатах. В статті представлено розрахунок котла-утилізатора, зведений у таблиці. Вибір оптимальних параметрів обладнання для кращого введення в експлуатацію без порушення технологічного процесу. В цілому дане обладнання має ряд переваг. А саме: простота його виконання, надійність в експлуатації, надійність роботи теплопередаючих елементів та висока ефективність процесів тепломасообміну, відносно малий гідравлічний опір, автономність і т. д. Використання вторинних енергоресурсів будь-яких видів в технологічних процесах пов'язане з підвищенням енергетичної ефективності, поліпшенням показників технологічних процесів і умов навколишнього середовища, тобто в єдиний процес зведені технологія і енергетика. Введення котла-утилізатора може істотно підвищити економічний ефект виробництва. Звільнену і отриману теплову енергію можна використовувати в якості перетворень в механіку, що дозволяє забезпечити автономність джерел енергії котлівутилізаторів.

Ключові слова: котел-утилізатор, термосифони, промисловість, сучасна металургія, тепломасообмін, енергетика

*Вступ.* Термосифонний котел-утилізатор призначений для охолодження високотемпературних відхідних виробничих газів технологічних установок з метою їх подальшої технологічної переробки та очистки, використання фізичної теплоти відхідних газів технологічних агрегатів та промислових печей з отриманням насиченої пари для теплопостачання та технологічних потреб підприємства.

*Постановка завдання.* Проаналізувавши сучасний стан та конструктивні особливості вітчизняних котлів-утилізаторів, які використовуються на підприємствах, розглянути перспективні напрямки впровадження більш сучасних та найбільш енергетично вигідних конструкцій.

*Методика дослідження.* Задачами розрахунку природної циркуляції можуть бути вибір оптимальної компоновки контурів котельного агрегату, перевірка надійності випарних поверхонь нагрівання та розробка заходів для підвищення їхньої надійності.

Розрахунком природної циркуляції визначаються швидкості води, кратності циркуляції та корисні напори в контурах, запаси надійності по застою, умови руху в опускних трубах, надійність при нестационарних режимах, а також інші показники, пов'язані з конструктивними особливостями поверхонь нагріву. Схема розміщення труб в пучку термосифона представлено на рисунку 1.

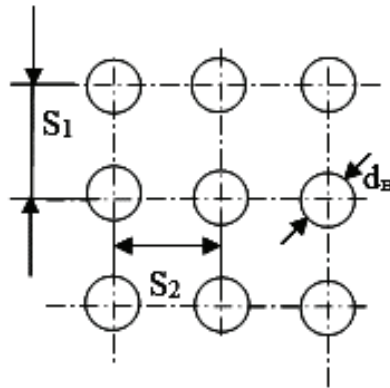


Рисунок 1 – Схема розміщення труб у термосифоні

Приймаємо кількість труб поперек потоку  $n_1$ , тоді ширина газоходу, м:

$$a = S_1(n_1 - 1) + d_3.$$

Висота зони нагріву термосифонів  $l_n$ , прохідний переріз для газів, м<sup>2</sup>:

$$f_{\Gamma} = a \times l_n - n_1 \times d_3 \times l_n = l_n \times (a - d_3 n_1).$$

Швидкість газів, м/с

$$W_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}}{f_{\Gamma}}.$$

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі зі сторони газів, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_{\Gamma}^k = \alpha_n^k C_z C_s C_{\phi},$$

де  $\alpha_{\Gamma}^k$  – нормативний коефіцієнт тепловіддачі визначений по номограмі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $C_z C_s C_{\phi}$  – поправки відповідно на кількість рядів вздовж потоку, на кроки труб і на зміну фізичних властивостей потоку, визначаються по номограмі [2].

У зв'язку з різноманіттям конструкцій окремих циркуляційних контурів парових котельних агрегатів [7], їх параметрів, а деяких випадках, і взаємозв'язком контурів розрахунок циркуляції, як правило, повинен виконуватися для всіх контурів котельного агрегату. Для однотипних контурів допускається розрахунок лише тих контурів, які знаходяться в найгірших умовах по рівномірності та інтенсивності обігріву і конструктивним особливостям.

