

УДК 536.24: 62-714  
К 89

# ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГЕНЕРАТОРІВ ПРОМИСЛОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

В. В. Кузнецов, доц., канд. техн. наук;  
А. В. Якимович, магістрант

*Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв*

**Анотація.** Виконана порівняльна оцінка тепломасообмінних характеристик трубних пучків при використанні круглих та еліптичних труб. Визначені особливості теплообмінних процесів у стиснених пучках еліптичних труб.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, регенератор, теплопередача, інтенсифікація, еліптична труба.

**Аннотация.** Выполнена сравнительная оценка тепломасообменных характеристик трубных пучков при использовании круглых и эллиптических труб. Определены особенности теплообменных процессов в стесненных пучках эллиптических труб.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, регенератор, теплопередача, интенсификация, эллиптическая труба.

**Abstract.** The comparative estimation of heat-mass characteristics of tube banks with usage of round and elliptic pipes is given. Features of heat transfer processes in the close-tube banks of elliptic pipes are determined.

**Keywords:** gas turbine engine, regenerator, heat transfer, intensification, elliptical tube.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Електроенергетика та теплова енергетика є основою енергетичного балансу будь-якої країни. У структурі генеруючих потужностей нашої країни домінують теплові електростанції, на які припадає майже 66 % сукупної встановленої потужності. Переважна частина цих потужностей введена в експлуатацію ще в 60–70-х роках ХХ ст. і на сьогодні практично виробила свій ресурс.

Особливо негативно на стан теплової енергетики впливає робота в маневровому режимі, що зумовлено «провалом» споживання електроенергії в нічний час (з 23:00 до 6:00). За даними Мінпаливенерго України, нічний надлишок потужностей в Україні перевищує 1100 МВт і має тенденцію до зростання.

Тривала експлуатація застарілих теплових електростанцій у маневровому режимі загрожує виходом з ладу енергосистеми України. Щоб запобігти цьому, необхідно забезпечити роботу теплових електростанцій в умовах, близьких до постійного навантаження, що досягається застосуванням промислових газових турбін, добре пристосованих для роботи в маневровому режимі [6].

Газотранспортна система України є другою в Європі та однією з найбільших у світі. Останніми роками в роботі цієї системи України виникли серйозні проблеми, що пов'язані з понад 70 % виробленого встановленого ресурсу газоперекачувальних агрегатів та низьким ККД застарілих ГТД, який становить усього 18...25 % [7].

Наведене вище свідчить, що сучасні газотурбінні установки здатні розв'язати цілий ряд проблем у паливно-енергетичній та газотранспортній галузях країни. У цьому напрямку постає друге питання: вибір типу газотурбінної установки, яка одночасно змогла б задовольняти вимоги як паливно-енергетичного комплексу, так і газотранспортної галузі.

У даному випадку можна розглядати два типи установок: з так званими мокрими та сухими циклами. До перших можна віднести бінарні установки та установки з впорскуванням пари в камеру згоряння газотурбінного двигуна (типу STIG та контактні). Такі установки добре підходять для використання як когенераційні.

Більш перспективне використання установок із «сухими» циклами — регенеративних газотурбінних установок. Згідно з даними [10] у діапазоні робочих температур  $T_3 = 1200...1500$  К у циклах з регенерацією теплоти можливо досягти ККД до 43% (рис. 1).

При цьому експлуатаційні витрати в таких установках будуть нижчі, ніж, наприклад, у контактних, оскільки відсутні витрати на підготовку води. Для використання регенеративних установок як когенераційних варто скористатися позитивним досвідом [2]. На сьогодні кількість змонтованих за представленим у статті принципом станцій вже досягла 20.

Результати вітчизняного досвіду проектування газотурбінної установки регенеративного типу для приводу нагнітачів природного газу наведені у роботі [9].

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Регенератори газотурбінних установок мають достатньо значні масогабаритні показники, які можуть досягати 100 т [3]. Це викликає підвищення як їх аеродинамічного опору, так і вартості теплообмінних апаратів. Зниження цих показників здійснюється шляхом інтенсифікації процесів теплопередачі з боку меншого коефіцієнта тепловіддачі. В останній час для використання в регенераторах газотурбінних установок запропонована велика кількість теплообмінних поверхонь, які умовно можна поділити на декілька груп:

