

УДОСКОНАЛЕННЯ СІТЧАСТОЇ СТРУКТУРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ТА СТАБІЛЬНОСТІ ТЕЧІЇ В ПЛІВКОВИХ АПАРАТАХ

Вступ та постановка задачі

Ефективний теплообмін в плівкових апаратах залежить від стійкості плівки рідини в них та ефективності теплообмінних процесів в плівці. Сітчасті структури забезпечують стійкість тонких плівок [1], але не однозначно впливають на теплообмін в плівках. В роботі чисельним методом на основі розв'язання рівняння нерозривності для ідеальної рідини при омиванні перешкоди оцінено товщину плівки на сітчастій структурі та її вплив на теплообмін.

Таким чином, задачу зведено до вивчення динаміки руху потоку ідеальної рідини (без врахування дії сил тяжіння, капілярних сил та тертя), що омиває перешкоду – дротинку сітки. При цьому розглянуто рух плівки в межах вічка металевої сітки, обтікання якої відбувається ламінарним потоком без утворення вихорів [2, 9].

Дана задача досліджувалася раніше [2-8], проте відомі результати потребують аналізу та уточнення. Зокрема, аналітично задача обтікання циліндра потоком ідеальної рідини без відривання за циліндром розв'язана Жуковським М.Є. [2], і з того часу отримано цілий ряд математичних моделей, які описують відривання потоку за циліндром [3] за умови ламінарного [4] та турбулентного руху [5]. Однак всі роботи зводилися до визначення залежностей поля швидкостей або коефіцієнта тертя [6] від умов обтікання, що важливо для розрахунку опору циліндрів, або системи циліндрів. Аналогічні значення перепадів тиску отримано і за фізичного моделювання [7]. Однак для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі більш важливим є локальна товщина плівки, що омиває циліндр. Ця задача відома в зворотній інтерпретації [8] - рух круглого циліндра під вільною поверхнею рідини, що дозволяє розрахувати швидкості за циліндром та форму поверхні рідини. Проте це не відповідає задачам роботи. Тому доповнимо задачу Жуковського залежностями для розрахунку товщини плівки та, користуючись таким методом, встановимо вплив форми профілю сітки на гідродинамічні та теплообмінні показники в плівці.

Виходячи з цього, метою роботи є встановлення локальної товщини плівки залежно від профілю і розташування перешкод (дротинок сітки) та оцінка на цій основі теплообміну в таких плівках.

Таким чином, задачами роботи є:

1. Удосконалення методики чисельного розрахунку швидкості та товщини потоку, що омиває перешкоду, на основі чисельного розв'язання рівняння нерозривності, записаного для ідеальної рідини.
2. Оцінка впливу профілю перешкоди, що відповідає дротинці сітки, на значення товщини плівки та її швидкості.
3. На основі гідродинамічних параметрів оцінка впливу перешкод на теплообмінні показники плівки та встановлення рекомендованих геометричних параметрів сітчастої структури.

Для формулювання задачі запишемо рівняння збереження маси рідини – рівняння нерозривності [9] $\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} = 0$.

Можна знайти функцію $\psi(x, y)$, що тотожно задовольняє попереднє рівняння і зв'язану з проекціями швидкості W_x і W_y рівняннями $W_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $W_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$. Дійсно, підстановка цих величин в рівняння нерозривності перетворює його на тотожність. Функція $\psi(x, y)$ зберігає постійне значення уздовж ліній току. Тому сімейство ліній рівня $\psi(x, y) = C$ є лініями току, а функція $\psi(x, y)$ – функцією току.

Таким чином, рівняння нерозривності для функції току має вигляд:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Фізична суть функції $\psi(x, y)$ є наступною [10] – об'ємна витрата рідини відповідає різниці сусідніх ліній току:

$$G/\rho = \psi_2 - \psi_1, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

При розв'язанні задачі вважаємо, що рідина омиває перешкоду, не потрапляючи до її середини, та не відшаровується від перешкоди з утворенням вихорів. Окрім цього, в напрямку, перпендикулярному до ліній току, рух рідини – відсутній. Це дозволяє сформулювати граничні умови. Так, для встановлення граничних умов на верхній межі області визначимо об'ємну витрату рідини для точки 1 з табл. 2.

$$\frac{G}{\rho} = \frac{2,39/2}{1000} = 3,313 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с} \text{ тобто на верхній межі } \psi = 3,313. \text{ І оскільки в напрямку,}$$

перпендикулярному до неї течія рідини відсутня, – на нижній межі $\psi = 0$. Граничні умови зліва формулюємо у виді рівняння прямої $\psi = 20,706y$. При цьому коефіцієнт цього рівняння визначається за умови – $y = 1,6 \Rightarrow \psi = 3,313$. Аналогічно обраховуємо граничні умови справа $\psi = 55,217(y - 0,1)$.

