

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 536.24:66.045.12

М.М. Вознюк, мол. наук. співроб., ORCID 0000-0002-2452-2255
С.М. Письменний, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596
О.М. Терех, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., ORCID 0000-0002-1320-8594
В.Ю. Ліщишин, аспірант, ORCID 0000-0003-4327-3319
Д.В. Конько, магістр 6 курсу, ORCID 0000-0001-6469-3529
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПЛОСКООВАЛЬНИХ ТРУБ З НЕПОВНИМ ОРЕБРЕННЯМ В УМОВАХ ПРИРОДНОЇ ТЯГИ

Розглянута ефективність перевodu апаратів повітряного охолодження у режим вільної конвекції. Встановлена доцільність встановлення витяжної башти над теплообмінною поверхнею апарату повітряного охолодження та його переведення у режим природної тяги. Відзначена можливість застосування плоскоовальних труб з неповним оребрнням у конструкціях апаратів повітряного охолодження з природною тягою. Проведені варіантні розрахунки апарату повітряного охолодження на базі найпоширеніших на ринку України оребrenних труб, в якому необхідна для забезпечення теплової потужності кількість повітря забезпечується лише за рахунок витяжної башти. Співставлення результатів розрахунків показують, що найкращі техніко-економічні показники має варіант апарату повітряного охолодження на базі плоскоовальних труб з неповним оребрнням. Сума капітальних витрат на виготовлення апарату повітряного охолодження на базі плоскоовальних труб з неповним оребрнням на 47% менша за варіант апарату на базі біметалевих труб з накатаним спіральним оребрнням та в 2 рази менша за варіант виконання апарату повітряного охолодження на базі труб з приварним спіральнo-стрічковим оребрнням або овальних труб з овальним оребрнням.

Ключові слова: енергоефективність, теплообмін, оребrena труба, природна тяга, апарат повітряного охолодження

Вступ

При будівництві нових та при переоснащенні існуючих енергетичних, нафтохімічних, газотранспортних, виробничих та інших підприємств все більшого розповсюдження набувають апарати повітряного охолодження (АПО) різноманітних рідин (води, природного газу, гасу, етилен- та пропілен-гліколів, мастила та інш.). В таких теплообмінних апаратах охолодження рідини здійснюється за допомогою атмосферного повітря, необхідна витрата якого через теплообмінну поверхню АПО здійснюється за допомогою встановлюваних витяжних або нагнітаючих вентиляторів [1]. При цьому, для забезпечення необхідної витрати повітря через теплообмінну поверхню АПО потужністю 1 МВт, необхідна встановлювана потужність двигунів вентиляторів становить близько 18 кВт. Річна витрата електроенергії на привід вентиляторів становить до 100 МВт·год, що відповідає близько 224 тис. грн. витрат підприємства на рік.

Для зменшення кількості витрат електроенергії авторами [2–4] було запропоновано виконувати протягом певної пори року перевід АПО у безвентиляторний режим роботи. При цьому відвід теплового потоку від робочого тіла АПО виконується у режимі природної конвекції. За даними джерел [2–4], загальна економія електроенергії при цьому становить до 37 % від загального річного споживання. Крім того, у роботі [5] запропоновано для розширення можливого річного діапазону роботи АПО у безвентиляторному режимі проводити встановлення додаткової витяжної башти. Таке рішення переводить режим роботи АПО у режим природної тяги та дозволяє знизити річну витрату електроенергії на привід вентиляторів до 55%.

© М.М. Вознюк, С.М. Письменний, О.М. Терех, В.Ю. Ліщишин, Д.В. Конько, 2020

Дослідженню теплообмінних апаратів з витяжною баштою присвячені праці [6–8]. У даних роботах розглядається вплив розташування теплообмінної поверхні, висоти та розташування витяжної башти на ефективність роботи теплообмінного пристрою.

Варто відмітити, що головним елементом АПО, від якого в цілому залежить ефективність його роботи є поверхня теплообміну. Як правило, поверхня теплообміну виконується у вигляді пакету гладких, або частіше, оребрених труб. Найпоширенішими оребреними трубами, які використовуються в поверхнях теплообміну АПО на сьогоднішній день є ребристі труби круглого профілю. У роботах [9–12] показані значні переваги використання розроблених у КПІ ім. Ігоря Сікорського плоскоовальних труб з неповним оребренням у конструкціях АПО. До цих переваг слід віднести високу інтенсивність конвективного теплообміну, низький аеродинамічний опір, простоту та технологічність виготовлення таких труб та відсутність контактної термічної опору між трубою та оребренням.

