

**Т. І. РИМАР****ТЕПЛООБМІННІ І ГІДРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
УНІФІКОВАНИХ НАБИВОК ПАКЕТУ ХОЛОДНОГО ШАРУ  
РЕГЕНЕРАТИВНОГО ОБЕРТОВОГО ПОВІТРОПІДГРІВНИКА**

У статті наведено дослідження процесів теплообміну і гідравлічного опору уніфікованих набивок холодного шару регенеративного повітропідігрівника РПП-88 котла ТГМП-314. Побудовано графічні залежності зміни числа Нуссельта та коефіцієнта гідравлічного опору для уніфікованих набивок з однопрофільних листів та із спрощеного профілю з корозійностійкою емаллю від числа Рейнольдса за різних значень довжини заміщених ділянок.

**Ключові слова:** регенеративний обертовий повітропідігрівник (РПП), теплообмін, гідравлічний опір.

**Т. И. РЫМАРЬ****ТЕПЛООБМЕННЫЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
УНИФИЦИРОВАННЫХ НАБИВОК ПАКЕТА ХОЛОДНОГО СЛОЯ  
РЕГЕНЕРАТИВНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ**

В статье приведены исследования процессов теплообмена и гидравлического сопротивления унифицированных набивок холодного слоя регенеративного воздухоподогревателя РВП-88 котла ТГМП-314. Получены графические зависимости изменения числа Нуссельта и коэффициента гидравлического сопротивления для унифицированных набивок с однопрофильным листом и с упрощенно-го профиля с коррозионностойкой эмалью от числа Рейнольдса при различных значениях длины замещенных участков.

**Ключевые слова:** регенеративный вращающийся воздухоподогреватель (РВП), теплообмен, гидравлическое сопротивление.

**T. RYMAR****HEAT EXCHANGE AND HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS  
OF UNIFIED PACKAGE OF COLD LAYER OF RAH**

Heating the air in the boiler air heater with the heat of fuel combustion products performs the functions of increasing the fuel combustion temperature, increasing the temperature level of gases in convective heating surfaces, improving ignition and fuel combustion conditions, increasing boiler efficiency by utilizing waste gas heat, improving fuel quality due to its preliminary supply, etc. However, the peculiarities of the process of heating the air in the air heaters do not allow to achieve a decrease in the temperature of the exhaust gases. This is due to the unfavorable ratio of heat capacities of flue gases and air, as well as corrosion and contamination of the heating surfaces of air heaters. The research of heat transfer processes and hydraulic resistance of unified package of cold layer of RAH is depicted at this work. The graphic dependence of the change in the coefficient of hydraulic resistance and Nu number for unified packages with single line of sheets and simplified profile with corrosion resistance enamel from the Reynolds number for different values of the length of the replaced areas was constructed. The unified packing of the simplified profile has increased by 1.17 times equivalent diameter and is characterized by good operational parameters and takes into account the risk of contamination of heating surfaces due to the enamel coating.

**Key words:** regenerative rotary air heater (RAH), heat exchange and hydraulic resistance.

**Вступ**

Підвищення економічності роботи потужних енергоблоків діючих ТЕС за рахунок підвищення початкових параметрів пари з врахуванням вимог маневреності є на сьогоднішній день надзвичайно складною технічною задачею. Тому важливим напрямом удосконалення економічних показників роботи енергоблоків ТЕС є підігрів повітря, яке подається у якості окислювача палива у паливню котла, у поєднанні з системою утилізації теплоти відхідних газів. Відомо, що використання підігріву повітря продуктами згорання палива у останніх по ходу газів поверхнях нагрівання дає можливість суттєво знизити температуру відхідних газів і підвищити ККД котлів.

Розробка сучасних компактних теплообмінних установок з урахуванням особливостей їх компонування та конструкції, нерівномірності розподілу теплових і гідравлічних параметрів, а також підвищення ефективності їх роботи не можлива без вирішення актуальної проблеми – інтен-

сифікації процесів теплообміну. Зі збільшенням потужностей теплоенергетичного обладнання помітно зростають масогабаритні характеристики теплообмінників. Задача зменшення їх об'єму та маси, підтримання стабільного температурного рівня елементів обладнання за рахунок інтенсифікації процесів теплообміну є важливою і забезпечує значну економію металу на виготовлення конвективних поверхонь нагрівання теплообмінного устаткування. Дослідження процесів гідродинаміки в існуючих конструкціях конвективних регенеративних обертових повітропідігрівниках (РПП) необхідні для вдосконалення цих конструкцій.