Математично задача зводиться до знаходження значень функції току ψ як розв'язку рівняння Лапласа (1) в прямокутній області, що містить перешкоду циліндричної форми (див. рис. 1). На рис. 1 показано також граничні умови. Задачу розв'язано методом скінченних елементів [10].

Спочатку будувалася сітка для прямокутної області і потім ця сітка відображалася на досліджувану область з метою описання руху навколо перешкоди. Тобто отримуємо двовимірну матрицю, яка містить локальні значення функції току ψ як складові швидкості.

Верифікація задачі

Для верифікації порівняємо результати чисельного розрахунку з результатами аналітичного розрахунку (за методикою Жуковського [2]) для певної точки. Розрахункова точка відповідає 11 рядку та 11 стовпчику матриці результатів, для сітки з кроком $0,1 \times 0,1$ мм, частина з якої показана на рис. 1.

Верифікацію для досліджуваної точки за різних кроків сітки проведемо за наступних граничних умов: – швидкість на вході $W_0 = 20,4$ мм/с, геометрія ділянки $0,35 \times 0,16$ мм, радіус циліндра $R = 0,1$ мм.

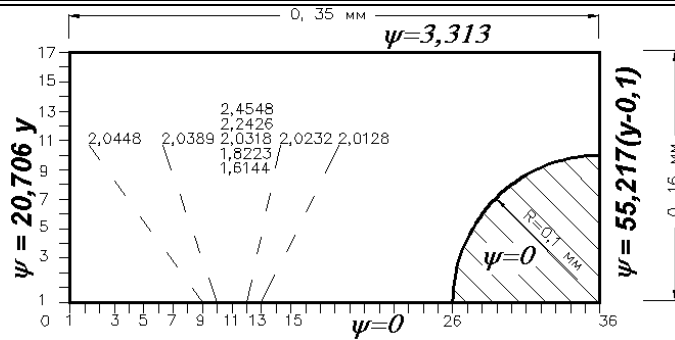


Рис. 1. Розрахункова область задачі

Таблиця 1

Верифікація даних

Крок сітки	Складова швидкості $W_x = \partial\psi/\partial y$	Складова швидкості $W_y = -\partial\psi/\partial x$	Швидкість потоку чисельно, мм/с $W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$	Швидкість потоку аналітично, мм/с	Відносна похибка, %
0,025	21,041	-0,786	21,056	18,465	14
0,0125	21,028	-0,780	21,042	- ; -	13,9
0,00625	21,027	-0,778	21,041	- ; -	- ; -

Як видно з табл.1, прийнятною для обчислень є розрахункова сітка з кроком 0,0125 за відносної похибки чисельного розрахунку 13,9 %.

Встановлення початкових швидкостей плівки



Рис. 2. Зразок сітки

Для встановлення початкових значень швидкості візьмемо експериментальні дані розрахунку середньої товщини плівки на сітці [11]. В цілому, на вертикальному відрізку сітки, розмірами $H \times B = 10 \times 15$ см переливанням створювалася плівка води. Вимірювання проводилися на сітці дротяній тканий з квадратними вічками ТУ У 322-00191264-007-97 з розміром вічка та діаметром дроту 0,50/0,20 мм. При цьому ротаметр визначав її масову витрату G , кг/год, а методом відсікання (відсікли подачу і помістили сітку з плівкою в мірник, а мірник на ваги) визначали загальну масу дослідного зразка з плівкою води M , гр.

В ході опрацювання експериментальних даних визначали:

1. Густина зрошення, кг/(м с) $\Gamma = G/H$,

де $H = 10$ см – ширина відрізка сітки.

2. Масу плівки води, кг

$M = M_{\Sigma} - M_s - M_z$, тобто від загальної маси M_{Σ} віднімали масу сухої сітки M_s та масу мірника M_z .

3. Знаючи об'єм води, визначали середню товщину плівки $\frac{M}{\rho} = f\delta$,

де $f = HB$ – площа відрізка сітки, ρ – густина води, кг/м³. Тобто, $\delta = \frac{M}{\rho f}$, м.