Мета та завдання дослідження

У роботах [13–16] розглядається теплообмін та аеродинамічний опір плоскоовальних труб в умовах вільної конвекції та природної тяги. Проте у даних працях та доступній літературі відсутні дані щодо співставлення ефективності роботи плоскоовальних труб з неповним оребренням у порівнянні з іншими розповсюдженими ребристими трубами в вищенаведених умовах.

Метою роботи є проведення аналізу доцільності використання плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги. Даний аналіз найбільш доцільно виконати шляхом порівняння ефективності різних типів оребрених поверхонь шляхом співставлення характеристик варіантів теплообмінного апарату, виконаного на базі найбільш розповсюджених на ринку України оребрених труб. У якості такого теплообмінного апарату було обрано апарат повітряного охолодження (рис. 1, б), у якому забезпечення проходу необхідної кількості повітря через поверхню теплообміну (поз. 1 рис.1) виконується за допомогою витяжної башти (поз. 5 рис.1). Завдяки такому рішенню з конструкції АПО виключаються осьові вентилятори (поз. 3 рис.1) та їх дифузори (поз. 4 рис.1) та повністю виключаються витрати електроенергії на привід вентиляторів.

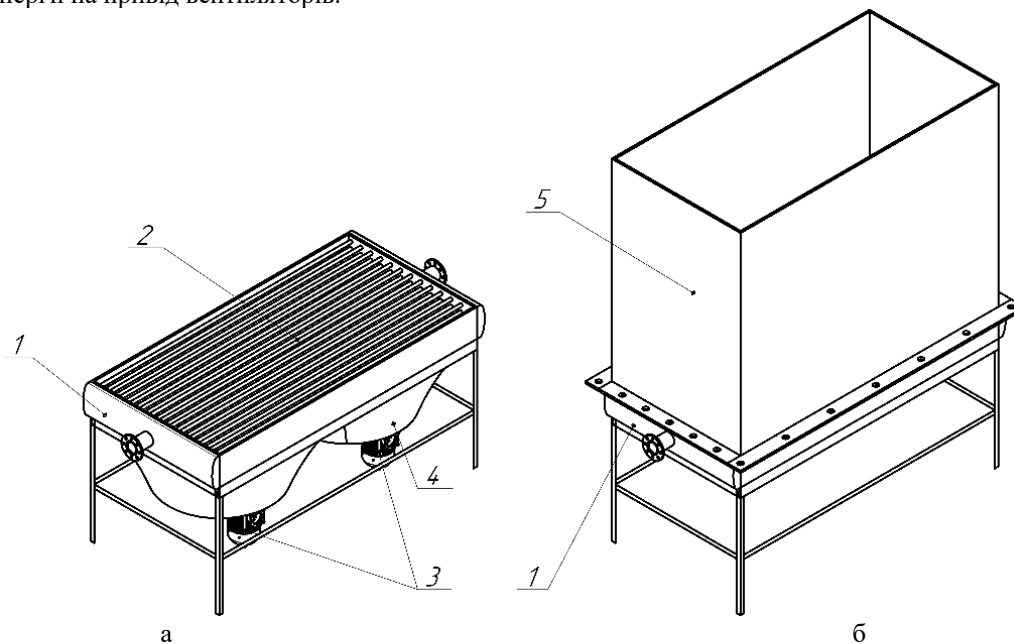


Рис. 1. Загальний вигляд апарату повітряного охолодження:
а – з встановленими вентиляторами; б – з встановленою витяжною баштою
1 – теплообмінна секція; 2 – оребрена труба; 3 – осьовий вентилятор з двигуном;
4 – дифузор; 5 – витяжна башта

Для досягнення мети дослідження були поставлені наступні задачі:

- Виконати варіантні розрахунки апарату повітряного охолодження з природною тягою на базі найбільш поширених оребрених труб;
- Провести аналіз розрахунків та оцінити техніко-економічну ефективність використання плоскоовальних труб з неповним оребренням у якості теплообмінної поверхні АПО з природною тягою.

