

# ТЕРМОГАЗОДИНАМІКА ЗАКРУЧЕНОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯ В РАДІАЛЬНО-ОБЕРТАЮЧОМУ КРУГЛОМУ КАНАЛІ

М. А. Мулярчук<sup>1,а</sup>, С. Г. Кобзар<sup>2</sup>, С. М. Пономаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України

## Анотація

В межах зміни параметрів  $Ro = 0, 1; 0, 2; 0, 3$  та  $Re = 20000$  виконано дослідження впливу масових сил інерції (відцентрових і Кориолісових сил) на профілі швидкостей і температури в круглій трубці, що радіально обертається, з похило-тангенційним завихренням потоку на вході та  $90^\circ$  поворотом на виході. Отримано, що обертання у напрямку завихрення потоку покращує гідродинаміку та теплообмін в каналі.

*Ключові слова:* гідродинаміка, закручений потік, тепловіддача, похило-тангенційне завихрення, моделі турбулентності, відцентрові сили, сили Кориоліса.

## Вступ

Завихрений потік широко використовується в різноманітних технічних пристроях для інтенсифікації теплообміну та вдосконалення різноманітних теплофізичних процесів. Переважна більшість опублікованих досліджень виконані для умов класичного тангенційного завихрення потоку, коли потік на вході в трубу подається під кутом  $90^\circ$  до її поздовжньої осі [1]. В останні роки в зв'язку із розробкою та дослідженням внутрішнього циклонного охолодження лопаток газових турбін великий інтерес отримало похило-тангенційне завихрення, коли потік подається тангенційно та під деяким кутом, який менший  $90^\circ$ , до вісі каналу в напрямку руху потоку. Великий цикл експериментальних досліджень теплообміну та гідродинаміки в цьому напрямку представлено в роботі [2]. Однак ці результати відносяться тільки до стаціонарних умов.

В роботі [3] за допомогою пакету прикладних програм ANSYS CFX виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки і теплообміну в круглій трубці з похило-тангенційним завихренням потоку на вході та  $90^\circ$  поворотом на виході, що відповідає умовам системи внутрішнього циклонного охолодження робочої лопатки газової турбіни. Виконана верифікація двох груп моделей турбулентності, визначені основні параметри розрахункової сітки, які забезпечують достатню точність розрахунків. При використанні закрученого потоку в системі охолодження робочих лопаток газових турбін великий інтерес представляє вплив частоти і напрямку обертання каналу на гідродинаміку і теплообмін по довжині охолоджуючого каналу. Результати експериментальних робіт по даному питанню в зв'язку зі складністю дослідження у відкритому доступі обмежені. Поки єдиною роботою, в якій досліджено вплив обертання

на теплообмін в круглій трубці з тангенційним ( $90^\circ$ ) завихренням потоку, залишається робота [4].

При охолодженні робочих лопаток газових турбін найбільшу інтенсифікацію по теплообміну необхідно забезпечити в передній критичній точці А (рис. 1). Тому дослідження профілів швидкостей і температур проводились у відповідному перерізі.

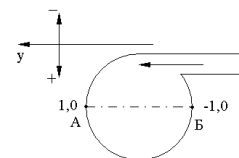


Рис. 1

Метою даної роботи є дослідження за допомогою пакету прикладних програм ANSYS CFX впливу масових сил інерції (відцентрових і Кориолісових сил) на профілі швидкостей і температури у круглій трубці, що радіально обертається, з похило-тангенційним завихренням потоку на вході та  $90^\circ$  поворотом на виході.

## 1. Об'єкт дослідження і комп'ютерна модель

В якості об'єкту дослідження використовувався круглий канал, який досліджувався експериментально в роботах [2, 3]. Об'єкт дослідження та його комп'ютерна модель, побудована в ANSYS Design Manager, наведені на рис. 2, 3.

Для виконання розрахунків при обертанні каналу об'єкт дослідження розташовувався на радіусі обертання  $R = 1000$  мм. Частота обертання  $\omega$  дорівнювала 10, 20, 30 рад/с, що відповідає значенням параметру обертання  $Ro = 0, 1; 0, 2; 0, 3$ ;  $Ro = (\omega d)/w$ , де  $w$  – осьова швидкість потоку. Досліджувалось як правостороннє, так і лівостороннє обертання каналу. При цьому правостороннє обертання має той самий напрямок в точці А (рис. 1), що й завихрення потоку в каналі. При комп'ютерному моделюванні правосто-

<sup>а</sup>mariyamul997@gmail.com

ронне обертання задавалося додатньою частотою, а лівостороннє – від'ємною.