4. На основі рівняння нерозривності визначимо середню швидкість плівки на відрізку сітки, м/с

$$W_0 = \frac{G}{\rho H \delta}. \quad (3)$$

Ряд результатів та розрахунків наведено в таблиці 2. При цьому похибка визначення товщини плівки [11] не перевищила 10%, а маса мірника варіювалася, оскільки на ньому залишалася волога.

В результаті вимірювань та опрацювання експериментальних даних встановлено середні по відрізку сітки товщину плівки та її швидкість. Якісно схожі результати отримано на сітках з параметрами 0,63/0,25 та 0,80/0,25.

Результати вимірювань середньої товщини плівки

№ п/п	Заміряні параметри				Розраховані параметри			
	Маса мірника, M_z , г	Загальна маса, M_Σ , г	Маса сухої сітки, M_s , г	Витрата води, G , кг/год	Густина зрошення, Γ , кг/(м с)	Маса плівки води, M , г	Товщина плівки δ , мм	Сер. шв. плівки, W_0 , м/с
1	3,99	21,33	12,48	2,39	0,006625	4,86	0,32	0,0204
2	4,02	19,73	12,48	0,43	0,001184	3,23	0,22	0,0055

Далі, користуючись наведеною вище методикою, розрахуємо локальні значення швидкостей та товщини плівки, розглядаючи вже не сітку з розміром вічка та діаметром дроту сітки 0,50/0,20 мм, а потік. При цьому розглянемо потік товщиною, рівною середній товщині плівки δ при початкових значеннях швидкості W_0 , що омиває перешкоду, утворену дротинкою сітки.

Результати розрахунку

Відповідно до задач роботи досліджено вплив профілю перешкоди на параметри потоку. При цьому розглядалися чотири варіанти – профіль круглого поперечного перетину, квадратного і еліптичного – вздовж потоку ($D_{гор} / D_{верт} = 2$) та поперек потоку ($D_{гор} / D_{верт} = 1 / 2$), наведені на рис. 3.

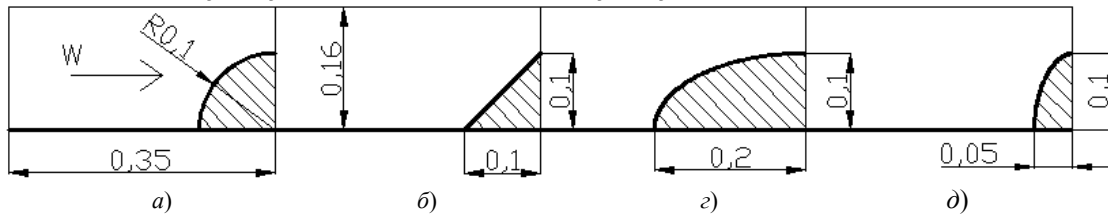


Рис. 3. Види профілів сітки, що омиваються
 а – круг; б- квадрат; с – еліпс горизонтальний (вздовж потоку);
 д – еліпс вертикальний (поперек потоку)

Незалежно від виду профілю початкова швидкість складала 20,4 мм/с, відповідно до експериментальних даних, а півтовщина плівки 0,16 мм. Результати розрахунків середньої швидкості плівки W_c , залежно від профілю, наведено на рис. 4. Середня швидкість вздовж потоку визначена на основі теореми про середнє:

$$W_c = \frac{1}{\Delta y} \int_0^y W dy \approx \frac{1}{n_y} \sum_1^{n_y} W, \tag{4}$$

де n_y – кількість розрахункових точок поперек потоку;
 W – значення локальних швидкостей в розрахункових точках поперек потоку.

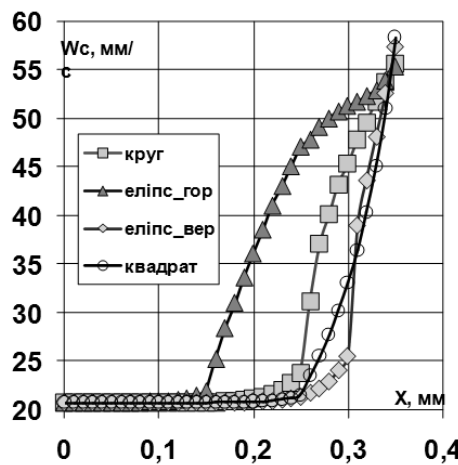


Рис. 4. Залежність середньої швидкості в потоці W_c від профілю перешкоди та поздовжньої координати X

Як видно з рисунка, початкові та кінцеві значення середніх швидкостей у всіх випадках є рівними, що обумовлено заданими граничними умовами. Проте поведінка потоку всередині дослідженої області залежить від профілю перешкоди. При цьому, чим пологішим є профіль, тим меншим є збурення потоку та, відповідно, значення середньої швидкості. Зокрема, діаметрально протилежними є розподіли швидкостей навколо горизонтального та вертикального еліпсів (г, д на рис. 3).