Матеріал і результати досліджень

Для виконання варіантних розрахунків АПО з природною тягою були обрані чотири найбільш поширені типи оребрених труб, представлені на ринку України – плоскоовальні труби з неповним

оробренням, труби з приварним спірально-стрічковим оребренням, біметалеві труби з накатаним спіральним оребренням, та овальні труби з неповним оребренням, які мають приблизно однакові значення периметрів їх внутрішніх перетинів. Загальний вигляд даних труб представлений на рис. 2. Геометричні характеристики даних оребрених труб були обрані у відповідності до їх наявності на ринку та представлені у таблиці 1. Слід зазначити, що у всіх згаданих варіантах труби розташовувались у шаховому компонуванні (рис.3).

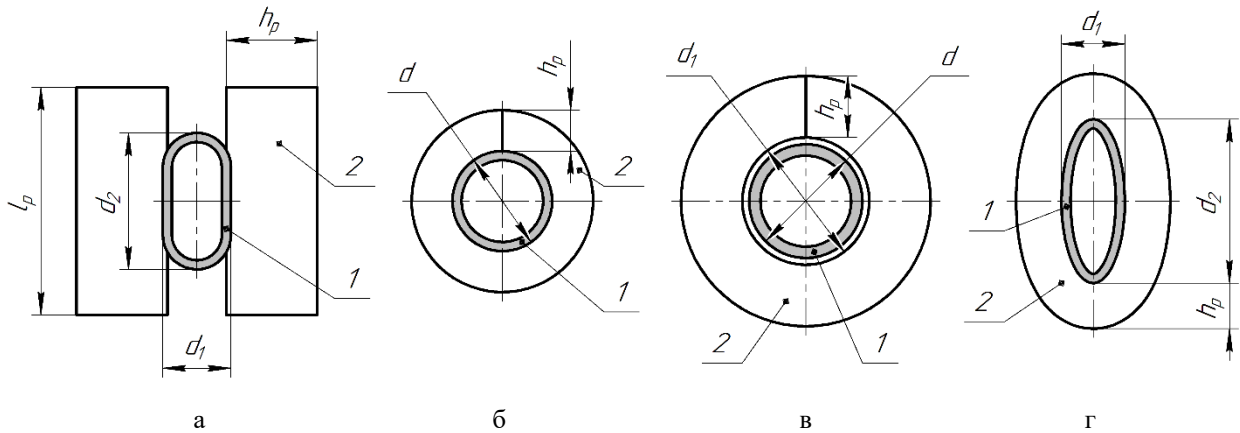


Рис. 2. Типи оребрених труб, що порівнюються:

- а – плоскоовальна труба з неповним оребренням; б – труба з приварним спірально-стрічковим оребренням;
в – біметалева труба з накатаним спіральним оребренням; г – овальна труба з неповним оребренням
1 – труба що несе оребрення; 2 – оребрення

Розрахунки АПО з витяжною баштою на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням проводилось за методиками та розрахунковими залежностями, наведеними у [15-17], на базі труб з приварним спірально-стрічковим оребренням та біметалевих труб з накатаним спіральним оребренням – за методиками та розрахунковими залежностями [17-19], на базі овальних труб з неповним оребренням – за методиками та розрахунковими залежностями [17, 19, 20].

Таблиця 1 – Геометричні характеристики порівнюваних типів оребрених поверхонь

№ з/п	Найменування величини	Позначення	Значення			
			Плоскоовальні труби з неповним оребренням	Труби з приварним спірально-стрічковим оребренням	Біметалеві труби з накатаним спіральним оребренням	Овальні труби з овальним оребренням
1	Відношення діаметрів труби, що несе оребрення	d_2/d_1	2,0	–	–	2,6
2	Діаметр труби, що несе оребрення	d , м	–	22,0	28,0	–
3	Висота ребра	h_p , м	20,0	9,0	13,5	10,0
4	Довжина ребра	l_p , м	50,0	–	–	–
5	Товщина ребра	δ_p , мм	0,8	0,8	0,5	0,5
6	Крок ребер	t , мм	3,5	3,2	3,0	3,0
7	Повна площа поверхні одного погонного метру	H_1 , м ² /м.п.	1,238	0,631	1,275	0,841
8	Коефіцієнт оребрення	ψ	16,0	9,1	14,5	10,2
9	Матеріал труби, що несе оребрення	–	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь
10	Матеріал оребрення	–	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь	Алюміній	Вуглецева сталь

У якості теплообмінного апарату для порівняння було обрано апарат повітряного охолодження з природною тягою потужністю 1 МВт. Температура рідини на вході складала 80 °С, на виході – 65°С. При розрахунках приймалося, що забезпечення необхідної витрати повітря (25 м³/с) для відведення заданої потужності у всьому діапазоні навантажень здійснюється лише за допомогою витяжної башти.

