

24. Хайруллин, Р. Р. Перспективная система пуска дизеля. [Текст] / Р. Р. Хайруллин, А. В. Шевяков // Локомотив. – 2010. – № 12. – С. 19 – 21.

**Наведені результати експериментального дослідження аеродинамічного опору шахових пучків гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею. Проведений порівняльний аналіз аеродинамічних характеристик пучків з труб гвинтоподібного та круглого профілю. Виявлений ефект зниження аеродинамічного опору в пучках гвинтоподібних труб з мінімальними поперечними та діагональними живими перерізами**

**Ключові слова:** труба, пучок, рівнорозвинена поверхня, аеродинаміка, опір, порівняння

**Приведены результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления шахматных пучков винтообразных труб с равноразвитой поверхностью. Представлен сравнительный анализ аэродинамического сопротивления пучков труб винтообразного и круглого профиля. Обнаружен эффект снижения аэродинамического сопротивления в пучках винтообразных труб с минимальными поперечными и диагональными живыми сечениями**

**Ключевые слова:** труба, пучок, равноразвитая поверхность, аэродинамика, сопротивление, сравнение

УДК 536.24:533.6.011

# АЕРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР ШАХОВИХ ПУЧКІВ ГВИНТОПОДІБНИХ ТРУБ

**Є. М. Письменний**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри\*

E-mail: evgnik@i.com.ua

**С. А. Рева\***

E-mail: terem57@meta.ua

**А. М. Терех**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник\*

E-mail: terem57@meta.ua

\*Кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна 03056

## 1. Вступ

Гвинтоподібні труби призначені для використання в якості базових елементів теплообмінних поверхонь повітряпідігрівників – регенераторів газотурбінних установок, безконтактних нагрівників газу, котельних повітряпідігрівників і т.д.

На сьогоднішній день існуючі теплообмінні поверхні повітряпідігрівників – регенераторів, виготовлені, як правило, з звичайних круглих труб, які практично вичерпали свої можливості з точки зору збільшення їх тепло-аеродинамічної ефективності. Крім цього вони мають значну вагу та габаритні розміри.

Тому для вирішення вище зазначеної проблеми, для теплообмінників типу "газ-газ", в НТУУ "КПІ" розроблені та досліджені нові теплообмінні поверхні у вигляді пучків гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею з різними геометричними характеристиками пучків труб [1, 2].

## 2. Експериментальна установка і методика проведення експериментів з визначення аеродинамічного опору пучків труб

В експериментах застосовувалися макети труб двох типорозмірів, геометричні характеристики яких наведені на рис. 1 і табл. 1.

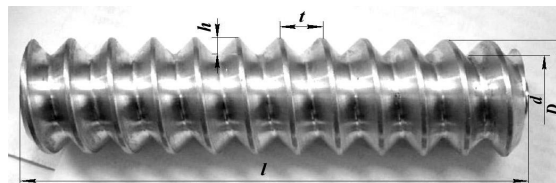


Рис. 1. Геометричні розміри гвинтоподібної труби

Таблиця 1

Геометричні характеристики моделей труб

Тип труб	l, мм	D, мм	d, мм	t, мм	h, мм	$\psi$	$H_{1mm}$
1	140	38	28	12	5	1,163	0,1388
2	140	38	31	8	3,5	1,241	0,1481

Дослідження аеродинамічного опору в пучках із гвинтоподібних труб при поперечному їх обтіканні повітряним потоком здійснювалися на експериментальній установці, що представляє собою аеродинамічну трубу (рис. 2), розміри каналу якої складала: висота – 140 мм, ширина 210 мм, довжина прямого каналу – 3000 мм. Проточна пряма частина каналу складалася з робочої і двох заспокоїливих ділянок, призначених для вирівнювання полів швидкості і статичного тиску, та оснащавалася соплом діаметром 75 мм, спрофільованого за кривою

лемніскати. Робоча ділянка мала довжину 750 мм. На установці досліджувалися пучки, що мали 6 поперечних рядів труб, в кожному з яких було від 3 до 5 трубок в залежності від поперечного кроку між трубами.