Для встановлення значення локальної товщини плівки звернемося до рівняння $G = W_c \rho \delta$, якщо вважати $H = 1$ м. Таким чином, отримаємо значення локальної товщини плівки δ , наведені на рис. 5.

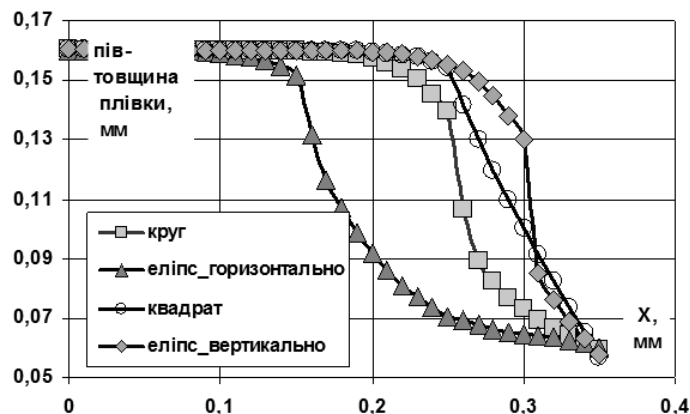


Рис. 5. Залежність локальної товщини плівки від поздовжньої координати та профілю перешкоди

Оскільки розглядається не вся плівка, а лише її половина, графік має вигляд залежності півтовщини плівки від поздовжньої координати. При цьому не враховується, що під поверхнею плівки розміщується певний профіль. Тобто, враховується лише товщина плівки як в потоці, так і над перешкодою. Оскільки над перешкодою швидкість потоку зростає, то півтовщина плівки δ відповідно до рівняння нерозривності – зменшується. Це зменшення залежить від форми перешкоди і складає від 0,32 до 0,12 мм, або на 64% залежно від профілю. З рис. 5 видно, що найтонша плівка формується над вершиною перешкоди. При цьому, якщо візуально оцінити протяжність ділянки тонкої плівки, то горизонтально та вертикально розміщені еліпси – є діаметрально протилежними досліджуваними випадками.

На наступному рис. 6 показана форма поверхні плівки при омиванні квадратного профілю. При цьому, як видно з рис. 6, форма плівки теоретично не залежить від її початкової швидкості, хоча товщина плівки зростає. Окрім цього видно, що над поверхнею перешкоди формується хвиля. Оскільки задача розв'язується незалежно від часу, хвилю слід розглядати як статичне утворення на поверхні плівки при омиванні перешкоди.

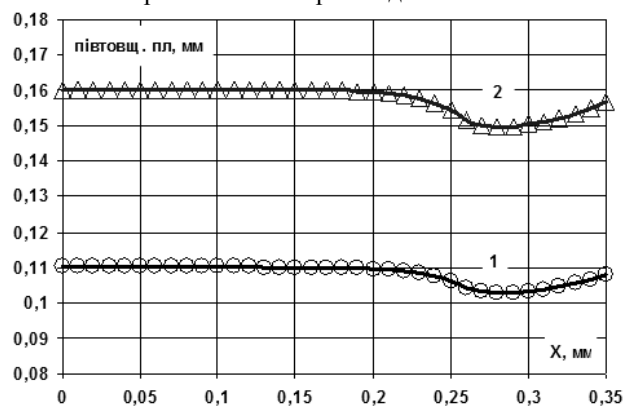


Рис. 6. Залежність локальної товщини плівки від поздовжньої координати та початкової швидкості плівки при омиванні квадрата (початкова швидкість плівки 1 – 5,5 мм/с, 2 – 20,4 мм/с)

Встановимо тепер, як вид досліджуваного профілю впливає на теплообмін в збігаючій по профілю сітки плівці при півтовщині плівки 0,16 мм та розмірах профілю 0,1/0,05. Для цього розглянемо поле локальних швидкостей, приведених до безрозмірного виду за формулою

$\bar{W} = W/W_{\max}$. Результати такого розрахунку, проведені для профілів сітки типу „г” „д”, наведено на рис. 7 та 8.