**Мета роботи**

Вивчення теплообмінних та гідродинамічних характеристик холодного шару регенеративного повітропідігрівника РПП-88 котла ТГМП-314 з різних профілів уніфікованих набивок: з однопрофільних листів та спрощеного профілю з корозійностійкою емаллю з метою порівняння експлуата-

ційних показників роботи енергетичного обладнання.

### Аналіз останніх публікацій та досліджень

Гофровані листи холодного шару набивки РПП виготовляються [1]:

- із захисним покриттям (емальюванням), в основі – лист Ст08 КП та двохстороннє покриття захисним кислотостійким емалевим шаром;
- без захисного шару – сталь 10ХСНД або сталь 08пс товщиною 1–1,2 мм.

Як відомо з [1] для забезпечення тривалої експлуатації теплообмінної поверхні в умовах агресивного сірчаноокислого середовища відхідних газів котла нагрівальні набивки пакетів холодного шару, що знаходяться в зоні найбільшого корозійного зносу, покривається двошаровим покриттям кислотостійкої емалі марки А-20 (ЕСК-20). Товщина емалевого покриття складає 0,16–0,35 мм на кожен шар.

Дослідження [1] показали високу ефективність застосування емалевої набивки шару РПП на котлах, що працюють навіть на високосірчистих паливах. Емальована набивка пакетів холодного шару по стійкості перевищує набивку із сталі марки 10ХСНД і 10ХНДП приблизно в 1,5–3 рази і менш чутлива до температурного режиму і інтен-

сивності забруднення. Як відомо [1, 3, 6] під час спалювання сірчистого мазуту корозійна стійкість емальованої набивки більш ніж в 5 разів вище порівняно із звичайною набивкою холодного шару РПП. Внаслідок зменшення шорсткості поверхні у випадку покриття листів емаллю, коефіцієнт тепловіддачі підвищується на 5 %, а аеродинамічний опір емальованої набивки знижується на 10 % порівняно з металевою набивкою і, крім того, полегшується чищення поверхні від зольних відкладень.

Для спрощення технології виготовлення пакетів набивки [2] та для заміни інтенсифікованої набивки, що відпрацювала ресурс, була розроблена уніфікована набивка. Вона складалась з однопрофільних листів з різним кроком між прямими гофрами (рис. 1а). Еквівалентний діаметр набивки складає 9,8 мм.

У холодній частині РПП-88 котла ТГМП-314 [2] на початку експлуатації була встановлена набивка спрощеного профілю з гладкого і дистанційуючого листів з поздовжніми гофрами без нахилу (рис. 1б). В останні роки в холодній частині РПП встановлюють уніфіковану набивку спрощеного профілю (рис. 1в). Для захисту від низькотемпературної корозії листи набивки вкривають корозійностійкою емаллю. Для зниження інтенсивності забруднення каналів еквівалентний діаметр набивки збільшений до 11,5 мм.

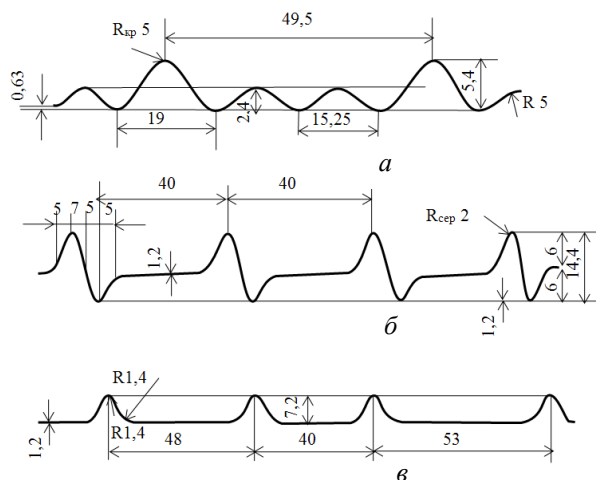


Рис. 1 – Профілі листів набивки холодної частини РПП

У роботі [4] представлено аналітичний розв'язок задачі про нерівномірний розподіл температури газів після регенеративного обертового повітропідігрівника, показано, що має місце значний градієнт температури у вихідному перетині. Однак, у роботі виконано розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від газів у випадку руху в каналі набивки холодного шару в турбулентному режимі без врахування наявності емалевого покриття.

У роботах [5, 7] представлені експериментальні залежності критерію  $Nu$  і коефіцієнта тертя  $\lambda_{тр}$  від числа  $Re$  для конструкцій набивок, виконаних із сталевих листів. Однак, всі розрахунки ви-

конані без врахування наявності емалевого покриття.

