

ГІДРОГАЗОДИНАМІКА ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ В ТРУБІ, ЩО РАДІАЛЬНО ОБЕРТАЄТЬСЯ, В ОБЛАСТІ ВПЛИВУ СИЛИ КОРІОЛІСА

М. Ю. Мазур^{1, a}, М. А. Мулярчук¹, А. А. Халатов^{1, 2}

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

В діапазоні частот обертання 5с^{-1} , 30с^{-1} , 40с^{-1} та $Re = 20000$ виконано дослідження впливу сили Коріоліса на гідрогазодинамку повітря в трубі, що радіально обертається, з похило-тангенційним завихренням потоку на вході та 90° поворотом на виході. Отримано, що при збільшенні радіальної частоти обертання труби під впливом сили Коріоліса спостерігається деформація профілів швидкостей.

Ключові слова: гідрогазодинаміка, завихрений потік, похило-тангенційне завихрення, моделі турбулентності, відцентрові сили, сили Коріоліса

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° 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° , 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 та теплообміну в круглій трубі з похило-тангенційним завихренням потоку на вході та 90° 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 завихреного потоку в системі охолодження робочих лопаток газових турбін великий інтерес представляє вплив частоти та напрямку обертання каналу на гідродинаміку й теплообмін по довжині охолоджуючого каналу. Результати експериментальних робіт по даному питанню в зв'язку зі складністю дослідження у відкритому доступі обме-

жені. Поки єдиною роботою, в якій досліджено вплив обертання на теплообмін в круглому каналі з тангенційним (90°) завихренням потоку, залишається робота [4]. Метою даної роботи є дослідження тепловіддачі в трубі, що радіально обертається, в області впливу сил Коріоліса.

1. Об'єкт дослідження та 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. 1, 2). 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 $G = 6,448\text{г/с}$, що відповідає $Re = 20000$, $Re = \omega \cdot d/\nu$, де ν – кінематична в'язкість повітря; температура повітря на вході в об'єкт дослідження $T_{in} = 97\text{C}$; температура стінки завихрювача $T_{wz} = 30\text{C}$; температура стінки циліндричного каналу $T_w = 20\text{C}$.

2. Визначення області дослідження

На завихрений потік, що рухається в круглому каналі, діють як відцентрові сили, так і сили Коріоліса. При цьому спостерігається дві причини виникнення цих сил. У першому випадку дані сили проявляються при завихренні самого потоку. Але, враховуючи малий діаметр каналу й те, що в по-

^amasur123m@gmail.com

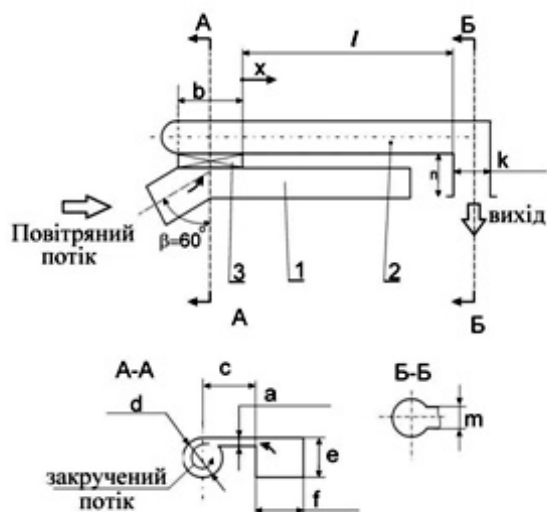


Рис. 1. Геометрична модель об'єкта дослідження [1]:
1 – розподільчий канал; 2 – тангенційний завихрювач;
3 – основний циліндричний канал. Основні розміри:
 $a = 5\text{мм}$; $b = 59\text{мм}$; $c = 30\text{мм}$; $d = 20\text{мм}$; $e = 20\text{мм}$;
 $f = 25\text{мм}$; $k = 40\text{мм}$; $l = 231\text{мм}$;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