В стінці прямого каналу на відстані 1,0 м від заднього під'єднувального фланця, а перед пучком на відстані 0,1 м від переднього фланця робочої ділянки були впаєні штуцери діаметром 1,5 мм для відбору статичного тиску до яких підключався мікроманометр типу ММН-2400(5)-1,0.

Гвинтоподібні труби склалися в шахові пучки геометрія яких обиралася таким чином, щоб мати можливість дослідити вплив на аеродинамічний опір кожного з кроків труб при фіксованому іншому та охопити максимально широкий діапазон цих параметрів (табл. 2). Досліджено три серії пучків, кожна з яких мала фіксований поперечний крок  $S_1$  і змінний поздовжній  $S_2$ , причому, його значення у кожній серії повторювались.

Аеродинамічний опір досліджених пучків вивчався в умовах ізотермічної течії при температурі повітря  $t_{xm} = (15-20) \text{ }^\circ\text{C}$ . Втрати тиску  $\Delta P$  визначалися за різницею статичних тисків до і після пучка з урахуванням втрат на тертя в робочій частині аеродинамічної труби.

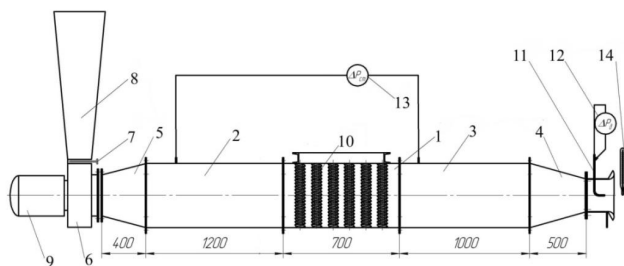


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – робоча ділянка; 2, 3 – заспокоїлива ділянка; 4 – дифузор; 5 – конфузор; 6 – вентилятор; 7 – шибер; 8 – раструб; 9 – електродвигун; 10 – гвинтоподібна труба; 11 – трубка Піто-Прандтля; 12, 13 – мікроманометр; 14 – ртутний термометр

Отримані значення величин  $n$ ,  $C_r$  в формулі подібності (1)

Номер пучка	$\sigma_1 = \frac{S_1}{D}$	$\sigma_2 = \frac{S_2}{D}$	$\frac{S_1}{S_2}$	Тип 1			Тип 2		
				H/F	n	$C_r$	H/F	n	$C_r$
1	1,105	0,96	1,151	15,4	0,1834	1,2930	19,8	0,1887	1,3762
2	1,105	1,184	0,933	15,4	0,1850	1,4334	19,8	0,1881	1,5795
3	1,105	1,46	0,757	15,4	0,1817	1,4355	19,8	0,1823	1,5541
4	1,105	1,842	0,6	15,4	0,1546	1,1598	19,8	0,1600	1,3160
5	1,105	2,368	0,467	15,4	0,1431	1,0410	19,8	0,1486	1,190
6	1,381	0,96	1,438	7,12	0,1645	0,9758	8,23	0,1769	1,035
7	1,381	1,184	1,167	7,12	0,1702	1,060	8,23	0,1783	1,1232
8	1,381	1,46	0,946	7,12	0,1701	1,1086	8,23	0,1802	1,2404
9	1,381	1,842	0,75	7,12	0,1610	1,0675	8,23	0,1692	1,165
10	1,381	2,368	0,583	7,12	0,1477	0,9442	8,23	0,1510	0,9783
11	1,381	1,645	0,84	7,12	0,1670	1,130	8,23	0,1779	1,2700
12	1,842	0,96	1,918	3,75	0,1439	0,8627	4,17	0,1538	0,8013
13	1,842	1,184	1,556	3,75	0,1530	0,8064	4,17	0,1590	0,7990
14	1,842	1,46	1,261	3,75	0,1695	0,9249	4,17	0,1707	0,9278
15	1,842	1,842	1,0	3,75	0,1699	0,9170	4,17	0,1716	0,9663
16	1,842	2,368	0,778	3,75	0,1603	0,8802	4,17	0,1652	0,9080