Співставлення виконувалося по чотирьох найбільш важливих характеристиках – загальній довжині оребрених труб L_{mp} , тепловій потужності, що відводиться від одного погонного метру труби q ,

аеродинамічному опору теплообмінного апарату ΔH , та пов'язаною з ним висотою витяжної башти H_b . У якості узагальнюючого критерію, який показує економічну доцільність застосування того чи іншого типу труб, було обрано суму капітальних витрат на виготовлення теплообмінного апарату $\Sigma_{\text{кап}}$.

Результати даного співставлення представлені у табл. 2 та на рис. 4-6.

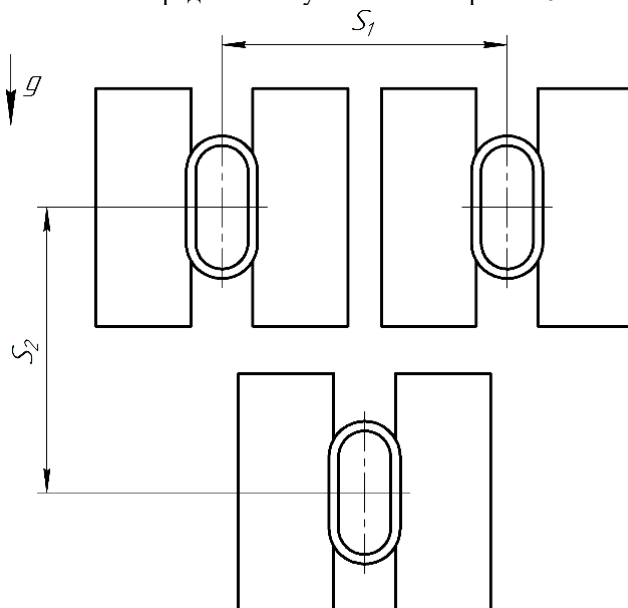


Рис. 3. Геометричні характеристики шахового пакету оребрених труб

Таблиця 2 – Співставлення техніко-економічних характеристик апарату повітряного охолодження з природною тягою на базі різних типів оребрених поверхонь

№ з/п	Найменування величини	Позначення	Значення			
			Плоскоовальні труби з неповним оребренням	Труби з приварним спіральним стрічковим оребренням	Біметалеві труби з накатаним спіральним оребренням	Овальні труби з овальним оребренням
1	Поперечний крок труб шахового пакету	S_1 , мм	60	45	56	48
2	Поздовжній крок труб шахового пакету	S_2 , мм	60	50	60	46
3	Загальна довжина оребрених труб	$L_{\text{пр}}$, м	912	1 632	1 080	1 408
4	Теплова потужність, що відводиться від одного погонного метру труби	q_l , кВт/м.п.	1,10	0,61	0,93	0,71
5	Аеродинамічний опір апарату повітряного охолодження	ΔH , Па	20,2	29,5	27,6	18,5
6	Необхідна висота витяжної башти	H_b , м	16	23,4	21,8	14,6
7	Сума капітальних витрат на виготовлення теплообмінного апарату	$\Sigma_{\text{кап}}$, грн	1 072 000	2 248 000	1 582 000	1 926 000

Як слідує з табл. 2 та рис. 5, найменші довжини труб та, відповідно, найбільші теплові потужності, що відводяться від одного погонного метру труби спостерігаються для плоскоовальних труб з неповним оребренням та для біметалевих труб з накатаним спіральним оребренням. Ці величини вагомою мірою визначають трудомісткість виготовлення теплообмінного апарату та його вартість. Проте для випадку розгляду АПО з витяжною баштою є вагомим аеродинамічний опір теплообмінного апарату та відповідна висота башти. З табл. 2 та рис. 5 випливає, що найменші аеродинамічні опори та, відповідно, висоти

витяжних башт мають АПО на базі овальних труб з овальним оребренням та плоскоовальних труб з неповним оребренням.