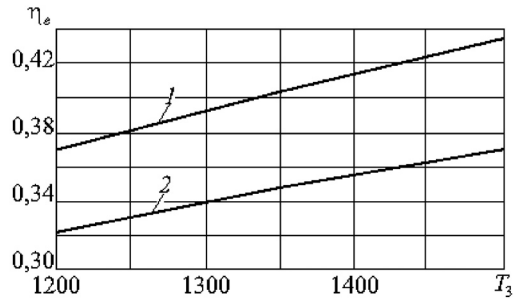


Рис. 1. Порівняльна ефективність циклів газотурбінних установок простої схеми та з регенерацією теплоти відпрацьованих газів:

1 — газотурбінні установки з регенерацією теплоти; 2 — газотурбінні двигуни простої схеми

поверхні з круглих труб з різними видами оребрення;

поверхні з гладких труб з інтенсифікаторами тепловіддачі у вигляді лунок, виступів або канавок;

поверхні з труб, що мають некруглий переріз.

Аналіз ефективності використання оребрених поверхонь наведений у [3]. Показано, що у зв'язку з особливостями проходження теплообміну між теплоносіями у газоподібному стані (відпрацьовані гази та повітря) і виготовлення оребрених поверхонь вони можуть поступатися за масою гладкотрубним.

Більш перспективними є поверхні з гладких труб з інтенсифікаторами тепловіддачі у вигляді лунок, виступів або канавок [11]. У цих поверхнях збільшення тепловіддачі перевищує зростання гідродинамічного опору, тому є можливість формування теплопередавальних поверхонь зі зниженим гідродинамічним опором. З іншого боку, наявність лунок або виступів на поверхні знижує її ресурс через роботу в області достатньо високих температур.

Альтернативним методом зниження масогабаритних показників є використання труб некруглого перерізу. В цьому напрямку перспективним можна вважати застосування еліптичних труб.

Згідно з роботою [4] ефективність тепловіддачі труб круглого і некруглого перерізів при обтіканні однорідним потоком при середньому значенні  $Re \approx 10000$  числа  $Nu$  дорівнюють для круглої труби 55,3, для еліптичної — 70,2.

### Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Аналіз літературних джерел про ефективність теплообміну в пучках еліптичних труб показав наступне: в основному досліджувався теплообмін або в одному ряді труб [12], або у достатньо розріджених пучках [1, 4] зі значеннями поперечного та поздовжнього кроків відповідно  $s_1/d_{\text{екв}} = 1,50 \dots 1,57$  та  $s_2/d_{\text{екв}} = 1,57 \dots 2,50$ . Це викликає необхідність додаткового дослідження особливостей гідродинаміки і теплообміну в пучках стиснених еліптичних труб, дані щодо яких відсутні.

Методом дослідження особливостей процесів гідродинаміки і теплообміну при обтіканні пучків еліптичних труб обрано математичне моделювання в програмному комплексі *ANSYS CFX*.

**МЕТОЮ РОБОТИ** є виявлення особливостей гідродинаміки і теплообміну в пучках еліптичних труб, в яких відносні кроки труб у пучку  $s_1/d_{\text{екв}} < 1,50$  та  $s_2/d_{\text{екв}} < 1,57$ , дані за якими відсутні.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для умов, що розглядаються, враховуючи високі швидкості теплоносіїв, використовуємо модель напружень Рейнольдса [8]. Ця модель вважається однією з найбільш досконалих моделей турбулентності, що використовуються у сучасних програмних продуктах.

Вигляд розрахункових сіток для моделей теплообмінних поверхонь подано на рис. 2. Перша сітка складається з близько 680000 елементів, друга — 720000.

Умови задачі, які ставилися при моделюванні:

пучки займають області однакових розмірів і об'ємів;

крізь пучок передається однакова величина теплового потоку.

Задачами досліджень передбачалося наступне:

розрахунок і аналіз поля температур при обтіканні пучків круглих та еліптичних труб для оцінки падіння температури при проходженні потоком пучків;

отримання відносних значень за кожним рядом труб та їх порівняльний аналіз між собою та з наявними даними;

оцінка ефективності використання профільованих поверхонь у регенераторах газотурбінних установок.

Візуалізація поля швидкостей і температур при обтіканні пучків круглих та еліптичних труб наведена на рис. 3, 4. Падіння тиску в пучку еліптичних труб однакове порівняно з пучком круглих, у той час як в середині пучка еліптичних труб швидкість руху газів вища на 20...25 %, що добре відображується на процесі теплообміну.

Для даних умов при швидкості набігаючого потоку 15 м/с та температурі 500 °С за даними [1] середній по області коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha = 166 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а згідно з результатами тестового моделювання  $\alpha_{\text{тест}} = 162 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Це підтверджує достовірність отриманих результатів.

