

УДК 621.311.22: 532.517.4

МАЛКІН Е.С., ТИМОЩЕНКО А.В.

Ін-т технічної теплофізики НАН України

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОДИНАМІКИ КІЛЬЦЕВИХ МІКРОКАНАЛІВ З НОРМАЛЬНОЮ ШОРСТКІСТЮ ПОВЕРХНІ

Подаються результати експериментальних досліджень гідродинаміки кільцевих мікроканалів з нормальною шорсткістю стінок для потоку рідини без теплообміну в діапазоні чисел Рейнольдса, що охоплює ламінарний та турбулентний режими течії.

Приводяться результати експериментальних досліджень гідродинаміки кільцевих мікроканалів з нормальною шорсткістю стінок для потоку жидкості без теплообміну, в діапазоні чисел Рейнольдса, охоплюючому ламінарний і турбулентний режими течення.

To produce research results hydrodynamics of the micro annulus with normal roughness the walls for flow without heat transfer at the laminar and turbulence rate.

c_f – коефіцієнт опору тертя;
 d_1, d_2 – діаметри внутрішнього та зовнішнього циліндрів кільцевої щілини, м;
 $d_e = d_2 - d_1$ – гідравлічний діаметр кільцевої щілини, м;
 f – переріз для проходу теплоносія, м²;
 G – витрата, кг/с;

L – довжина кільцевої щілини, м;
 P – змочений периметр, м;
 p – тиск, МПа;
 Re – число Рейнольда;
 T – температура, °С;
 V – внутрішній об'єм ділянки, м³;
 x – характерний лінійний розмір, м.

Вступ

Практична необхідність використання кільцевих каналів в контурах охолодження атомних реакторів, в елементах контрольно-вимірювальних приладів, запірно-регулюючій арматурі та тепломасообмінних пристроях призвела до того, що у вітчизняній та зарубіжній літературі питанням дослідження процесів гідродинаміки та тепломасообміну в каналах кільцевого перерізу присвячена велика кількість публікацій. Серед робіт вітчизняних вчених слід зупинитись на публікаціях В.І. Субботіна та П.А. Ушакова з співавторами, що присвячені питанням дослідження гідродинаміки [1-3] та теплообміну [4] в кільцевих зазорах; Б.С. Петухова та Л.І. Ройзена [5], які в широких діапазонах чисел Рейнольдса та відношень d_1/d_2 , провели дослідження потоків стисненого повітря при умові одно- та двостороннього підігріву та отримали інтегральні співвідношення для температурного поля та коефіцієнтів теплообміну. Результати опублікованих експериментальних до-

сліджень знайшли своє відображення в методиках розрахунку динамічних та теплових характеристик потоків рідини (в тому числі рідких металів) та газу, в кільцевих каналах [6]. Питанням теоретичного дослідження полів швидкостей та температур в каналах кільцевого перерізу присвячені роботи Н.І. Булеєва [7, 8]. Окремо слід зупинитись на роботах В.І. Толубінського та дослідників київської школи [9], присвячених вивченню кризових явищ в каналах кільцевого перерізу.

Проте, незважаючи на великий напрацьований матеріал та створені методики інженерного розрахунку основних характеристик потоку в кільцевих каналах, виникає необхідність в їх подальшому дослідженні та вивченні. Нові зразки техніки [10] викликають необхідність вивчення процесів гідродинаміки та теплообміну в кільцевих каналах з розмірами 50...300 мкм (далі в тексті – кільцевих мікроканалах). При таких зазорах технологічні допуски на геометричні розміри можна порівнювати з розмірами кільцевих мікроканалів, а впливи

фізичних властивостей поверхні та якості її обробки (шорсткості) починають відігравати значення значно більші, ніж до цього їм відводилося в каналах з великими геометричними розмірами (великими відносно абсолютних значень шорсткості).

Мета дослідження

Метою дослідження даної роботи є вивчення поведінки потоку рідини в кільцевих мікроканалах нормальної шорсткості без теплообміну, з розмірами щілини 125...222 мкм. Результати досліджень представлені у вигляді графічних залежностей коефіцієнтів опору тертя від числа Рейнольдса.