### 3. Результати дослідження та їх аналіз

Аеродинамічний опір шахових пучків із однозахідних гвинтоподібних труб досліджувався в діапазоні чисел Рейнольдса  $Re_D = 5000-70000$ . Отримані експериментальні дані, що частково подані на рис. 3 – 5, свідчать про доцільність узагальнення отриманих результатів ступеневими залежностями виду:

$$Eu_0 = C_r \cdot Re_D^{-n} \tag{1}$$

Числа Ейлера розраховувались за формулою:

$$Eu_0 = \frac{\Delta P}{\rho \cdot W^2 \cdot Z_2} \tag{2}$$

де  $\Delta P$  – перепад статичного тиску на робочій ділянці, Па;  $\rho$  – густина прийнята за середньою температурою в досліджуваному шаховому пучку,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W$  – швидкість потоку в живому перетині пучка, м/с;  $Z_2$  – число поперечних рядів в пучку.

Числа Рейнольдса розраховувались за формулою:

$$Re_D = \frac{W \cdot D}{\nu} \tag{3}$$

де  $D$  – зовнішній діаметр гвинтоподібної труби, що обмежувався вершинами виступів труби, м;  $\nu$  – кінематична в'язкість потоку прийнята за середньою температурою в досліджуваному шаховому пучку,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

В табл. 2 представлені значення показника степеня  $n$  і коефіцієнта  $C_r$  у залежності (1) для 32 досліджених пучків з труб двох типорозмірів.

На рис. 3 – 5 крім дослідних даних нанесені розраховані за [3] залежності для пучків гладких круглих труб. При аналізі та зіставленні даних враховувалось, що гвинтоподібні труби виготовляються шляхом деформування гладких труб з зовнішнім діаметром  $D$ , та розглядаються як альтернатива таким трубам. Тому в подальшому аеродинамічні характеристики пучків гвинтоподібних труб з діаметром за вершинами виступів  $D$  порівнюються з аеродинамічними характеристиками пучків гладких труб такого ж зовнішнього діаметру  $D$ . Ці ж міркування лежать в основі вибору характерного розміру в числах Рейнольдса.

Аналіз таких даних показує, що нахил залежностей  $Eu_0 = f(Re_D)$ , що характеризується показником степеню  $n$ , для пучків гвинтоподібних труб менший, ніж для пучків гладких труб: для всіх дослідних компоновок гвинтоподібних труб значення  $n$  дорівнює 0,27. Це свідчить про більш високий рівень турбулізації потоку в пучках гвинтоподібних труб.

Слід відмітити, що у ряді важливих для практики компоновок аеродинамічний опір пучків гвинтоподібних труб помітно менший, ніж опір пучків гладких труб. Така ситуація спостерігається у випадках, коли пучки мають мінімальний поперечний або

діагональний  $\sigma_2$  (4) відносні кроки, інакше кажучи максимально стиснений характерний живий переріз (рис. 3, 5).

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D}, \quad (4)$$

де  $S_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot S_1 + S_2}$  – діагональний крок шахового пучка, м;

$D$  – зовнішній діаметр труби, м.

При зменшенні степені стисненості пучків ситуація діаметрально змінюється: аеродинамічний опір пучків гвинтоподібних труб стає більшим, ніж опір відповідних за геометрією пучків гладких труб (рис. 4).

Відмічені особливості можна пояснити тим, що на аеродинамічний опір пучків гвинтоподібних труб впливають два основних фактори, що обумовлені особливостями геометрії їх поверхні, та діють у протилежних напрямках.

Перший фактор – зменшена площа міделевого перетину (рис. 6, 7) в порівнянні з площею міделевого перетину відповідних гладких труб діаметром  $D$ . Це забезпечує більший живий перетин для проходження теплоносія в пучках при  $\sigma_1 = \text{idem}$  та  $\sigma_2 = \text{idem}$ , зменшує кривизну лінії току, а значить і коефіцієнт опору пучка (рис. 4). Тому аеродинамічний опір пучків гвинтоподібних труб з максимально стисненим живим перетином менший, ніж опір відповідних за геометричними характеристиками пучків гладких труб при однакових значеннях швидкості потоку.