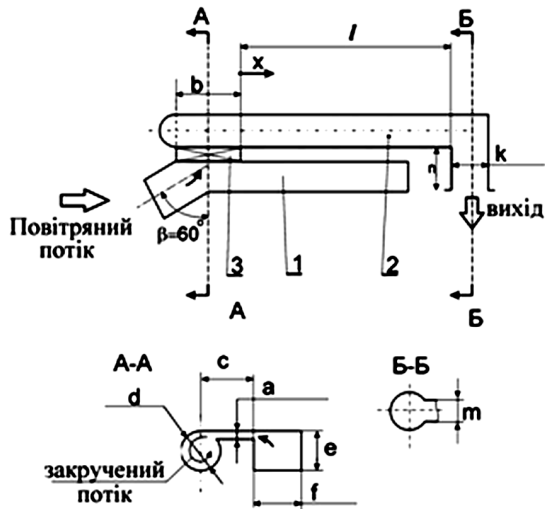


Рис. 2. Геометрична модель об'єкта дослідження [1]: 1 – розподільчий канал; 2 – тангенціальний завихрювач; 3 – основний циліндричний канал. Основні розміри:  $a = 5$  мм;  $b = 59$  мм;  $c = 30$  мм;  $d = 20$  мм;  $e = 20$  мм;  $f = 25$  мм;  $k = 40$  мм;  $l = 231$  мм;  $m = 15$  мм;  $n = 40$  мм

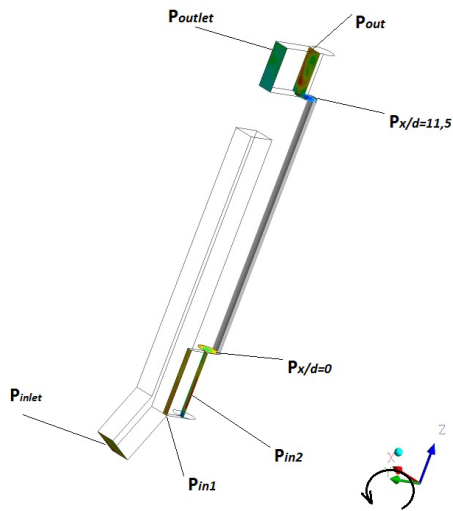


Рис. 3. Комп'ютерна модель

Розрахункова сітка побудована згідно з рекомендаціями роботи [3]. В якості моделі турбулентності використовувалась  $LRR$  модель напружень Рейнольдса, яка показала найкращі результати по більшості параметрів при проведенні верифікації [3].

Фізична модель була взята аналогічно роботі [3]. Дослідження проводилися при наступних граничних умовах: масова витрата повітря  $G = 6,448$  г/с, що відповідає  $Re = 20000$ ,  $Re = (wd)/\nu$ , де  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря;  $w$  – середньо-

витратна осьова швидкість в каналі; температура повітря на вході в об'єкт дослідження  $T_{in} = 97^\circ\text{C}$ ; температура стінки завихрювача  $T_{wz} = 30^\circ\text{C}$ ; температура стінки циліндричного каналу  $T_w = 20^\circ\text{C}$ .

## 2. Результати досліджень

При обертанні круглого каналу проявляються масові сили інерції: відцентрові та Кориолісові. Вони діють на завихрений потік, трансформуючи профілі швидкостей і температури. При правосторонньому обертанні сила Кориоліса сприяє завихренню потоку (в точці А сумарний імпульс потоку буде складатися із власного імпульсу потоку й імпульсу, що надається силою Кориоліса (рис. 1). При лівосторонньому обертанні каналу сила Кориоліса протидіє завихренню потоку, тому що в точці А вона направлена проти завихрення потоку.

Залежності прискорень відцентрових і Кориолісових сил від довжини каналу для  $\omega = 20$  рад/с представлені на рис. 4.

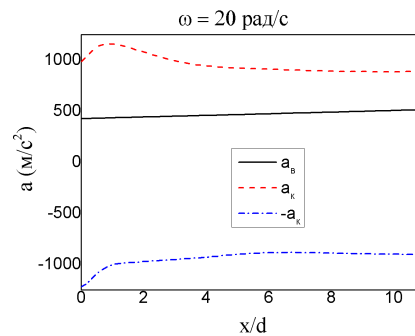


Рис. 4. Зміна прискорень по довжині каналу.  $a_b$  – відцентрове прискорення,  $a_k$  – кориолісове прискорення при  $\omega = 20$  рад/с,  $-a_k$  – кориолісове прискорення при  $\omega = -20$  рад/с

Результати досліджень наведені на рис. 5 – 16. У кожному поперечному перерізі профілі побудовані по лінії АБ (див. рис. 1).