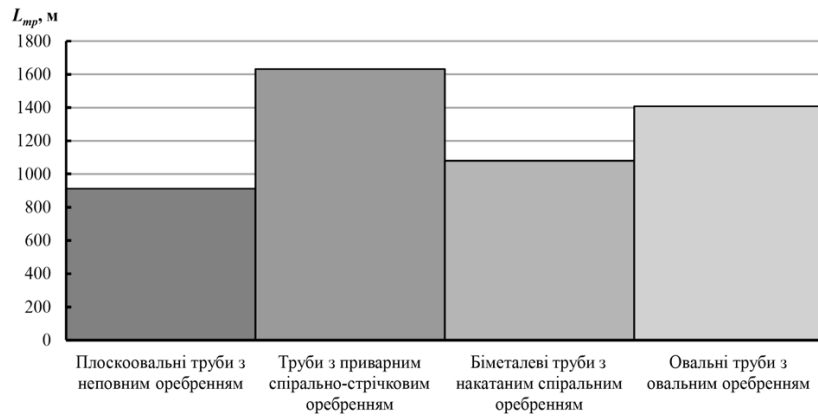


Рис. 4 – Співставлення довжин труб L_{mp} апаратів повітряного охолодження з природною тягою на базі різних типів оребрених труб

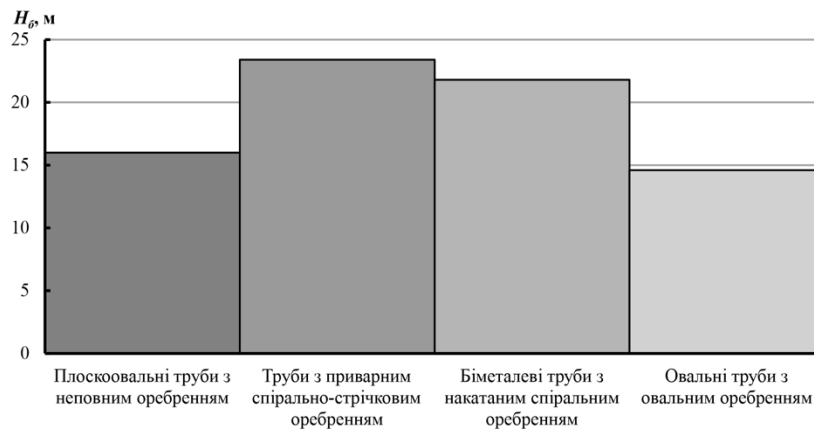


Рис. 5 – Співставлення висот башт H_b апаратів повітряного охолодження з природною тягою на базі різних типів оребрених труб

Загальною характеристикою, за якою можна визначити найбільш ефективну поверхню теплообміну є загальна сума капітальних витрат на виготовлення теплообмінного апарату $\Sigma_{\text{кап}}$. Дана величина враховує як і загальну довжину труб, кількість необхідних зварних з'єднань та кількість супутніх матеріалів, так і необхідну висоту витяжної башти. Слід зазначити, що експлуатаційні витрати та площа, яку займає АПО для всіх чотирьох вищезгаданих варіантів є практично ідентичною. Порівняння загальних сум капітальних витрат на виготовлення теплообмінного апарату $\Sigma_{\text{кап}}$ зображені на рис. 6.

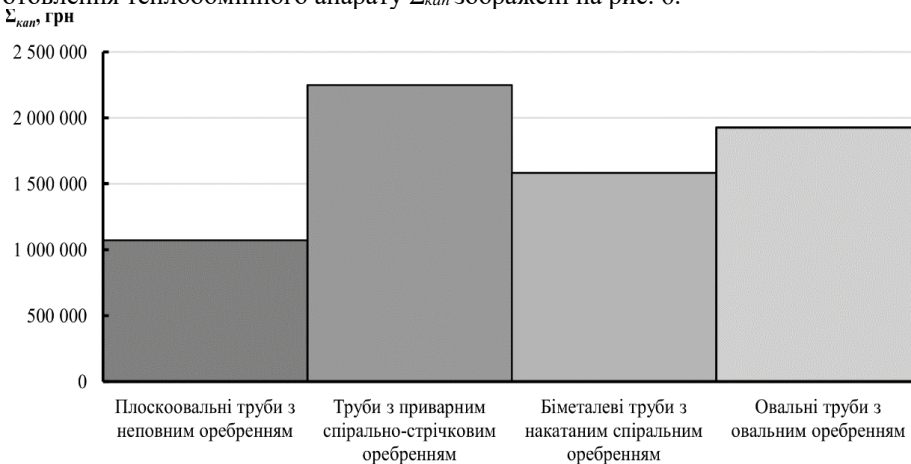


Рис. 6 – Співставлення сум капітальних витрат на виготовлення апаратів повітряного охолодження з природною тягою на базі різних типів оребрених труб

Слід відзначити, що $\Sigma_{\text{кап}}$ відображає всі необхідні витрати на виготовлення теплообмінного апарату з точки зору заводу-виготовлювача – вартість придбання відповідних оребрених труб, супутніх металоконструкцій та комплектуючих, вартість трудових витрат та вартість виготовлення і встановлення витяжної башти.