У роботі [8] описано дослідження коефіцієнта гідравлічного опору набивки з трикутними каналами пакету холодного та гарячого шару РПП. Побудовано графічну залежність зміни коефіцієнта гідравлічного опору набивки з трикутними каналами від числа Рейнольдса за різних значень довжини заміщених ділянок. Хоча у роботі досліджені набивки холодного шару РПП, однак трикутні канали пакету конструктивно відмінні від досліджуваних профілів.

### Основний матеріал

Дослідження процесів теплообміну і гідравлічного опору в прямих каналах чистої емальованої набивки холодного пакету шару набивки РПП виконується за формулами для гладкої труби з дещо зміненими внаслідок впливу технологічної шорсткості коефіцієнтами пропорційності  $C_f$  (коефіцієнт, що залежить від геометрії каналу набивки).

Для емальованої набивки теплообмін розраховується за формулою [2]:

$$\frac{Nu}{Nu_0} = 0,9, \quad (1)$$

де  $Nu_0 = 0,023 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,4} C_f C_\Phi$  – число Нуссельта для гладкого каналу;

$C_f$  – поправка на відносну довжину каналу;

$C_\Phi$  – поправка на температурний фактор.

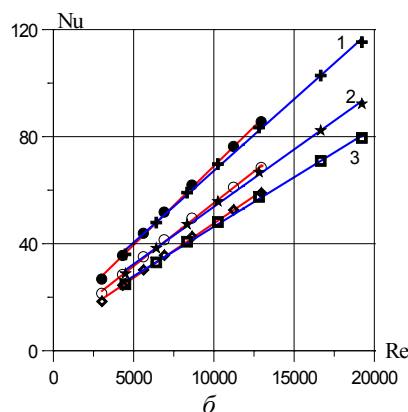
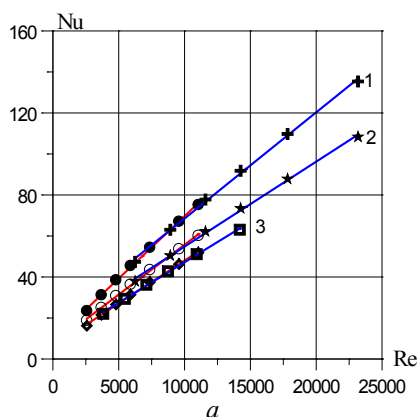


Рис. 2 – Залежність критерію Nu від числа Re для уніфікованої набивки холодного пакету: а – з однопрофільних листів (рис. 1а) з  $d_e = 9,8$  мм; б – спрощеного профілю з корозійностійкою емаллю (рис. 1б) з  $d_e = 11,5$  мм; за умов: 1 –  $L = 30$  мм; 2 –  $L = 70$  мм; 3 –  $L = 110$  мм; червона лінія – димові гази з середньою температурою  $145$  °С; синя лінія – повітря з середньою температурою  $50$  °С

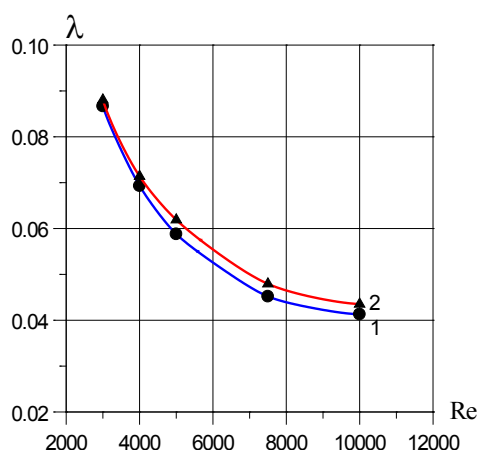


Рис. 3 – Залежність коефіцієнта опору набивки від числа Рейнольдса за різних значень довжини заміщених ділянок  $30 < L < 110$  мм для уніфікованих набивок холодного пакету РПП: 1 – з однопрофільних листів (рис. 1а) з  $d_e = 9,8$  мм; 2 – спрощеного профілю з корозійностійкою емаллю (рис. 1б) з  $d_e = 11,5$  мм

Гідравлічний опір емальованої набивки холодного пакету РПП розраховується за формулою [2]:

$$\lambda = \frac{0,303}{(\lg Re - 0,9)^2} C_l, \quad (2)$$

де  $C_l$  – поправка на відносну довжину каналу.