Потік рідини, рухаючись зліва направо, омиває вертикальний еліпс, чверть якого показано справа, оскільки досліджувана область задачі є симетричною по вертикалі та горизонталі.

Лінії рівня на цих рисунках є ізотами (за постійної швидкості). Як видно, в зоні перед вертикальним еліпсом швидкість мінімальна, що спричиняє зростання тиску p , відповідно до закону

Бернуллі $\frac{p}{\rho} + \frac{W^2}{2} + zg = \text{const}$. Локальне зростання тиску в рухомому потоці призводить до появи

вихорів, що відповідає турбулентному руху рідини. Тобто область, де відносна швидкість менша 0,95, є місцем зародження вихорів. З іншого боку, якщо оцінити кожен з доданків у рівнянні Бернуллі для експериментальних даних (див. табл. 2), то отримаємо $p/\rho + W^2/2 + zg \approx 100 + 2 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-3}$. Таким чином, за даних швидкостей ніякої кардинальної зміни режиму руху не відбудеться, незалежно від виду профілю.

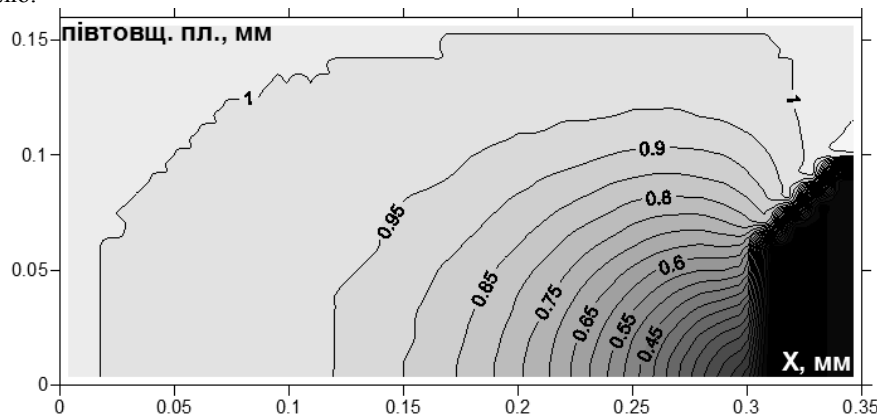


Рис. 7. Розподіл відносних швидкостей навколо вертикального еліпса

Інша річ, якщо перший та другий доданок рівняння Бернуллі будуть одного порядку, що спостерігається при швидкостях потоку $W = 2 \dots 10$ м/с. В цьому разі при русі рідини навколо перешкоди можна виділити три зони. Перед перешкодою – зона усталеного руху з практично сталими значеннями локальних швидкостей потоку. В нашому випадку (на рис. 7) відповідає області $x=0 \dots 0,12$ мм. В цьому випадку теплообмін протікає лише за рахунок передачі тепла конвекцією в плівці.

Друга зона – зона вихроутворення, перемішування рідини, безпосередньо перед перешкодою (відповідає області $x=0,12 \dots 0,32$ мм на рис. 7). В цій зоні спостерігається значна різниця швидкостей та тисків в потоці, що призводить до його турбулізації. В цій зоні теплообмін здійснюється в основному за рахунок конвективної та турбулентної складової. При чому чим більший перепад швидкостей, тим вищим буде значення турбулентної складової.

І третя – це зона усталеного руху плівки над перешкодою (область $x=0,32 \dots 0,35$ мм на рис. 7). В цій зоні турбулентні вихори затихають і потік стабілізується. Передача тепла в цій зоні відбувається, як і в першій, лише за рахунок конвекції.

Виходячи з цього, для інтенсифікації теплообміну слід мінімізувати 1 та 3 зону і збільшувати 2 – зону вихорового перемішування рідини. Тобто для виду профілю сітки, показаного на рис. 7, відстань між дротинками на просвіт (тобто, від кінця однієї дротинки і до початку іншої) має складати 0,4 мм. Для профілю „д” сітки, показаного на рис. 8, відстань між дротинками рекомендується 0,26 мм, враховуючи симетричність задачі.

При розподілі локальних швидкостей навколо горизонтального еліпса, показаного на рис. 8, також чітко простежується наявність трьох вищеописаних зон. Проте в цьому випадку друга зона – перемішування рідини, є меншою за розмірами.

Таким чином, можна встановити залежність між профілем перешкоди та розміром зони перемішування рідини. Отримані дані наведено в табл. 3.