Для всіх підйомних, опускних, рециркуляційних, водо- та пароперепускних труб по кресленням визначаються наступні величини:

- кількість труб та колекторів та їхні внутрішні діаметри;
- довжини та висоти труб з розділенням труб на ділянки (в тому числі і висота перевищення над рівнем води);
- кути нахилу ділянок підйомних труб, по відношенню до горизонталі;

– місцеві опори;  
 – конструктивні характеристики сепараційних установок, опір яких впливає на умови циркуляції.

Висота підйомних труб виведених у водяний об'єм барабана або колектор, визначають як різницю відміток їх вводу і виводу[5].

Висота підйомних труб, що виходять в паровий простір барабану, визначається від місця виходу з нижнього колектора (або барабана) до рівня води в барабані; висота перевищення – води в барабані до найвищої відмітки труби; при наявності верхніх декількох барабанів вона визначається від барабана, до якого приєднані опускні труби контуру.

Висота контуру дорівнює сумі висот послідовних підйомних елементів.

Повна довжина підйомних труб включає в себе і ділянки, розміщені вище осі барабану.

Визначення корисних напорів підйомних елементів та гідравлічних опорів опускної системи контуру виконується при декількох (зазвичай трьох) попередньо прийнятих витратах води, яка циркулює в ньому.

Кількість води, яка проходить по опускним трубам простих контурів дорівнює кількості води, яка приймається при розрахунку корисних напорів підйомних труб.

Витрата води в підйомних трубах розраховується, кг/год:

$$G = 3,6 \times \rho' \times F \times W_B,$$

де  $\rho'$  – густина води на лінії насичення, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  – переріз елемента (труби), м<sup>2</sup>;  $W_B$  – швидкість циркуляції (попередньо прийнята), м/с.

Для розрахунку рухомих опорів підйомних труб згідно з значеннями швидкостей циркуляції й приведеними швидкостями пари для всіх ділянок розраховуються швидкості суміші, м/с

$$W_{\text{сум}} = W_B \cdot \left( 1 + \chi \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right).$$

Рухаючий напір кожного контуру розраховується окремо для кожного елемента або його ділянки. Для відповідного контуру, Па

$$S_{\text{відв}} = h_n \times \phi_{\text{відв}} \times (\rho' - \rho''),$$

де  $\phi_{\text{відв}}$  – напірний паровміст визначається за допомогою номограм;  $h_n$  – висота паровмісної ділянки, яка розраховується, м.

Корисний напір в елементах паровідвідних труб визначається як різниця рухаючого напору та гідравлічного опору, Па

$$S_{\text{ВІДВ}}^{\text{КОР}} = S_{\text{відв}} - \Sigma \Delta P,$$

де  $\Sigma \Delta P$  – сума місцевих опорів та втрат тиску на тертя, Па.

Розрахунок опорів опускних та рециркуляційних труб виконується для трьох значень витрат води, прийнятих для опускних та рециркуляційних труб[5]. Опір опускних та рециркуляційних труб визначається як сума гідравлічного опору і зменшення маси стовпця середовища в цих трубах через занесення в них пари, Па

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{оп}} &= \Delta P + \Delta S_{\text{нив}}; \\ \Delta S_{\text{нив}} &= \overline{\phi_{\text{оп}}} (\rho' - \rho'') h_{\text{оп}} + (\rho' - \rho'') h_{\text{оп}}; \\ \Delta P &= \Sigma \xi \left( W_{\text{оп}}^2 / 2g \right) \rho'. \end{aligned}$$

Гідравлічна характеристика (рис. 2) простих циркуляційних контурів визначається шляхом сумування корисних напорів окремих елементів для кожного з прийнятих

значень витрат води. Дійсні витрати циркулюючої в контурах води та їхні корисні напори визначаються графічно за точкою перетину гідравлічних характеристик підйомної системи труб і загальних елементів опускної системи або паровідвідних труб [13].