### Обговорення результатів

Для визначення критерію Нуссельта для уніфікованих набивок холодного пакету РПП зі сторони повітря і димових газів було обрано діапазон зміни швидкостей  $7 < \omega < 30$  м/с. Результати представлені на рис. 2. Теплопровідність, в'язкість та значення критерію Прандтля для повітря і димових газів були визначені за середніх температур теплоносіїв у експлуатаційному режимі роботи котла.

Як видно з рис. 2 інтенсивність теплообміну в уніфікованій набивці спрощеного профілю з корозійностійкою емаллю з боку димових газів є у 1,14 разів більшою ніж у уніфікованій набивці з однопрофільних листів для всіх досліджених значень довжин заміщених ділянок  $L$ . Однак, з боку повітря інтенсивність теплообміну в уніфікованій набивці спрощеного профілю є у 0,76 рази меншою ніж у уніфікованій набивці з однопрофільних листів у дослідженому діапазоні зміни  $L$ . Збільшення еквівалентного діаметру набивки у 1,17 раз призводить до зниження інтенсивності забруднення каналів та одночасної зміни коефіцієнтів тепловіддачі з повітряної та газової сторін, що є абсолютно виправданим.

Для діапазону значень числа Рейнольдса  $3000 < Re < 10000$  за різних значень довжини заміщених ділянок  $L$  побудовані графічні залежності коефіцієнта опору набивки (рис. 3) за формулою (2).

З аналізу рис. 3 бачимо, що у області, близької до турбулентного режиму ( $Re \approx 10^4$ ), значення коефіцієнта опору для набивки (рис. 1б) є у

1,05 рази більшим, ніж для уніфікованої набивки з однопрофільних листів (рис. 1а).

Зміна коефіцієнта опору досліджених набивок в області, близької до ламінарного режиму ( $Re \approx 3000$ ) має подібний характер, однак значення коефіцієнта опору  $\lambda$  є більшим у 1,016 рази. Зростання коефіцієнта опору є не значним, суттєво не впливає на експлуатаційні характеристики набивок.

### Висновок

Для дослідження теплообмінних і гідродинамічних характеристик холодного шару РПП використано уніфіковані набивки з однопрофільних листів та спрощеного профілю з корозійностійкою емаллю. Емальована набивка пакетів холодного шару по стійкості перевищує набивку із сталі приблизно в 1,5–3 рази і менш чутлива до температурного режиму і інтенсивності забруднення.

Основними параметрами, що впливають на теплотехнічні показники набивки є геометричні розміри хвилі, а також еквівалентний діаметр. Уніфікована набивка спрощеного профілю має збільшений у 1,17 раз еквівалентний діаметр та характеризуються хорошими експлуатаційними параметрами та враховує небезпеку забруднень поверхонь нагрівання за рахунок емалевого покриття. Встановлено, що з боку димових газів для області, близької до турбулентного режиму, збільшення довжини заміщених ділянок  $L$  у 3,67 рази такої насадки призводить до зростання інтенсивності теплообміну у 1,14 разів. У цій же області значення коефіцієнта опору для набивки спрощеного профілю з корозійностійкою емаллю є у 1,05 рази більшим, ніж для уніфікованої набивки з однопрофільних листів.

### Список літератури

1. ТУ РБ 200022862.043-2002 Пакеты горячего и холодного слоя с интенсифицированной набивкой повышенной тепловой эффективности для регенеративных вращающихся воздухоподогревателей. – URL: <https://studlib.ru/doc/2048856/pakety-goryachego-i-holodnogo-sloya> (дата звернення: 02.08.2019).
2. Мисак Й. С. Підвищення ефективності роботи РПП та економічності котлоагрегатів ТЕС : моногр. / Й. С. Мисак, Т. І. Рymar, М. Ф. Заяць. – Львів: НВФ «Українські технології», 2018. – 242 с. – ISBN 978-617-7726-18-9.
3. Добряков Т. С. Воздухоподогреватели котельных установок / Т. С. Добряков, В. К. Мигай, В. С. Назаренко, И. И. Надьров, И. И. Федоров. – Ленинград: Энергия, 1977. – 184 с.
4. Соколов А. В. Анализ эффективности использования теплоты уходящих газов после регенеративных вращающихся воздухоподогревателей / А. В. Соколов, В. С. Белоусов, А. Ю. Большихин // Омский научный вестник. – 2010. – № 3(93). – С. 185–187. – ISSN 1813-8225 (print). – ISSN 2541-7541 (on-line).