Для поперечного перерізу  $x/d = 0$ , який розташований в кінці завихрювача (див. рис. 1) залежність профілю швидкості по ширині каналу від частоти обертання представлена на рис. 5 (правостороннє обертання) та рис. 6 (лівостороннє обертання). При правосторонньому обертанні максимальне значення осьової швидкості потоку  $w$  зменшується при збільшенні частоти обертання. За рахунок впливу сили Кориоліса на завихрений потік проходить перебудова профілю швидкості та появи другого піку осьової швидкості. Зовсім іншу картину можна спостерігати при лівосторонньому обертанні. Сила Кориоліса протидіє завихренню потоку повітря, що призводить до збільшення максимального значення осьової швидкості зі збільшенням частоти обертання.

Обертання каналу впливає на розподіл профілів температур. При правосторонньому обертанні спостерігається зменшення рівня температури у профілі, що свідчить про краще охолодження основного

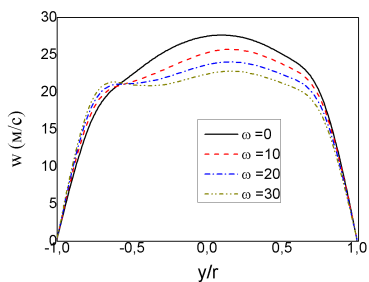


Рис. 5. Профіль осьової швидкості при  $x/d = 0$

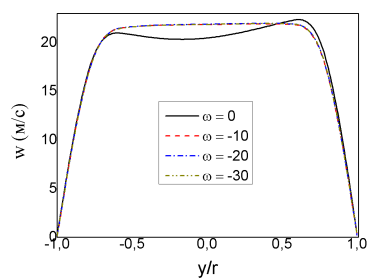


Рис. 10. Профіль осьової швидкості при  $x/d = 6, 8$

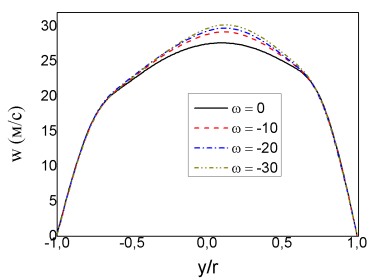


Рис. 6. Профіль осьової швидкості при  $x/d = 0$

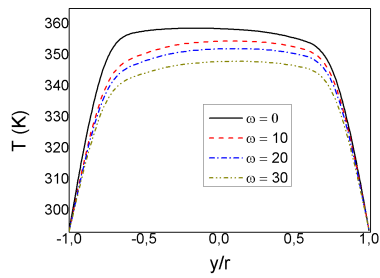


Рис. 11. Профіль температури при  $x/d = 6, 8$

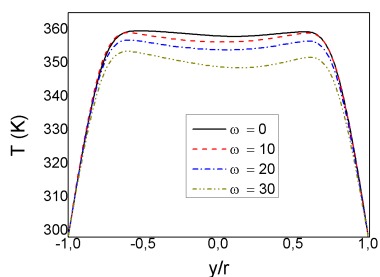


Рис. 7. Профіль температури при  $x/d = 0$

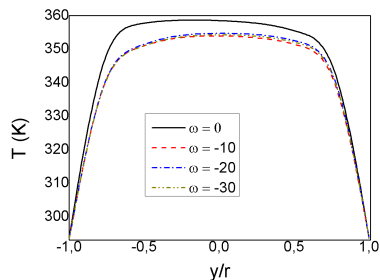


Рис. 12. Профіль температури при  $x/d = 0$

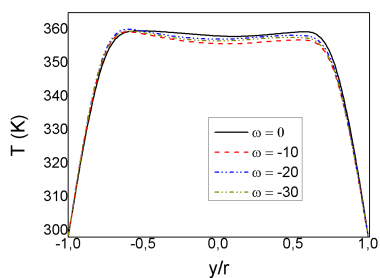


Рис. 8. Профіль температури при  $x/d = 0$

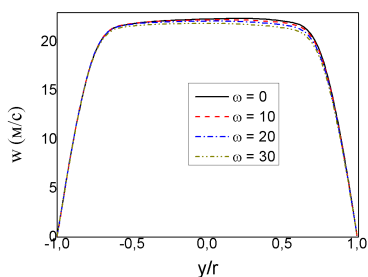


Рис. 13. Профіль осьової швидкості при  $x/d = 11$

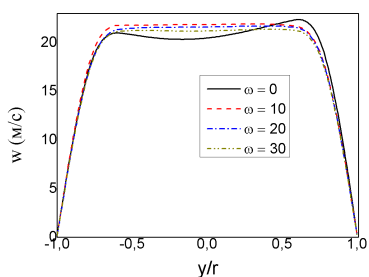


Рис. 9. Профіль осьової швидкості при  $x/d = 6, 8$

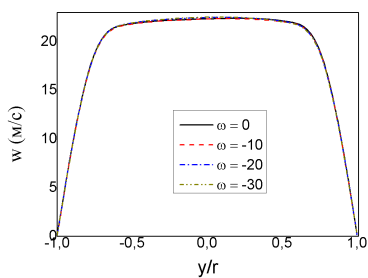


Рис. 14. Профіль осьової швидкості при  $x/d = 11$

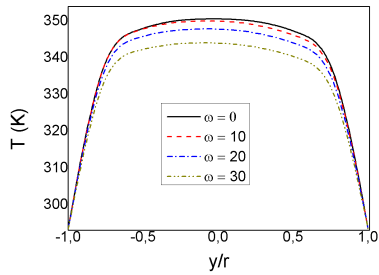


Рис. 15. Профіль температури при  $x/d = 11$

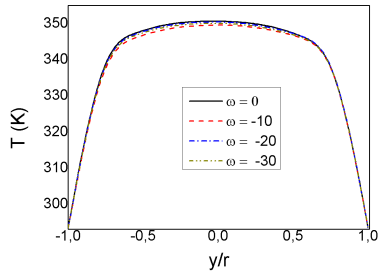


Рис. 16. Профіль температури при  $x/d = 11$

потoku (рис. 7). При лівосторонньому обертанні спостерігається незначне зменшення рівня температури (рис. 8).

В перерізі  $x/d = 6, 8$  вигляд профілів швидкостей свідчить про те, що обертання каналу призводить до згасання завихрення потоку й значення швидкості обертання майже не впливає на розподіл осьової швидкості  $w$  (рис. 9, 10). Обертання каналу призводить до інтенсифікації теплообміну як в точці А, так і в Б, що пояснюється видом профілів температури наведених на рис. 11, 12.