Методи дослідження

Стенд для дослідження динамічних та теплових характеристик потоку рідини в кільцевих мікроканалах представлено на рис. 1. Він складається з робочої ділянки (6), теплогенератора (21), теплообмінника (14), водяного насоса (13), повітряного

компресора (16), вимірювальних та контрольно-регулюючих приладів та систем (1-4, 8, 9, 20, 23), запірно-регулюючої арматури.

Управління електроспоживаючими приладами здійснюється з пульта управління (19).

Вимірювання проводяться наступним чином. Після насоса потік води з параметрами (p_0, G_0, T_0) по трубопроводу (15) надходить в теплогенератор, підігривається, та з параметрами (p_1, G_0, T_1) надходить до робочої ділянки (у випадку дослідження ізотермічного потоку підігрів не здійснюється). Після робочої ділянки потік через теплообмінник прямує в резервуари.

Вимірювання середньої температури потоку рідини в робочій ділянці виконується диференціальними хромель-алюмелевими (ХА) термопарами, що підключені до вольтметра універсального цифрового В7-40/5 (2). Надлишковий статичний тиск на вході та виході з робочої ділянки вимірюється зразковими пружинними манометрами (3). Надлишковий статичний тиск та перепад тиску в кільцевому мікроканалі вимірюється зразковим

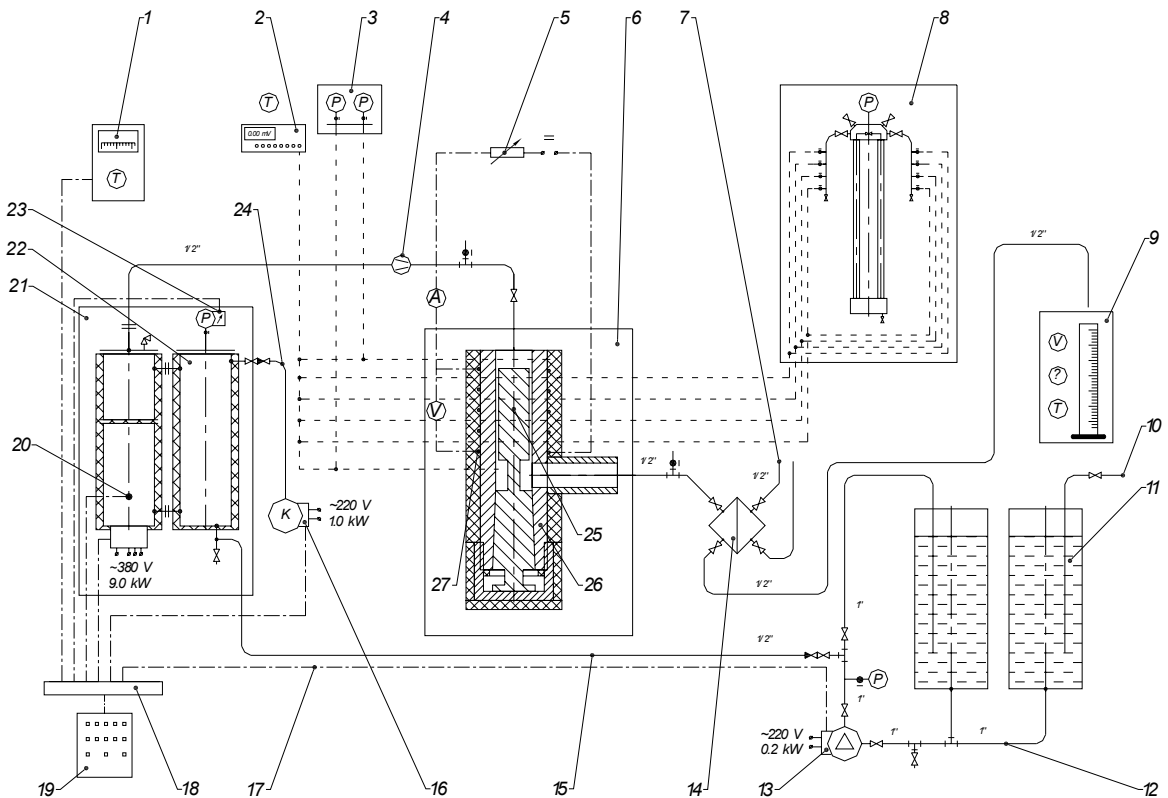


Рис. 1. Принципова схема стенду дослідження гідродинамічних та теплових характеристик потоку рідини в кільцевих мікроканалах.