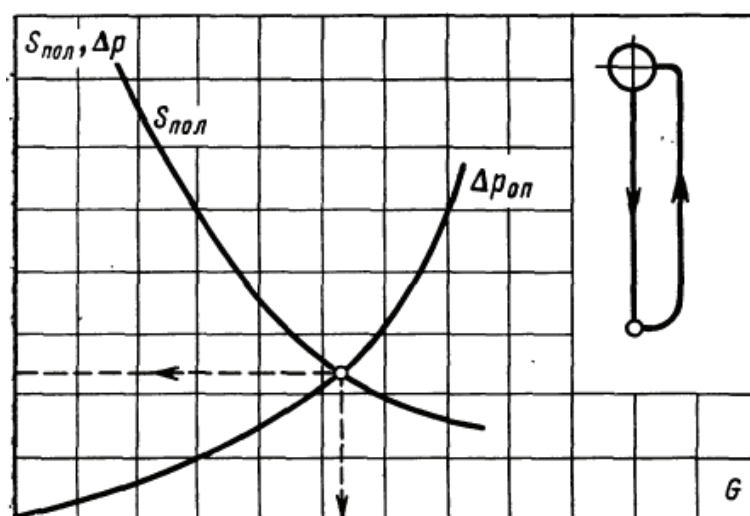


Рисунок 2 – Визначення умов циркуляції в простих контурах

Після визначення середніх витрат в окремих контурах та їх елементах слід перевірити правильність попередньо прийнятих в розрахунках величин:

- кратність циркуляції;
- числа опускних рядів в нагріваємих опускних пучках;
- витрат води та опорів, попередньо прийнятих при зведенні балансів в особливо складних контурах.

Кратність циркуляції в котлі визначається залежністю:

$$K = G_{on} / D,$$

де  $G_{on}$  – витрати водив опускних трубах, кг/год;  $D$  – паропродуктивність контурів, включених в барабан або його відсік, в який поступає живильна вода, кг/год.

*Результати розрахунків природньої циркуляції.* Проведено кількісні розрахунки гідравлічного одного із контурів термосифонного котла-утилізатора для визначення коефіцієнтів опорів трубних елементів. Отримані результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Коефіцієнти опорів трубних елементів

Назва	Габарити труби dH×S, мм	Коефіцієнт опору Σξ, Па/м <sup>2</sup>
Паровідвідна труба	219 × 6	3,105
Колектор	133 × 4	0,21
Паровідвідна труба від колектора ТС	57 × 3,5	2,784
Колектор верхній	133 × 4	0,889
Підйомна труба	89 × 3	0,11
Колектор нижній	133 × 4	0,947
Опускна труба	159 × 7	3,005

*Висновки.* Спираючись на принципи роботи термосифонного котла-утилізатора, розглянуті можливості його використання у різних галузях вітчизняної промисловості. Проведено розрахунок-проекування даного котла, на основі отриманих даних проводиться вибір найбільш доцільного варіанту.

**Бібліографічний перелік**

1. Губинский, В.И. *Металлургические печи. Теория и расчеты : учебник. В 2 т. Т. 2. / В.И. Губинский и др. ; под. общ. ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. Минск : Белорус. наука, 2007. 832 с.*
2. Чейлитко, А.О. *Формування теплофізичних властивостей елементів конструкцій теплового захисту шляхом створення прогнозованих пористих структур : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 318 с.*
3. *Сооружение промышленных печей : справочник / под ред. А.М. Прохорова. Москва : Теплотехник, 2006. 865 с.*
4. Величко Ю.М., Племянников М.М., Бондаренко С.О. *Метод. вказівки для студ. напряму підготовки «Хімічна технологія». Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 71 с.*
5. Величко Ю.М. *Хімія і технологія кераміки. Високотемпературні процеси : навчальний посібник / Величко Ю.М., Племянников М.М., Яценко А.П., Корнілович Б.Ю. ; за ред. чл.-кор. НАН України Б.Ю.Корніловича. Київ : Освіта України, 2016. 167 с.*
6. Крупа А.А., Городов В.С. *Химическая технология керамических материалов : учебное пособие. Київ : Вища школа, 1990. 399 с.*
7. Чейлитко А.О., Ільїн С.В., Лаврьонов А.В., Белоконь Ю.О. *Дослідження характеристик циклону для сухого очищення газів від пилу в металургії. *Металургія*. 2020. Т. 1. № 1. С. 107–114.*
8. Ошовская, Е.В. *Моделирование работы футеровки сталеразливочного ковша с переменной тепловой нагрузкой / Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш, Д.А. Фоменко. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія»*. Донецьк, 2011. Вип. 13 (194). С. 198–210.*