Для перерізу  $x/d = 11$ , який розташований в кінці каналу, не спостерігається суттєвого впливу обертання на розподіл осьової швидкості (рис. 13, 14). Для правостороннього обертання зміна профілів температури в залежності від частоти обертання має схожий характер як і для перерізу 6,8 (рис. 15). Для лівостороннього обертання майже не спостерігається суттєвої інтенсифікації теплообміну в порівнянні зі стаціонарним випадком (рис. 16).

## Висновки

В області  $Ro = 0, 1; 0, 2; 0, 3$  та  $Re = 20000$  виконано дослідження впливу масових сил інерції (відцентрових і Кориолісових) на профілі швидкостей і температури у круглій трубі, що радіально обертається, з похило-тангенціальним завихренням потоку на вході та  $90^\circ$  поворотом на виході. Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

- 1) Правостороннє обертання каналу сприяє завихренню потоку повітря.
- 2) При лівосторонньому обертанні сила Кориоліса протидіє завихренню потоку.
- 3) Збільшення швидкості обертання у випадку правостороннього обертання призводить до зменшення рівня температур у профілі, що свідчить про краще охолодження основного потоку.
- 4) У випадку лівостороннього обертання зміна швидкості обертання слабо впливає на профіль температур в порівнянні зі стаціонарним випадком та не призводить до значної інтенсифікації теплообміну.

## Перелік використаних джерел

1. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т.5 «Тепломасообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков» / А. А. Халатов, И. И. Борисов, С. В. Шевцов — Киев : Изд. Ин-та теплофизики НАНУ.— 2005. — 500 с.
2. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т.9. «Теплообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин» / А. А. Халатов, В. В. Романов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский, С. Д. Северин — Киев : Изд. Ин-та теплофизики НАНУ.— 2010. — 317 с.
3. Халатов А. А., Кобзарь С. Г., Дашевский Ю. Я. Численное моделирование теплообмена и гидродинамики в круглой трубе с наклонно-тангенциальной закруткой потока на входе // Промышленная теплотехника. — 2015. — Т. 37, № 1. — с. 12–21.
4. Glezer В., Moon Н.-К., Kerrebrock J., Guenette G. Heat transfer in rotating radial channel with swirling internal flow. // ASME Paper 98-GT-214.