пружинним манометром та диференційним манометром ДТ150 (8). В якості робочої рідини використовується чотирихлористий вуглець (CCl_4), відносна густина $1,5954 \pm 0,01 \%$, підфарбований суданом. Витрата рідини вимірюється об'ємним способом – фіксується об'єм рідини, що надходить до циліндру мірного за одиницю часу, вимірюється температура рідини та зовнішнього повітря (9).

Робоча ділянка представляє собою кільцевий мікроканал, утворений між зовнішньою поверхнею поршня (25), що розміщений в патрубку (26), та внутрішньою поверхнею патрубка. Кільцевий мікроканал може утворюватись як концентричним, так і з заданим ексцентриситетом, це здійснюється шляхом зміни розмірів стабілізаторів на поршні. Зміна ширини, довжини, якості та властивостей поверхні кільцевого мікроканалу виконується шляхом заміни поршня в патрубку.

Розмір мікроканалу – ширина, довжина – визначається аналітично, виходячи з дійсних розмірів елементів, що утворюють канал – зовнішнього та внутрішнього діаметрів, висоти поршня, висоти та кроку шорсткості.

Динамічні характеристики потоку рідини досліджувались в каналі, внутрішня поверхня якого виконувалась з латуні (Л63) або фторопласту (фторопласт 40), зовнішня – з нержавіючої сталі (12X18H10T).

Якість обробки поверхні каналу та величина шорсткості стінок визначались оптичним методом на бінокулярному мікроскопі МБС-1. Фрагменти фотокарток внутрішньої поверхні каналу (виконаної з латуні Л63) подаються на рис. 2.

Надлишковий статичний тиск та перепад тиску в каналі вимірювався через імпульсні отвори діаметром 1,5 мм. Відліки беруться в двох діаметрально розташованих точках перерізу (з метою зменшення впливів нерівномірного розподілу полів швидкостей, обумовлених відхиленнями геометричних розмірів поверхонь каналів від їх вимірних значень).

Ізоляція робочої ділянки забезпечується наступним чином (27). На зовнішню поверхню робочої ділянки нанесено шар мінеральної вати з розташованим в ньому нагрівальним елементом (ніхромовий дріт, підключений до джерела постійного струму через ЛАТР (5)). Температура на зовнішній поверхні кільцевої щілини підтримується рівною середній температурі потоку рідини на вході в канал. Торцева поверхня поршня ізолюється шаром мінеральної вати. Таким чином, досягається рівність температур поверхонь каналу та середньої температури потоку та виключається вплив процесу теплообміну на процес переносу кількості руху.

Геометричні розміри кільцевих каналів подаються в таблиці.

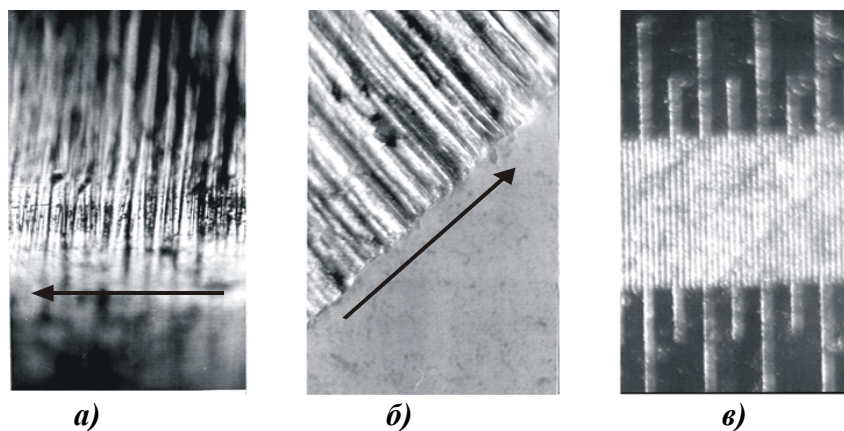


Рис. 2. Приклади шорсткості поверхні каналу: а) шорсткість, вид зверху; б) розріз поверхні, висота шорсткості, вид збоку; в) масштаб, ціна поділки 14 мкм; напрямок руху рідини вказано стрілкою.