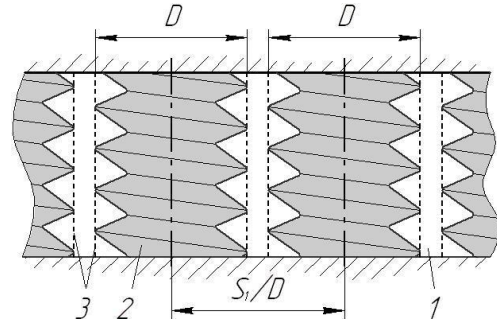


Рис. 6. Схематичне зображення міделевого перетину пучків гвинтоподібних та гладких труб: 1 – живий перетин; 2 – гвинтоподібна труба; 3 – контур гладкої труби

Наведені тлумачення підтверджуються також тим, що для гвинтоподібних труб типу 2 з більшою ніж у труб типу 1 площею міделевого перетину при однакових мінімальних значеннях  $\sigma_1$  ефект зниження аеродинамічного опору виражений значно менше (рис. 3), а у випадку мінімального діагонального перетину  $\sigma_2$  не спостерігається взагалі (рис. 5).

Важливо також відмітити наступне.

Фактор зменшеної площі міделевого перетину гвинтоподібних труб дозволяє реалізувати гранично щільні компоновки пучків ( $\rightarrow 1$ ,  $\sigma_2 \rightarrow 1$ ), що не можливо в разі використання відповідних за діаметром ( $D$ ) гладких труб, які в цьому випадку створюють не прохідний бар'єр для потоку теплоносія ( $Eu_0 \rightarrow \infty$ ) (рис. 8).

Аналіз експериментальних даних також показує, що зі зменшенням стисненості пучка, а саме зі збільшенням значень відносних кроків  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  вплив першого фактору зменшується і починає

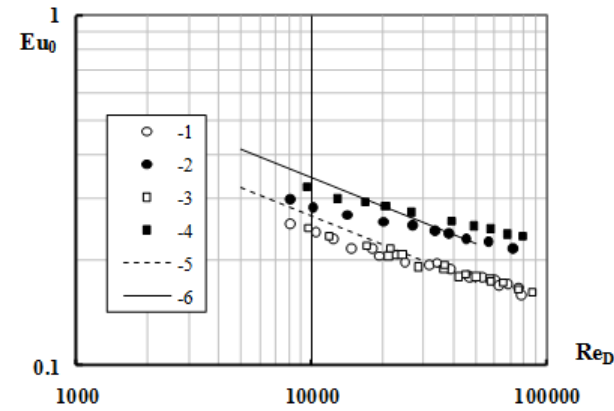


Рис. 3. Залежність  $Eu_0=f(Re_D)$  для пучків труб з  $\sigma_1=1,105$ : 1, 3, 5 –  $\sigma_2=0,96$ , труби тип 1, тип 2, та гладкі труби відповідно; 2, 4, 6 –  $\sigma_2=2,368$ , труби тип 1, тип 2, та гладкі труби відповідно

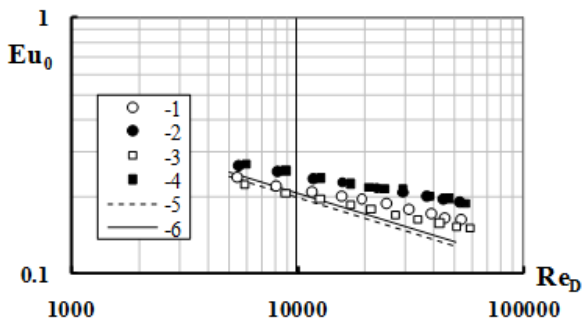


Рис. 4. Залежність  $Eu_0=f(Re_D)$  пучків труб з  $\sigma_1=1,381$ : 1,3,5 –  $\sigma_2=0,96$ , труби тип 1, тип 2, та гладкі труби відповідно; 2,4,6 –  $\sigma_2=2,368$ , труби тип 1, тип 2, та гладкі труби відповідно