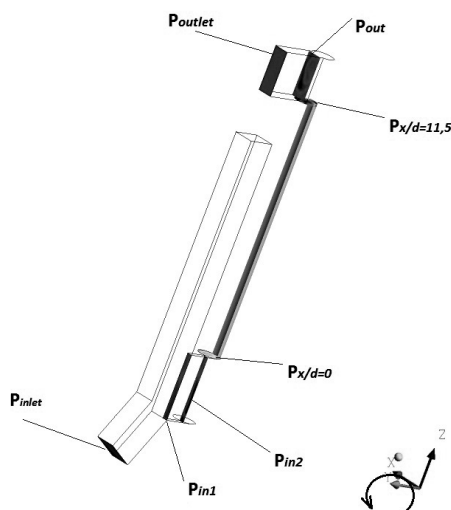


Рис. 2. Комп'ютерна модель

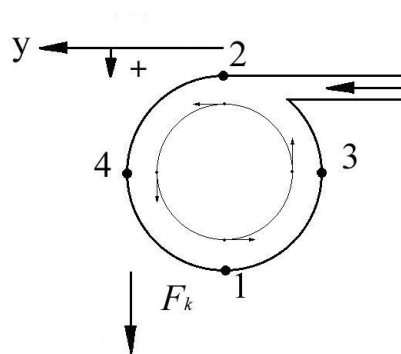


Рис. 3. Поперечний переріз циліндричного каналу на виході із завихрювача. Правостороннє обертання

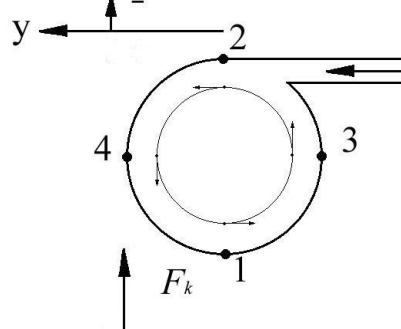


Рис. 4. Поперечний переріз циліндричного каналу на виході із завихрювача. Лівостороннє обертання

перечному перерізі сумарне значення сил дорівнює нулю, то силами Кориоліса та відцентровими силами в цьому випадку можна знехтувати. В другому випадку сили Кориоліса та відцентрові сили проявляються при радіальному обертанні круглого каналу. Напрямок відцентрової сили співпадає із напрямком осевої швидкості потоку. На (рис. 3, 4) зображено напрямок дії сили Кориоліса при правосторонньому та лівосторонньому обертанні циліндричного каналу, а також напрямок руху потоку в найбільш цікавих з точки зору теплообміну точках поперечного перерізу каналу. Як видно з рис. 3, при правосторонньому обертанні сила Кориоліса сприяє завихренню потоку. При цьому спостерігається зміщення потоку до точки 1. В точці 4 швидкість потоку співпадає з напрямком сили Кориоліса, а в точці 3 вони мають протилежні напрямки. При лівосторонньому обертанні (рис. 4) спостерігається протилежна картина: під дією сили Кориоліса потік притискається до області, поблизу точки 2, в точці 3 напрямки сили Кориоліса та швидкості потоку співпадають, в точці 4 вони протилежні. Для проведення дослідження тепловіддачі потоку в круглому каналі потрібно визначити область частот, в яких буде проводитись моделювання. Згідно з роботою [5] значення відцентрової сили та сили Кориоліса залежать від частоти обертання об'єкта. При цьому сили Кориоліса переважають в області малих частот обертання, а відцентрові – в області великих частот обертання. Для того, щоб визначити

область впливу цих сил, потрібно знайти відношення між даними силами:

$$F_c/F_{centr} = m \cdot \Omega^2 \cdot r / 2m \cdot \Omega v_0 = \Omega \cdot r / 2v_0 \quad (1)$$

В області переважання сил Кориоліса співвідношення (1) повинно бути менше одиниці:

$$\Omega \cdot r / 2v_0 < 1$$

Звідси одержуємо:

$$\Omega < 2v_0/r$$

Отже, враховуючи геометричні параметри каналу та початкову швидкість потоку, можна чисельно оцінити область, в якій будуть переважати сили Кориоліса:

$$\Omega < 2 \cdot 33,739/1,33 = 50,735 \text{с}^{-1}$$

Дослідження термогазодинаміки потоку проводилися в області переважання сил Кориоліса. В роботі розглянуто діапазон зміни частот радіального обертання труби – $0 \dots 40 \text{с}^{-1}$.