**References**

1. Gubinsky V.I. *Metallurgical furnaces. Theory and calculations : textbook. In 2 vols. Vol. 2. / V.I. Gubinsky and others ; under community ed. V.I. Tymoshpolskyi, V.I. Gubynskyi. Minsk : Belarus. science, 2007. 832 p.*
2. Cheylytko A.O. *Formation of thermophysical properties of elements of thermal protection structures by creating predicted porous structures : monograph. Zaporizhzhia : ZDIA, 2017. 318 p.*
3. *Construction of industrial furnaces : reference book / ed. A.M. Prokhorova. Moscow : Teplotechnik, 2006. 865 p.*
4. Velichko Y.M., Plemyanikov M.M., Bondarenko S.O. *Method. instructions for students. field of training “Chemical technology”. Kyiv : NTUU “KPI”, 2010. 71 p.*
5. Velichko Yu.M. *Chemistry and technology of ceramics. High-temperature processes : a study guide / Yu.M. Velychko, M.M. Plemyanikov, A.P. Yatsenko, B. Yu. Kornilovych ; under the editorship member-cor. National academy of sciences of Ukraine B.Yu. Kornilovych. Kyiv : Education of Ukraine, 2016. 167 p.*
6. Krupa A.A., Horodov V.S. *Chemical technology of ceramic materials : textbook. Kyiv : Higher school, 1990. 399 p.*
7. Cheylytko A.O., Ilyin S.V., Lavryonov A.V., Belokon Yu.O. *Study of cyclone characteristics for dry cleaning of gases from dust in metallurgy. *Metallurgy*. 2020. Vol. 1. No. 1. P. 107–114.*
8. Oshovskaya E.V. *Modeling of lining work of a steel ladle with variable thermal load / E.V. Oshovskaya, I.N. Salmash, D.A. Fomenko. *Scientific works of DonNTU. Series “Metallurgy”*. Donetsk, 2011. Iss. 13 (194). P. 198–210.*

---

**Ilin Serhii**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3563-9536

**Pogrebna Yuliya**, Postgraduate Student, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0003-0976-8964

**Volkov Yehor**, Postgraduate Student, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0002-8659-4964

**Karpenko Hanna**, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3504-0283

### **CALCULATION AND USE OF A RECOVERY BOILER IN DOMESTIC METALLURGY TO INCREASE THE EFFICIENCY OF HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES**

Rational use of fuel and energy resources, protection of the environment are among the most important problems facing humanity. High-temperature processes are carried out in technological furnaces (metallurgical, chemical, petrochemical and other branches of industry) with an extremely low coefficient of use of organic fuel (20–40%). As a result, these productions emit gases whose temperatures sometimes exceed 1000 °C, toxic substances, finely dispersed dust of the used raw materials and other technological wastes that pollute the environment. Therefore, the processing and exploitation of waste from these technological processes is an important task, the implementation of which is possible based on the use of their heat in recovery boilers or with the joint organization of technological and energy processes in energy technology units. The article presents the calculation of the boiler-utilizer, summarized in the table. Selection of optimal equipment parameters for better commissioning, without disrupting the technological process. In general, this equipment has a number of advantages. Namely: simplicity of its execution, reliability in operation, reliability of heat transfer elements and high efficiency of heat and mass exchange processes, relatively low hydraulic resistance, autonomy, etc. The use of secondary energy resources of any kind in technological processes is associated with increasing energy efficiency, improving indicators of technological processes and environmental conditions, that is, technology and energy are combined into a single process. The introduction of a recovery boiler can significantly increase the economic effect of production. The released and received thermal energy can be used as transformations into mechanics, which allows ensuring the autonomy of the energy sources of recovery boiler.

Keywords: recovery boiler, thermosyphons, industry, modern metallurgy, heat and mass exchange, energie

Стаття надійшла до редакції 15.05.2023 р.