5. Губарев А. Ю. Повышение эффективности работы регенеративного воздухоподогревателя котла БКЗ-420-140НГМ / А. Ю. Губарев, А. А. Кудинов // Межвузовский сборник научных трудов «Повышение энергоэффективности зданий и сооружений». – Самара: СГАСУ, 2012, в. 7, С. 46–55.
6. Боткачик И. А. Регенеративные воздухоподогреватели парогенераторов / И. А. Боткачик. – Москва: Машиностроение, 1978. – 174 с.
7. Губарев А. Ю. Совершенствование конструкций вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов ТЭС : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 Тепло-вые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты : защищена 03.03.17 / Антон Юрьевич Губарев. – Иваново: ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», 2016. – 187 с. – URL: <https://www.disscat.com/content/sovershenstvovanie-konstruktivnykh-vrashchayushchikhsya-regenerativnykh-vozdukhopodogrevatelei-> (дата звернення: 02.08.2019).
8. Rymar T. Research of the coefficient of hydraulic resistance of padding with triangular channels of the package of cold and hot layer of RAH / T. Rymar, T. Kravets, O. Smirnov, V. Kleman // VIII Міжн. молодіжний науковий форум "Litteris et Artibus" & 13-та Міжнародна конф. «Молоді вчені до викликів сучасної технології»: матеріали, 22–24 листопада, 2018, Львів, Україна. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2018. – С. 131–132.

### References (transliterated)

1. (2002), *TU RB 200022862.043-2002. Pakety goryachego i holodnogo sloya s intensifitsirovannoy nabivkoy povyishennoy teplovoj effektivnosti dlya regenerativnykh vraschayushchihsvya vozduhopodogrevateley*, Access mode: <https://studlib.ru/doc/2048856/pakety-goryachego-i-holodnogo-sloya> (accessed 02 September 2021).
2. Mysak Y. S., Rymar T. I., Zayats M. F. (2018), *Pidvyshchennya efektyvnosti roboty RPP i ekonomichnosti kotloahrehativ TES, NVF "Ukrayinski tekhnolohiyi"*, Lviv, ISBN 978-617-7726-18-9.
3. Dobryakov T. S., Myhay V. K., Nazarenko V. S., Nadyrov I. I., Fedorov I. I. (1977), *Vozdukhopodohrevately kotelnuh ustanovok*, Enerhiya, Leningrad, 184 p.
4. Sokolov A. V., Belousov V. S., Bolshikhin A. Yu. (2010), "Analiz effektivnosti ispolzovaniya teploty uhodyaschih gazov posle regenerativnykh vraschayushchihsvya vozduhopodogrevateley [Efficiency studies of gas heat recovery after regenerative rotating air heaters], *Omskiy nauchnyy vesnik [Omsk Scientific Bulletin]*, no. 3(93), pp. 185–187, ISSN 1813-8225 (print), ISSN 2541-7541 (on-line).
5. Gubarev A. Yu., Kudinov A. A. (2012), "Povyishenie effektivnosti raboty regenerativnogo vozduhopodogrevatelya kotla BKZ-420-140NGM", *Poster session presented at the "Povyishenie energoeffektivnosti zdaniy i sooruzheniy"*, no. 7, pp. 46–55, SGASU, Samara,
6. Botkachik I.A. (1978), *Regenerativnyie vozduhopodogrevately parogeneratorov*, Mashinostroenie, Moscow, 174 p.
7. Gubarev A. Yu. (2016), "Sovershenstvovanie konstruktivnykh vraschayushchihsvya regenerativnykh vozduhopodogrevateley energeticheskikh kotlov TES", PhD thesis. Access mode: <https://www.disscat.com/content/sovershenstvovanie-konstruktivnykh-vrashchayushchikhsya-regenerativnykh-vozdukhopodogrevatelei-> (accessed 02 September 2021).
8. Rymar T., Kravets T., Smirnov O., Kleman V. (2018), "Research of the coefficient of hydraulic resistance of padding with triangular channels of the package of cold and hot layer of RAH", *Poster session presented at the VIII Mizhnarodnyi molodizhnyi naukovyi forum "Litteris et Artibus"*, 22–24 November 2018, Lviv Polytechnic Publishing House, Lviv, pp. 131–132.

Надійшла (received) 19.08.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Рymar Тетяна Іванівна (Rymar Tatjana Ivanovna, Rymar Tetiana)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій, Національний університет «Львівська політехніка»; м. Львів, Україна; e-mail: Tetiana.I.Rymar@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7662-2063>.