Як впливає з рис. 6, найбільш вигідним варіантом виготовлення АПО з природною тягою за сумою капітальних витрат на виготовлення є варіант його виконання на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням. Цей варіант на 47% дешевший за наступним за вартістю варіантом виконання АПО – на базі біметалевих труб з накатаним спіральним оребренням та в 2 рази дешевший за варіант виконання АПО на базі труб з приварним спірально-стрічковим оребренням або овальних труб з овальним оребренням.

Висновки

За результатами проведених варіантних розрахунків апарату повітряного охолодження з природною тягою було визначено, що варіант АПО на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням має найменшу довжину оребрених труб, найбільшу теплову потужність, що відводиться від одного погонного метру труби та прийнятну висоту витяжної башти. Крім того, варіант АПО на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням має найменшу суму капітальних витрат на його виготовлення. Це дозволяє підтвердити техніко-економічну привабливість плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги. Крім того, варто відзначити, що запропоноване рішення проектування АПО з витяжною баштою дозволить підприємству економити до 100 МВт·год електричної енергії на 1 МВт встановленої потужності АПО щорічно, підвищити загальну ефективність роботи підприємства та знизити викиди парникових газів в атмосферу.

Враховуючи дане дослідження та наведені у [9-12] переваги таких труб при їх роботі у режимі вимушеної конвекції, доцільним є застосування плоскоовальних труб з неповним оребренням у конструкціях апаратів повітряного охолодження при будь-якому режимі їх роботи. Опанування технології серійного масового виготовлення таких труб дозволить налагодити виробництво вітчизняних сучасних ефективних апаратів повітряного охолодження, та інших рекуперативних пристроїв типу «газ-рідина» та відмовитись від імпорту коштовного зарубіжного теплообмінного обладнання.

Список використаної літератури

1. Кунтыш В.Б. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения (Справочник) / А.П. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш, и др.; Под общ. ред. В.Б. Кунтыша., А.Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
2. Кунтыш В.Б. Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. В. Самородов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 12. – С. 3-6.
3. Камалетдинов И.М. Расчет свободноконвективного теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) газа с учетом влияния ветра на их работу // Изв. Вузов. Нефть и газ. – 2001. – №5. С. 71-74
4. Васильев Ю.Н. Эксплуатация систем воздушно-водяного охлаждения в режиме естественной конвекции / Ю.Н. Васильев, В.С. Золотаревский, Г.А. Марголин, Н.П. Крюков // Газовая промышленность. 1972. - №6. - С. 23-25.
5. Письменный С.М., Терех О.М., Руденко О.І., Ніщик О.П., Вознюк М.М. Спосіб енергозбереження в апараті повітряного охолодження / Патент на корисну модель UA №110702. 25.10.2016. Бюл. №20.
6. Сухоцкий А.Б. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком / А.Б. Сухоцкий, Г.С. Маршалова // Инженерно-Физический Журнал. – 2019. Т.92 №3. – С. 619-625
7. Мильман О.О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О.О. Мильман, Б.А. Алешин // Теплоэнергетика. –2005. № 5. – С. 16-19.
8. K. Tanimizu. Natural draft dry cooling tower modelling / K. Tanimizu, K. Hooman // International Journal of Heat and Mass Transfer – 2013/ - Vol. 49 – pp. 155-161.
9. Pis'mennyi E. N. Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes. Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 106. P. 1075 – 1087.
10. Письменный Е.Н. Новые эффективные развитые поверхности теплообмена для решения задач энерго-и ресурсосбережения // Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №5. – С. 7-16.
11. Письменный Е. Н. Оптимизация оребрения новой теплообменной поверхности на основе плоскоовальных труб / Е. Н. Письменный, П. И. Багрий, А.М. Терех, А.В. Семеняко // Инженерно-физический журнал – 2013. Т.86 №5. – С. 1002-1007.