Табл. Геометричні розміри кільцевих мікро каналів

№ п/п	Канал	Діаметри, мм			Розміри щілини, мкм	Довжина L, мм	d_1/d_2
		d_1	d_2	d_e			
1	11	14,790	15,040	0,250	125	20,0	0,983
2	12	14,698	15,040	0,342	171	20,0	0,977
3	13	14,595	15,040	0,445	222	20,0	0,970

Оцінка похибок вимірювання експериментальних даних виконувалась, базуючись на теорії ймовірності та теорії похибок [11]. Відносна похибка результатів вимірювання знаходиться в інтервалі $\varepsilon = 10...15\%$.

Обговорення результатів

Поведінка рідини в каналі 13 добре узгоджується з відомими результатами про течію рідини в кільцевих каналах [1], спостерігаються ламінарний та турбулентний режими руху. В області ламінарного режиму руху експериментальні дані з

похибкою 5...7% описуються рівнянням

$$c_f = \psi \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \frac{64}{Re}$$

Для круглої труби $\psi = 1$, для плоскої щілини $\psi = 1,5$ (крива 1 на рис. 3):

$$c_f \approx \frac{96}{Re} \quad (1)$$

У випадку турбулентного режиму руху з похибкою 15...30% описуються формулою Блазіуса, крива 2 на рис. 3:

$$c_f = 0.316 \cdot Re^{-0.25} \quad (2)$$

Такі відхилення можна пояснити наявністю

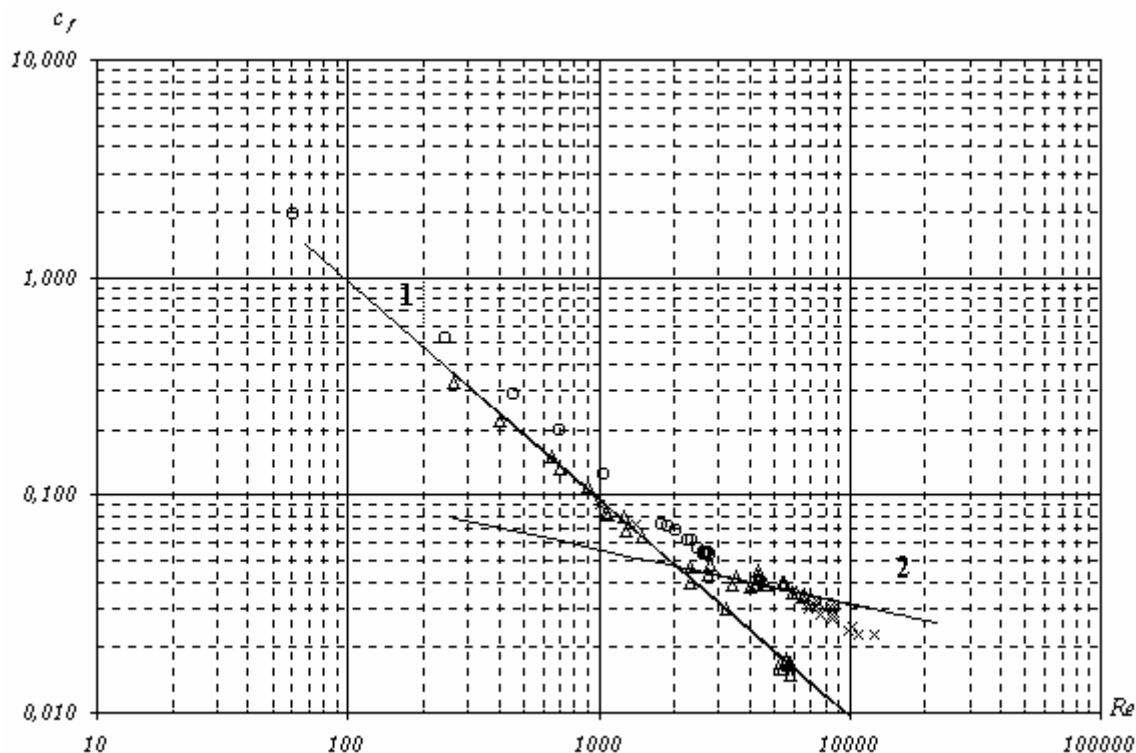


Рис. 3. Коефіцієнт тертя для концентричного кільцевого каналу:
1 – крива за залежністю (1); 2 – крива за залежністю (2).

ексцентриситету в каналі, який призводить до зменшення коефіцієнтів опору тертя, до 40 % [1].

Результати отримані для каналу 12 свідчать про наявність ламінарного режиму руху в області чисел Рейнольдса 200...6000, похибка при застосуванні залежності (1) дорівнює 5...10 %. Одночасно інша група точок з похибкою 10÷15% описується залежністю (2). Слід відмітити, що жодних заходів щодо заспокоєння потоку на вході в канал не проводилось, а поверхні каналу мали нормальну шорсткість. Існування в одному інтервалі чисел Рейнольдса як ламінарного, так і турбулентного режимів течій, може бути пояснено наступним чином. Дослідження виконувались серіями. Після виконання серії замірів утворювався новий кільцевий канал шляхом розвороту поршня на 180°. Новий канал мав певний ексцентриситет, який внаслідок нерівномірності розповсюдження полів швидкостей та дотичних напружень, призводив до виникнення турбулентного режиму руху.

Результати, отримані для концентричного кільцевого мікроканалу 11, свідчать про наявність ламінарного режиму руху в діапазоні чисел Рейнольдса 60...3000, проте їх апроксимація залежністю (1) дає сталу величину похибки в 44 %. Таким чином, крім затягування ламінарного режиму руху спостерігається відхилення отриманих значень коефіцієнтів опорів тертя від значень, розрахованих за залежністю (1).

Отримані експериментальні значення з похибкою 10% апроксимуються залежністю:

$$c_f = \frac{120.3}{\text{Re}}.$$

Вивчення впливу шорсткості на гідродинамічні характеристики потоку починається з дослідів Нікурадзе з пісчаною шорсткістю. Вітчизняними вченими була виконана робота по вивченню особливостей гідродинаміки труб з регулярною штучною шорсткістю стінок [12]. При розгляді течії в шорстких трубах виникло питання про вибір характерного визначаючого розміру – гідравлічного діаметру. Зазвичай його рекомендовано знаходити за залежністю [6]

$$x = \frac{4f}{P}. \quad (3)$$

Або для труб [12]:

$$x = 2\sqrt{\frac{V}{\pi L}}. \quad (4)$$

Вибір цього розміру в якості гідравлічного діаметру, за думкою авторів [12], не є достатньо обґрунтованим, оскільки до нього включено вихрові зони за виступами шорсткості та перед ними, в які основний потік фактично не потрапляє. Використання характерного розміру, визначеного за залежністю (4) в області ламінарного режиму течії для різних видів шорсткості, призводить до розмежування результатів та їх незадовільної кореляції з залежністю Пуазейля. Виключення об'єму вихрових зон між елементами шорсткості V_0 з об'єму V призводить до зменшення значення гідравлічного діаметру та доброму узгодженню експериментальних даних з залежністю Пуазейля [12].

У випадку гладкого кільцевого каналу розрахунок гідравлічного діаметру за формулою (3) дає наступний результат [6]:

$$d = d_2 - d_1. \quad (5)$$

Обробка експериментальних даних виконувалась для гідравлічного діаметру підрахованого за формулою (5).