3. Результати досліджень

Дослідження профілів осьової швидкості та швидкості обертання потоку проводилось у перерізах ліній 2-1 та 4-3 (рис. 3, 4). При обертанні круглого каналу проявляються масові сили інерції: відцентрові та Кориолісові. Вони діють на завихрений потік, трансформуючи профілі швидкостей. Результати моделювання представлені на рис. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12.

В перерізі $z/d = 0$ для лінії 2-1 спостерігається різка зміна профілів осьової швидкості потоку в порівнянні зі стаціонарним випадком. Для правостороннього обертання (5, 6) - в точці 2. Дані результати підтверджують той факт, що напрямок ефективної закрутки потоку залежить від напрямку радіального обертання каналу.

Для лінії 4-3 в перерізі $z/d = 0$ (рис. 7, 8) також спостерігається зміна профілів швидкостей в

порівнянні зі стаціонарним випадком. При цьому чим більша частота обертання, тим більша осьова швидкість потоку.

Для перерізу $z/d = 11$ на лінії 2-1 (рис. 9, 10) стабілізація потоку починає порушуватися при збільшенні частоти радіального обертання каналу. Таку ж картину можна спостерігати і для лінії 4-3 (рис. 11, 12).

4. Висновки

Дослідження впливу сили Кориоліса на гідрогазодинаміку повітря в трубі, що радіально обертається, з похило-тангенційним завихренням потоку на вході та 90° поворотом на виході показало, що при збільшенні радіальної частоти обертання труби під впливом сили Кориоліса спостерігається деформація профілів швидкостей.

Перелік використаних джерел

1. Халатов А. А., Борисов И. И., В. Шевцов С. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т.5. — Киев : Изд. Ин-та теплофизики НАНУ, 2005.
2. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т.9. / А. А. Халатов, Романов В. В., И.И. Борисов и др. — Киев : Изд. Ин-та теплофизики НАНУ, 2010.
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. Heat transfer in rotating radial channel with swirling internal flow / В. Glezer, Н.-К. Moon, J. Kerrebrock, Guenette G. // ASME. — P. 98.
5. Шукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. — Москва : Машиностроение, 1982.

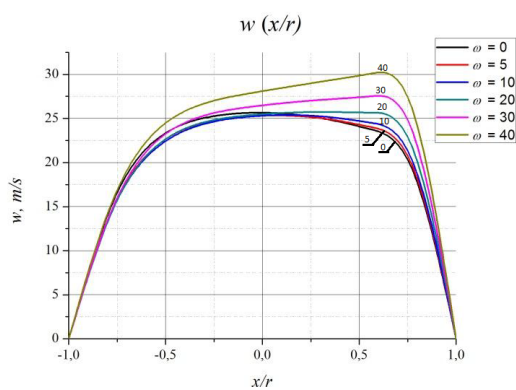


Рис. 5. Профілі осьової швидкості при $z/d = 0$ для лінії 2-1. Правостороннє обертання

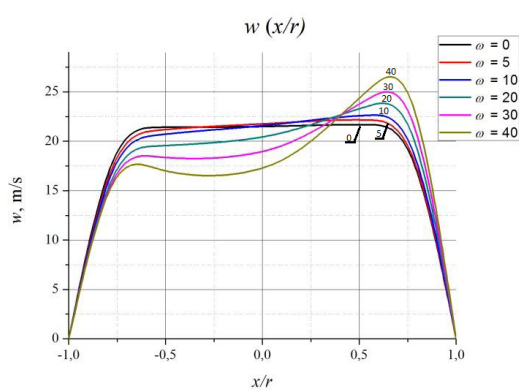


Рис. 9. Профілі осьової швидкості при $z/d = 11$ для лінії 2-1. Правостороннє обертання

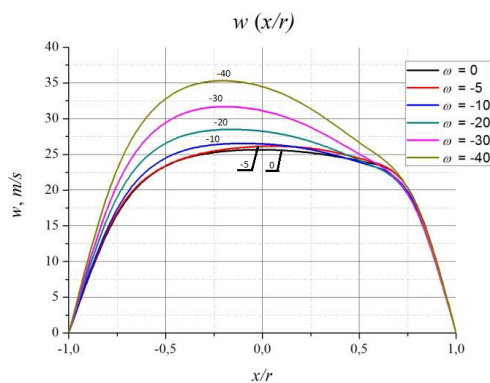


Рис. 6. Профілі осьової швидкості при $z/d = 0$ для лінії 2-1. Лівостороннє обертання