Дослідження зміни коефіцієнта тепловіддачі по рядах труб наведено на рис. 5. Для порівняння наведені узагальнені дані з [4].

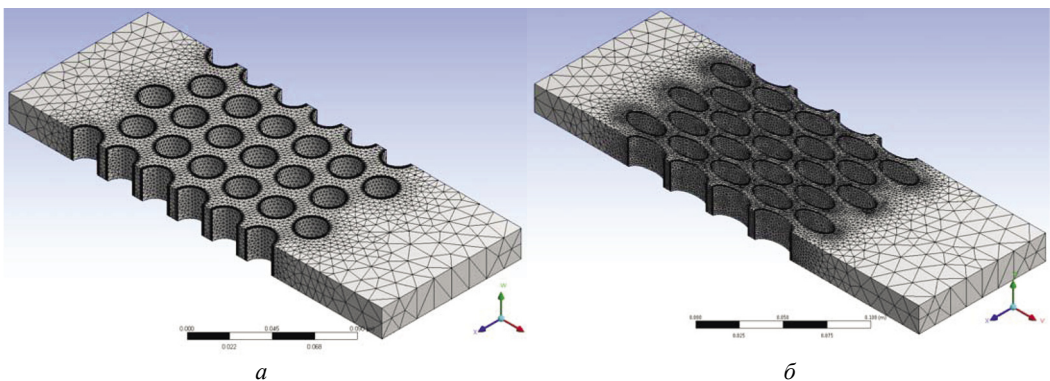
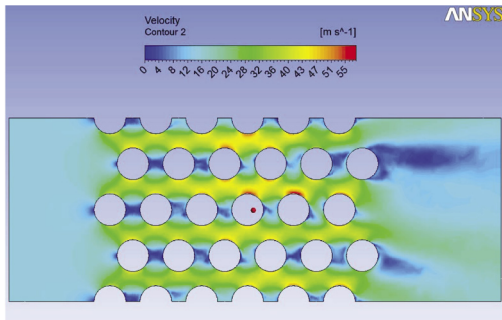
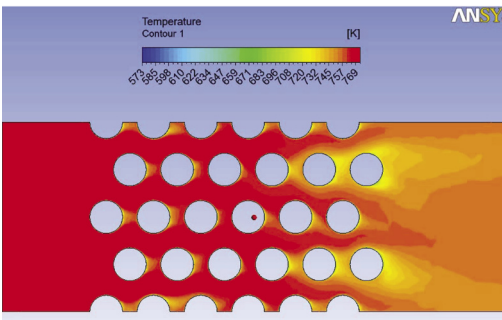


Рис. 2. Розрахункові сітки теплообмінних поверхонь круглого (а) та еліптичного (б) перерізів