12. Багрий П.И. Сравнение тепловой эффективности шахматных пучков поперечно-оребранных труб различного профиля / П.И. Багрий, А.М. Терех, В.А. Рогачев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №6/5 (30). – С. 51-56.
13. Вознюк, М. М. Теплообмін плоскоовальних труб в умовах вільної конвекції і природної тяги [Текст] / М. М. Вознюк, О. М. Терех, О. І. Руденко, С. А. Рева, О. В. Баранюк // Науковий журнал "ScienceRise". – 2016. – №2/2(19). – С. 10-15.
14. Вознюк, М. М. Теплообмін пакетів плоскоовальних оребрених труб в умовах вільної конвекції і природної тяги / М. М. Вознюк, О. М. Терех, В.А. Рогачов, О. В. Баранюк // Науковий журнал "Енергетика економіка, технології, екологія". – 2016. – №2/(44). – С. 46-53.
15. Вознюк, М. М. Теплообмін поперечно-омиваних шахових пучків плоскоовальних оребрених труб при малих числах Рейнольдса / М. М. Вознюк, В.А. Рогачов, О. М. Терех, О. В. Баранюк // Науковий журнал "ScienceRise". – 2015. – №5/2(10). – С. 36-40.
16. Вознюк, М. М. Аеродинамічний опір шахових пакетів плоскоовальних оребрених труб при малих числах Рейнольдса / М. М. Вознюк, І. С. Башкір, О. М. Терех, В.А. Рогачов, О. І. Руденко // Науковий журнал "ScienceRise". – 2015. – №6/2(11). – С. 90-94.
17. Письменный Е.Н. Расчет конвективных поперечно-оребранных поверхностей нагрева. Сборник расчетов. К.: Альтерпрес, 2003. – 184 с.
18. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребранных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. – М.: Минэнергомаш – 1988. – 30 с.
19. Кунтыш В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. – С-Пб. : Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд., 1992. — 280 с
20. Юдин В. Ф. Теплообмен пучков оребренных труб овального профиля / В. Ф. Юдин, Е. Д. Федорович // Теплообмен. – ММФ-92. – Конвективный теплообмен. Т. 1, ч. 1. – Минск :АНК ИТМО АНБ, 1992. – С. 58–61.

M. Vozniuk, JRF, ORCID 0000-0002-2452-2255

E. Pis'mennyi, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0001-6403-6596

A. Terekh, Cand. Sc. (Eng.), SRF, ORCID 0000-0002-1320-8594

V. Lishchyshyn, PhD student, ORCID 0000-0003-4327-3319

D. Konko, Master's student, ORCID 0000-0001-6469-3529

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANALYSIS OF ECONOMIC EFFICIENCY OF USING FLAT-OVAL TUBES WITH INCOMPLETE FINNING IN CONDITIONS OF NATURAL DRAFT

The efficiency of air coolers, working in free convection mode is considered. The expediency of installing an exhaust tower over the heat exchange surface of the air cooler and its transfer to the mode of natural draft has been established. The possibility of using flat-oval tubes with incomplete finning in the designs of air-cooled devices with natural draft is noted. Variant calculations of the aircooling device on the basis of the most widespread in the market of Ukraine finned tubes in which the quantity of air necessary for maintenance of thermal power is provided only by an exhaust tower are carried out. Comparisons of the results of calculations show that the best technical and economic indicators have a variant of the air cooler based on flat-oval tubes with incomplete finning. The amount of capital costs for the manufacture of air cooler based on flat-oval tubes with incomplete finning is 47% less than the heat exchanger based on bimetallic tubes with rolled spiral finning and 2 times cheaper than the option of aircooler based on tubes with welded spiral fins or oval pipes with oval finning.

Keywords: energy efficiency, heat transfer, finned tube, natural draft, air cooler.

REFERENCES

1. Kuntysch, V. B. Fundamentals of calculation and design of air coolers (Handbook) / A.N. Bessonnyi, G.A. Dreyser, V.B. Kuntysch, and others; Under the general editorship of VB Kuntysch., A.N. Bessonnyi. Saint-Petersburg.: Nedra, 1996. 512 p. (Rus.)
2. Kuntysch, V. B. Engineering method of thermal calculation of an air cooler in the free convective heat transfer mode / V. B. Kuntysch, A. B. Suhockiy, A. V. Samorodov // Chemical and oil and gas engineering. 2013. № 12. P. 3-6. (Rus.)
3. Kamaletdinov I.M. Calculation of free convective heat transfer in air coolers (AC) taking into account the effect of wind on their operation // Izvestiya Vuzov. Neft I gaz. 2001. №5. P. 71-74. (Rus.)