Вважаючи, що завищені значення втрат тиску по довжині кільцевого мікроканалу, обумовлені впливом шорсткості поверхні, розглянемо два варіанти течії в каналі. В першому випадку, спираючись на результати роботи [12], вважаємо що обтікання виступів шорсткості призводить до утворення вихрових зон, які обумовлюють додаткову дисипацію енергії в каналі. В другому випадку, вважаємо що рідина рухається без вихорів, плавно огинаючи виступи шорсткості, а додаткові втрати тиску обумовлені збільшенням площі бічної поверхні каналу і, як наслідок, збільшенням впливу поверхневих сил на потік рідини. Як в першому, так і в другому випадках, розрахований гідравлічний діаметр буде меншим від розміру, підрахованому за залежністю (5). Подальші напрацювання експериментального матеріалу з шорсткими поверхнями, а також серії дослідів з полірованими поверхнями дозволять пояснити отримані результати та розкрити механізм течії рідини в кільцевих мікроканалах.

Висновки

В концентричних кільцевих каналах з малими геометричними розмірами та нормальною шорсткістю можливе затягування ламінарного режиму течії без проведення спеціальних заходів.

В кільцевих мікроканалах з ексцентриситетом утворюється неоднорідність полів швидкостей та дотичних напружень, що призводить до переходу ламінарного режиму течії в турбулентний в інтервалі чисел Рейнольдса 2300...2500.

Неврахування шорсткості поверхонь в кільцевих мікроканалах призводить до занижених розрахункових значень коефіцієнтів опорів тертя. Поставлено питання про коректність використання залежності (5) для визначення гідравлічного діаметру в кільцевих каналах з нормальною шорсткістю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шевченко Ю.Д., Субботин В.И., Ушаков П.А., Шейнина А.В. Гидродинамика в кольцевом зазоре с продольными ребрами, сб. статей Жидкие металлы.- М.: Атомиздат, 1967.- С. 102-111.
2. Субботин В.И., Ушаков П.А. Приближенные расчеты гидродинамических характеристик турбулентного потока жидкости в кольцевых каналах // Теплофизика высоких температур.- 1972.- Т. 10.- № 5.- С. 1025-1030.
3. Ушаков П.А. Влияние эксцентриситета на гидродинамические характеристики кольцевых каналов// Теплофизика высоких температур, 1976.- Т. 14.- № 1.- С. 106-111.
4. Субботин В.И., Таланов В.Д., Ушаков П.А. Влияние эксцентриситета на теплообмен жидких металлов в кольцевом зазоре// сб. статей Жидкие металлы.- М.: Атомиздат, 1967.- С. 111-123.
5. Петухов Б.С., Ройзен Л.И. Теплообмен в трубах кольцевого сечения// Инженерно-физический журнал.- 1963.- Т. VI.- № 3.- С. 3-11.
6. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы)// П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков; под общ. ред. П.Л. Кириллова.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 360 с.: ил.
7. Булеев Н.И., Мосолова В.А., Ельцова Л.Д. Теплоотдача в турбулентных потоках жидкости в кольцевых и плоских зазорах// сб. статей Жидкие металлы.- М.: Атомиздат, 1967.- С. 123-131.
8. Булеев Н.И. О турбулентных течениях несжимаемой жидкости в различных каналах, Турбулентные течения // Труды Всесоюзной школы по проблемам турбулентных течений жидкостей и газов.- М.: Изд. «Наука», 1977.- С. 181-188.
9. Толубинский В.И., Домашев Е.Д. Кризис теплоотдачи при кипении в кольцевых каналах // Вопросы атомной науки и техники, выпуск 1(30).- М.: НИКИЭТ, 1983.- С. 58-68.
10. Малкін Е.С., Фуртат І.Е., Тимощенко А.В., Турос Г.А. Деклараційний патент на винахід "Конденсаторівдвідник" № 99063083 от 15.02.2001 г.
11. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Изд. 2-е испр. и доп. Л., «Наука», Ленинградское отд., 1967.- 155 с.
12. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Таранов Г.С., Гусаков В.И. Особенности гидродинамики труб с регулярной искусственной шероховатостью стенок // Турбулентные течения. Труды Всесоюзной школы по проблемам турбулентных течений жидкостей и газов.- М.: Изд. «Наука», 1977.- С. 64-69.

Одержано 27.10.2004 р.