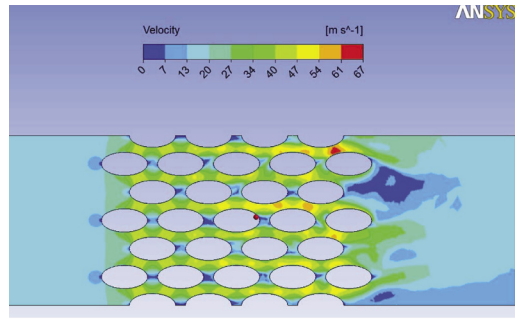


а

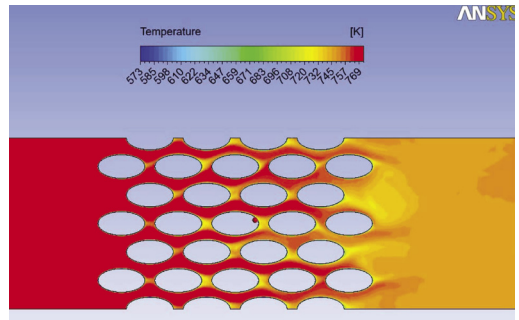


б

Рис. 3. Розподіл швидкостей (а) і температур (б) у пучку круглих труб



а



б

Рис. 4. Розподіл швидкостей (а) і температур (б) у пучку еліптичних труб

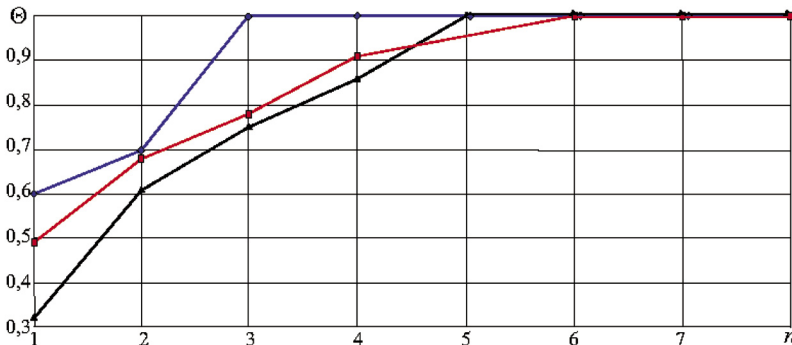


Рис. 5. Зміна відносного коефіцієнта тепловіддачі  $\theta = \alpha_n / \alpha_{cp}$  ( $\alpha_n$  — коефіцієнт тепловіддачі  $n$ -го ряду;  $\alpha_{cp}$  — середній коефіцієнт тепловіддачі по області) по рядах шахових пучків круглих та еліптичних труб:  $\blacklozenge$  — значення для пучка круглих труб [4];  $\blacksquare$  — значення для пучка круглих труб, отримані за результатами тестового моделювання;  $\blacktriangle$  — значення для пучка еліптичних труб

Літературні дані щодо розподілу коефіцієнта тепловіддачі по рядах труб достатньо неоднозначні. Якщо [4] приводить дані про його стабілізацію, починаючи з третього ряду, то у [5] стабілізація здійснюється з 5–6 ряду. Це залежить від ступеня початкової турбулентності. Тепловіддача перших рядів труб враховується відповідними коефіцієнтами коригування.

У моделюванні потік мав достатньо високий ступінь турбулентності, що обумовлено високими швидкостями і температурами. Це викликало різницю у значеннях для пучка круглих труб, отриманих з роботи [4] та розрахованих при тестовому моделюванні.

У даному випадку стабілізація настає раніше — вже на п'ятому ряді замість шостого. Отримані коригувальні коефіцієнти

дорівнюють для першого ряду 0,32; для другого — 0,61; третього — 0,75; четвертого — 0,86. Для п'ятого і наступних коефіцієнт тепловіддачі стабілізувався і дорівнював середньому по об'єму.

Якщо за ефективність теплообміну взяти відношення чисел Нуссельта для розглядуваної поверхні до гладкої поверхні  $Nu/Nu_{гп}$ , то для даних умов цей показник дорівнюватиме 1,01. Підвищення цього показника можливо за рахунок додаткової комбінації різних способів інтенсифікації [5].

У випадку  $Nu/Nu_{гп} = 1,01...1,50$  [11] оцінка підвищення ступеня регенерації теплоти в регенераторах регенеративних газотурбінних установок при використанні профільованих поверхонь за умови рівності теплових потоків, що передаються, наведена на рис. 6. Отримане поле значень обумовлене зміною режимних параметрів течії теплоносіїв.

Здійснимо оцінку масогабаритних показників. Компонування поверхонь з круглих та еліптичних труб наведено на рис. 7.

Порівняння поверхонь можна здійснити за допомогою коефіцієнта компактності

$$K = \frac{Fl}{V},$$

де  $F$  — площа поверхні теплообміну,  $m^2$ ;  $l$  — довжина труб,  $m$ ;  $V$  — об'єм області течії.

Тоді, використовуючи розміри областей течії, наведені на рис. 7, коефіцієнти компактності будуть дорівнювати:

$$\text{для пучка круглих труб } K_{кр} = 0,162;$$

$$\text{для пучка еліптичних труб } K_{ел} = 0,219.$$

Це свідчить про більшу ефективність формування теплопередавальних поверхонь з еліптичних труб. Попередні оцінки показали, що за умови рівності теплових потоків у пучках круглих та еліптичних труб позитивний ефект від використання останніх складає: за габаритами 26%, за масою 22%. Ці дані свідчать про ефективність застосування еліптичних труб для формування теплообмінних поверхонь.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз стану потужностей на підприємствах паливно-енергетичного комплексу та у газотранспортній галузі показав, що