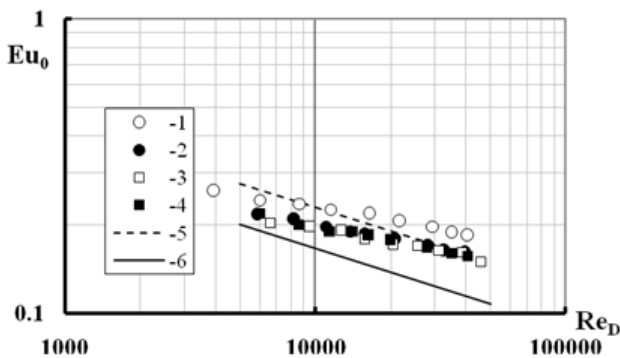


Рис. 5. Залежність  $Eu_0=f(Re_D)$  пучків труб з  $\sigma_1=1,842$ : 1, 3, 5 –  $\sigma_2=0,96$ , труби тип 1, тип 2, та гладкі труби відповідно; 2, 4, 6 –  $\sigma_2=2,368$ , труби тип 1, тип 2, та гладкі труби відповідно

Відносний діагональний крок  $\sigma_2$  розраховується за формулою:

переважати другий фактор – фактор додаткової турбулізації потоку за рахунок складного рельєфу поверхні гвинтоподібних труб. Поперечне обтікання гвинтоподібних труб призводить до додаткової генерації турбулентності в порівнянні з випадком обтікання гладких труб, що в умовах послаблення дії першого фактору у кінцевому результаті має прояв у підвищеному їх аеродинамічному опорі.

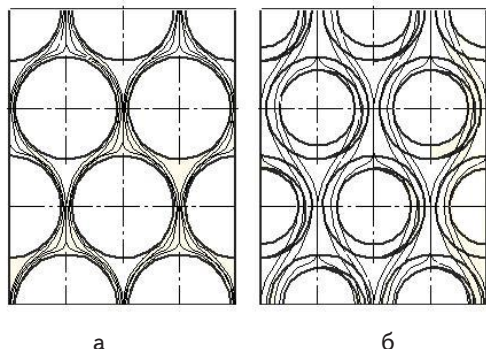


Рис. 7. Схема потоку в так званому «звуженому» шаховому пучку: а – гладкі труби; б – гвинтоподібні труби

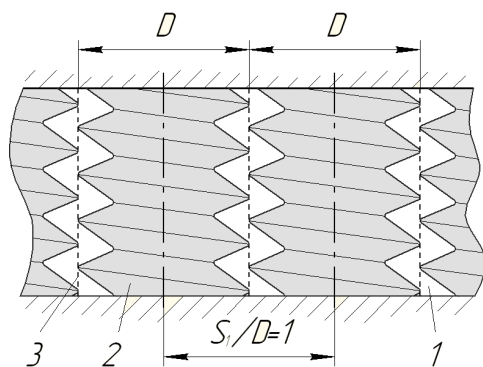


Рис. 8. Схема пучка з гвинтоподібними трубами та гладкими при  $S_1/D=1$ : 1 – живий перетин; 2 – гвинтоподібна труба; 3 – контур гладкої труби

Не прямим підтвердженням більш високої збудженості потоку в пучках гвинтоподібних труб є відносно низькі значення показників ступеню  $n$  в залежностях виду (1). Для таких пучків (табл. 2) – стан потоку в них близький до течії з повністю розвиненою турбулентністю, що характеризується значенням  $n=0$ .

Наведене вище пояснює, чому пучки гвинтоподібних труб з відносно великими значеннями  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  мають більший аеродинамічний опір, ніж відповідні пучки гладких труб (рис. 4).