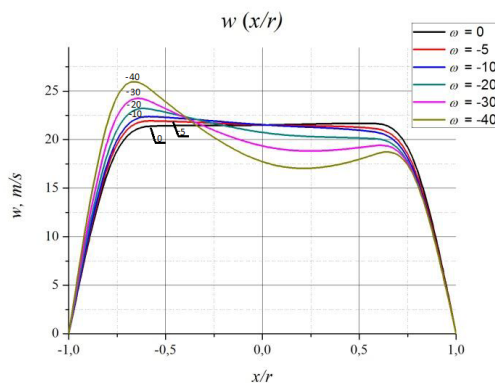


Рис. 10. Профілі осьової швидкості при $z/d = 11$ для лінії 2-1. Лівостороннє обертання

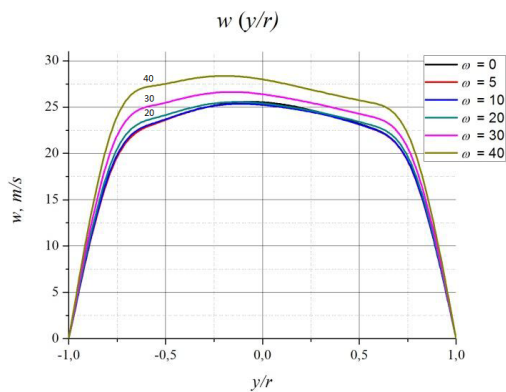


Рис. 7. Профілі осьової швидкості при $z/d = 0$ для лінії 4-3. Правостороннє обертання

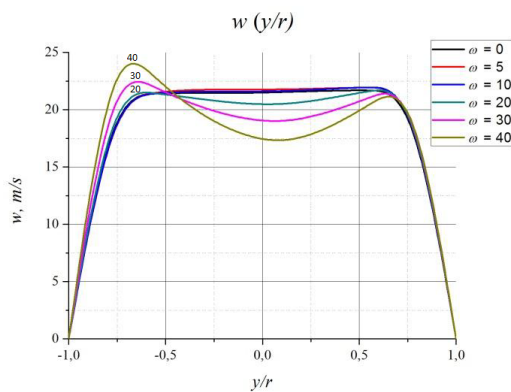


Рис. 11. Профілі осьової швидкості при $z/d = 11$ для лінії 4-3. Правостороннє обертання

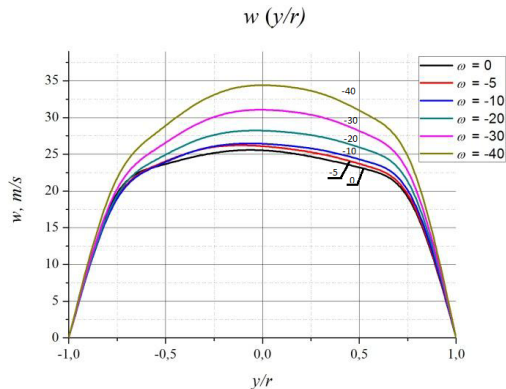


Рис. 8. Профілі осьової швидкості при $z/d = 0$ для лінії 4-3. Лівостороннє обертання

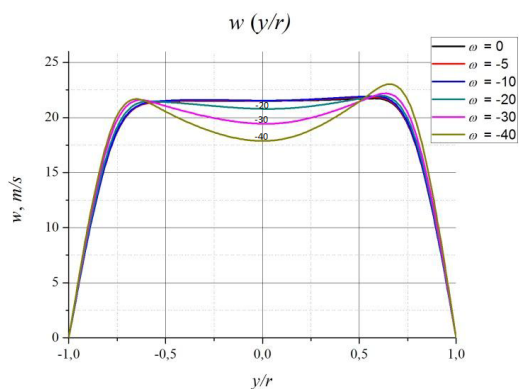


Рис. 12. Профілі осьової швидкості при $z/d = 11$ для лінії 4-3. Правостороннє обертання