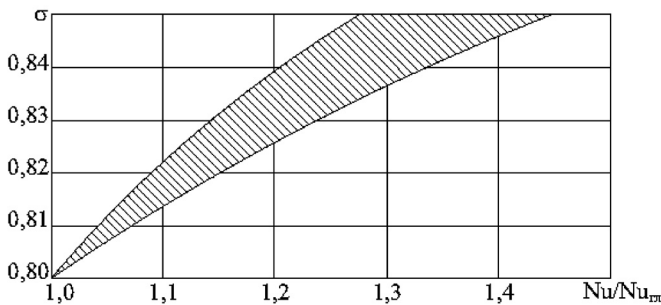


Рис. 6. Оцінка підвищення ступеня регенерації теплоти

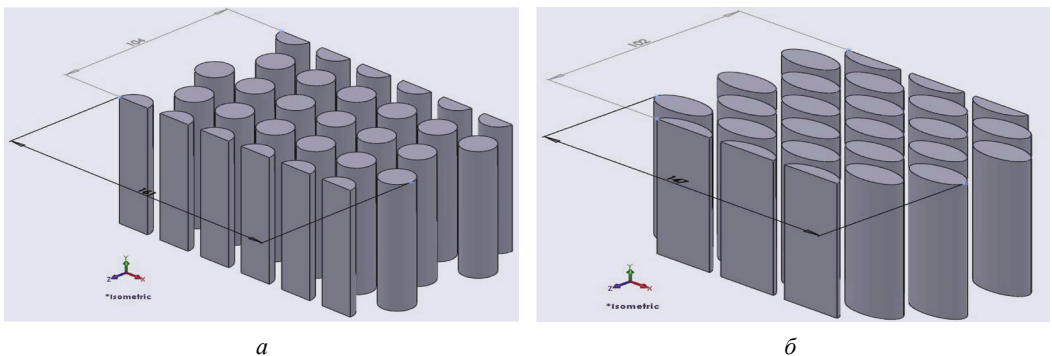


Рис. 7. Компонування теплообмінних поверхонь з труб круглого (а) та еліптичного (б) (останній ряд труб не показаний) перерізів

використанням газотурбінних установок з регенерацією теплоти можливо підвищити ефективність і надійність базових галузей промисловості України. 2. Розроблений комплекс моделей у системі моделювання руху рідини та газів ANSYS CFX дозволить досліджувати особливості теплообмінних процесів у залежності від режимних пара-

метрів течії середовищ, їх взаємного розташування та інших вихідних даних.

3. Отримані в результаті досліджень дані будуть використані для оцінки та оптимізації масогабаритних показників регенераторів газотурбінних установок, утилізаційних котлів та теплообмінних апаратів загального призначення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Антуфьев, В. М.* Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева [Текст] / В. М. Антуфьев. — М. ; Л. : Энергия, 1966. — 184 с.
- [2] *Ануров, Ю. М.* Разработка и эксплуатация серийных энергетических ГТУ на магнитных подшипниках [Текст] / Ю. М. Ануров, Е. В. Литвинов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 4/4(40). — С. 20–24.
- [3] *Кузнецов, В. В.* Оптимизация массогабаритных показателей регенераторов ГТУ [Текст] / В. В. Кузнецов, Д. Н. Соломонюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 4/6 (40). — С. 48–52.
- [4] *Кутателадзе, С. С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление [Текст] : справочное пособие / С. С. Кутателадзе. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 367 с.
- [5] Пат. України на корисну модель. Теплообмінна поверхня / В. В. Кузнецов, А. В. Якимович, С. А. Кузнецова. — № 37930 ; заявл. 29.07.2008 ; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 23.
- [6] *Патон, Б.* Помогут ли газовые турбины преодолеть проблемы энергосистемы Украины? [Текст] / Б. Патон, А. Халатов // Зеркало недели. — 2008. — № 47 (726).
- [7] *Патон, Б.* Які промислові газотурбінні двигуни потрібні українській ГТС? [Текст] / Б. Патон, А. Халатов // Дзеркало тижня. — 2008. — № 26 (705).
- [8] Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды [Текст] : практ. руководство ; под ред. проф. А. К. Любимова. — Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского гос. ун-та, 2006. — 227 с.
- [9] *Романов, В. В.* Особенности создания газотурбинной установки регенеративного цикла для ГПА [Текст] / В. В. Романов [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 4/4(40). — С. 16–19.
- [10] *Романовський, Г. Ф.* Теоретичні основи проектування суднових газотурбінних агрегатів [Текст] / Г. Ф. Романовський, М. В. Ващиленко, С. І. Сербін. — Миколаїв : УДМТУ, 2003. — 304 с.
- [11] *Халатов, А. А.* Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков [Текст] / А. А. Халатов, И. И. Борисов, С. В. Шевцов // ИТТФ НАНУ. — К., 2005. — 500 с.
- [12] *Ala, H.* Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air / Heat and Mass Transfer, accepted for publication [Text] / Hasan Ala. — P. 1–32.