4. Vasilyev U.N. Operation of air-water cooling systems in natural convection mode / U.N. Vasilyev, V.S. Zolotarevskiy, G.A. Margolin, N.P. Kriukov // *Gazovaya Promyshlennost*. 1972. №6. pp. 23-25. (Rus.)
5. Pis'mennyi, E. N, Terekh A.M., Rudenko A.I., Nishcik A. P., Vozniuk M.M. The method of energy saving in the air cooling apparatus / Utility model patent UA №110702. 25.10.2016. Bul. №20. (Ukr.)
6. Suhockiy A.B. Features of the gravitational flow of heated air in the exhaust shaft over a multi-row finned bundle / A.B. Suhockiy, G.S. Marshalova // *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*. 2019. Vol.92 №3. pp. 619-625 (Rus.)
7. Milman O.O., Experimental study of heat transfer during natural air circulation in a model of an air condenser with an exhaust shaft / O.O. Milman, B.A. Alyoshyn // *Heat power engineering*. 2005. № 5. pp. 16-19. (Rus.)
8. K. Tanimizu. Natural draft dry cooling tower modelling / K. Tanimizu, K. Hooman // *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2013. Vol. 49 pp. 155-161.
9. Pis'mennyi E. N. Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 106. pp. 1075 – 1087.
10. Pis'mennyi, E. N. New efficient heat transfer surfaces for solving problems of energy and resource saving // *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2007. №5. pp. 7-16. (Rus.)
11. Pis'mennyi, E. N. Optimization of finning of new heat-exchange surface / E. N. Pis'mennyi, P.I. Bagriy, A. M. Terekh, A. V. Semenyako // *Journal of Engineering Physics*. 2013. Vol.86 №5. – pp. 1002-1007.
12. Bagriy P.I. Comparison of thermal efficiency of staggered bundles of cross-finned tubes of various profiles / P.I. Bagriy, A.M. Terekh, V.A. Rogachev // *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. – 2007. – №6/5 (30). – pp. 51-56. (Rus.)
13. Voznyuk, M. M. Heat transfer of flat-oval tubes with incomplete finning under conditions of free convection and natural draft / M. M. Voznyuk, A. M. Terekh, A. I. Rudenko, S. A. Reva, A. V. Baranyuk // *Scientific journal "ScienceRise"*. 2016. №2 / 2 (19). pp. 10-15. (Ukr.)
14. Voznyuk, M. M. Heat exchange of packages of flat-oval finned tubes in the conditions of free convection and natural draft / M. M. Voznyuk, A. M. Terekh, V.A. Rogachev, A. V. Baraniuk // *Scientific magazine "Energy: Economics, Technology, Ecology"*. 2016. №2/(44). – pp. 46-53. (Ukr.)
15. Voznyuk, M. M. Heat transfer of staggered bundles of flat-oval finned tubes at small Reynolds numbers / M. M. Voznyuk, V.A. Rogachev, A. M. Terekh, A. V. Baraniuk // *Scientific journal "ScienceRise"*. 2015. №5/2(10). pp. 36-40. (Ukr.)
16. Voznyuk, M. M. Aerodynamic drag of staggered bundles of flat-oval finned tubes at small Reynolds numbers / M. M. Voznyuk, I. C. Башкір, A. M. Terekh, V.A. Rogachev, O. I. Rudenko // *Scientific journal "ScienceRise"*. 2015. №6/2(11). pp. 90-94. (Ukr.)
17. Pis'mennyi, E. N. Calculation of convective transversely-finned heating surfaces. Collection of calculations. Kyiv: Alterpres. 2003. 184 p. (Rus.)
18. Calculation and recommendations for the design of transversely-finned convective heating surfaces of stationary boilers. – Moscow.: Minenergomash. 1988. 30p. (Rus.)
19. Kuntyshev V. B. Thermal and aerodynamic calculations for air-cooled finned heat exchangers / V. B. Kuntyshev, N. M. Kuznetsov. – Saint-Petersburg. : Energoatomizdat. Saint-Petersburg dep., 1992. 280 p (Rus.)
20. Udin V. F. Heat transfer of oval finned tube bundles / V. F. Udin, E. D. Fedorovich // *Heat and mass transfer*. – MMF-92. – Convective heat and mass transfer. Vol. 1, p. 1. Minsk : ANK ITMO ANB. 1992. pp. 58–61. (Rus.)

Надійшла 27.05.2020
Received 27.05.2020