Ефект зниження аеродинамічного опорі пучків з практично важливими компоновками при заміні гладких труб на відповідні за розмірами гвинтоподібні стає більш помітним в ситуаціях, коли фіксованими є розміри газоходу, в якому встановлюється поверхня нагріву, та витрата продуктів згорання в ньому. В таких випадках порівняння аеродинамічних характеристик виконується при однаковій швидкості теплоносія на вході в пучок (рис. 9).

На рис. 9 представлені значення чисел  $Eu_0$  для пучків гвинтоподібних труб віднесені до значень чисел  $Eu_{гп}$  для одного поперечного ряду відповідних за кроковими характеристиками пучків гладких труб від чисел  $Re_n$ , що розраховані за формулою:

$$Re_n = \frac{W_n \cdot D}{\nu}, \tag{4}$$

де  $D$  – зовнішній діаметр гладкої труби та зовнішній діаметр гвинтоподібної труби, що обмежувався вершинами виступів труби, м;  $\nu$  – кінематична в'язкість потоку прийнята за середньою температурою в досліджуваному шаховому пучку,  $m^2/c^2$ ;  $W_n$  – швидкість теплоносія на вході в пучок, м/с.

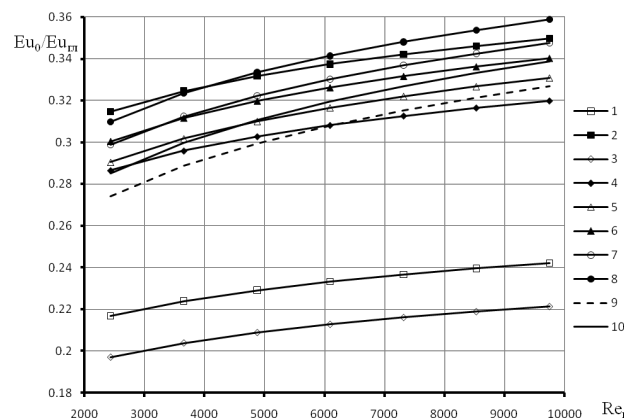


Рис. 9. Залежність  $Eu_0/Eu_{гп}=f(Re_n)$  пучків труб з: 1, 2 –  $\sigma_2=0,96$ , труби тип 1 і типу 2 відповідно; 3, 4 –  $\sigma_2=1,184$ , труби тип 1, і типу 2 відповідно; 5, 6 –  $\sigma_2=1,46$ , труби тип 1 і типу 2 відповідно; 7, 8 –  $\sigma_2=1,842$ , труби тип 1 і типу 2 відповідно; 9, 10 –  $\sigma_2=2,368$ , труби тип 1 і типу 2 відповідно

Для розробки методики розрахунку аеродинамічного опорі пучків гвинтоподібних труб необхідно визначити ряд безрозмірних геометричних параметрів, що входять до структури відповідних узагальнених рівнянь. Зважаючи на деяку схожість характеристик зовнішньої поверхні гвинтоподібних труб та труб з поперечним гвинтовим орєбренням, був виконаний аналіз можливості застосування таких безрозмірних геометричних параметрів, як відношення поперечного та повздовжнього кроків  $\sigma_1/\sigma_2$  та приведеної довжини розвинутої поверхні  $H/F$ , що визначається, як відношення площі теплообмінної поверхні одного поперечного ряду пучка до площі мінімального живого перетину цього ряду [10].

На рис. 10 чітко простежується залежність чисел Ейлера від узагальнених геометричних характеристик пучків  $S_1/S_2$  та  $H/F$ . Залежності  $Eu=f(S_1/S_2)$  мають не лінійний характер, а величина  $H/F$  виступає на рисунку, як параметр розшарування цих залежностей. Зважаючи на зазначене вище можна припустити, що структура узагальнюючих рівнянь повинна мати наступний вигляд:

$$n = f(S_1/S_2; H/F); \tag{5}$$

$$C_r = f(S_1/S_2; H/F). \tag{6}$$

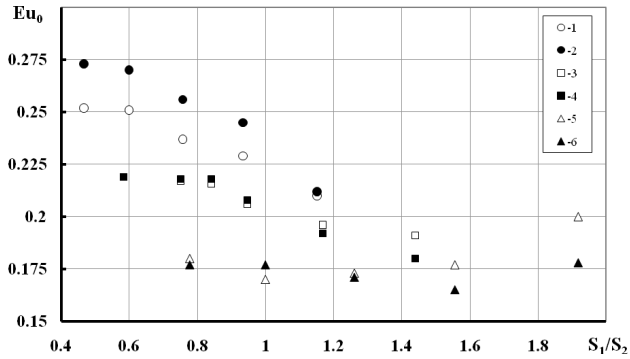


Рис. 10. Залежність чисел Ейлера від параметра розміщення  $S_1/S_2$  при  $Re_D=20 \cdot 10^4$ : 1 – пучки з  $H/F=15,4$  тип 1; 2 – пучки з  $H/F=19,8$  тип 2; 3 – пучки з  $H/F=7,12$  тип 1; 4 – пучки з  $H/F=8,23$  тип 2; 5 – пучки з  $H/F=3,75$  тип 1; 6 – пучки з  $H/F=4,17$  тип 2

#### 4. Висновки

1. Пучки гвинтоподібних труб з актуальними компоновками мають менший аеродинамічний опір ніж відповідні за характеристиками пучки гладких труб.
2. Гвинтоподібні труби дозволяють реалізовувати надкомпактні ( $S_1/D \gg 1$ ) пучки, що практично не можливо при застосуванні відповідних за діаметром гладких труб.
3. Узагальнені рівняння для розрахунку аеродинамічного опору гвинтоподібних труб слід будувати на основі використання двох безрозмірних параметрів: приведена довжина розвиненої поверхні  $H/F$  та відношення кроків  $S_1/S_2$ .

#### Література

1. Pis'mennyi, E. N. Ways for Improving the Tubular Heaters Used in Gas Turbine Units [Текст] / E. N. Pis'mennyi // Thermal Engineering. – 2012. – V.59. – №6. – pp. 485-490.
2. Патент на корисну модель №67783 Україна, МПК F28F1/08. Теплообмінна труба [Текст] / Є. М. Письменний, О. М. Терех, О. І Руденко, О. П. Ніщик, О. В. Баранюк; заявник та володар патенту на корисну модель НТУУ "КПІ" – u2011108293; заявл. 01.07.2011; опубл. 12.03.2012. Бюл. №5.
3. Аэродинамический расчет котельных установок: нормативный метод [Текст] / под ред. С. И. Мочана. – 3-е изд. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с.
4. Письменный, Е. Н. Конвективный теплообмен поперечно-омываемых шахматных пакетов плоско-овальных труб [Текст] / Е. Н. Письменный, В. А. Кондратюк, Ю. В. Жұкова, А. М. Терех // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №2/8 (50). – С. 4-8.
5. Письменный, Е. Н. Расчет конвективных поперечно-оребрённых поверхностей нагрева [Текст] / Е. Н. Письменный – Киев: Альтерпрес, 2003. – 184 с.
6. Письменный, Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб [Текст] / Е. Н. Письменный. – Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.
7. Стасюлявичюс, Ю. К. Теплоотдача поперечно-обтекаемых пучков ребристых труб [Текст] / Ю. К. Стасюлявичюс, А. Ю. Скринска – Вильнюс:Минтис, 1974. – 243 с.
8. Zhukauskas, A. Heat Transfer of a Cylinder in Cross Flow [Текст] / A. Zhukauskas. – Hemisphere Publishing Corporation, 1985.
9. Юдин, В.Ф. Теплообмен поперечно оребрённых труб [Текст] / В. Ф. Юдин. – Л.: Машиностроение, 1982. – 189 с.
10. Kays, W. M. Compact Heat Exchangers. Second edition [Текст] / W. M. Kays, A. L. London. – Mc Graw – Hill Book Company, New York, 1967. – 224 p.