Як видно з табл. 3, найбільшу площу вихрової зони, окрім вертикального еліпса, має квадратний профіль, розміщений поперек потоку. Дані отримано для початкової швидкості плівки 20,4 мм/с, в дужках показано значення площі вихрової зони за початкової швидкості плівки 5,5 мм/с. Відхилення цих площ не перевищує 20%, тоді як швидкість змінюється в 4 рази.

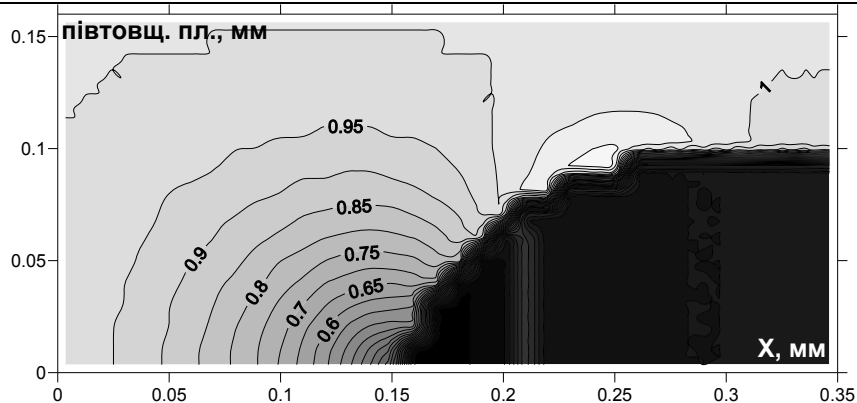


Рис. 8. Розподіл відносних швидкостей навколо горизонтального еліпса

Таблиця 3

Оцінка профілю перешкоди

Профіль	Квадрат	Еліпс вертикальний	Круг	Еліпс горизонтальний
Площа вихрової зони, умовних точок	202	201	182	132 (125)

Висновки

З проведеного дослідження можна зробити ряд висновків.

1. Похибка чисельного розрахунку ідеальної рідини порівняно з аналітичним розрахунком Жуковського [2] складає 13,9 %.
2. Розглянуто 4 види перешкод потоку рідини – круг, квадрат, еліпс горизонтально та еліпс вертикально. Розраховано, що профіль плівки при омиванні перешкоди залежить від виду перешкоди. Встановлено, що максимальне звуження плівки спостерігається на вершині профілю перешкоди. При цьому півтовщина плівки в зоні перед перешкодою зменшується від 0,16 до 0,06 мм, що відповідає перекриттю потоку.
3. Також встановлено, що профіль плівки при омиванні перешкоди не залежить від її початкової швидкості W , а зростання W з 5,5 до 20,4 мм/с призводить лише до потовщення плівки від 0,11 до 0,16 мм.
4. При русі рідини навколо перешкоди встановлено три зони руху - зона усталеного руху перед перешкодою, зона перемішування рідини безпосередньо перед перешкодою і зона усталеного руху плівки над перешкодою. Виходячи з того, що вихрові потоки в плівці можуть виникнути лише в другій зоні – слід збільшувати її площу та зменшувати зони 1 і 3, що призводить до інтенсифікації перемішування рідини та зростання інтенсивності теплообміну.
5. На основі зональності руху рідини встановлено рекомендовані значення відстаней між перешкодами. Зокрема, для профілю перешкоди типу „горизонтальний еліпс”, показаного на рис. 7, відстань між дротинками на просвіт (тобто, від кінця однієї дротинки і до початку іншої) має складати 0,4 мм. Для профілю перешкоди „вертикальний еліпс”, показаного на рис.8, відстань між дротинками рекомендується 0,26 мм.
6. Найбільші зони перемішування рідини перед перешкодою мають два види профілів – квадрат та вертикальний еліпс, що видно в табл. 3.

Література

1. Василенко С. М., Українець А. І., Олішевський В. В. Основи тепломасообміну: Підручник - К.: НУХТ, 2004. - 250 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1987. – 840 с.
3. Баранов П.А., Жданов В.Л., Судаков А.Г. Численный анализ нестационарного обтекания цилиндра с внесением в ближний след наведенной завихренности. – Минск, Изд. НАН Бел. 1998.- 35 с.
4. Расчет влияния числа Рейнольдса на сопротивление и теплоотдачу цилиндра и эллипсоида в круглом несжимаемом потоке /Л.Е. Пицък, Л.Л. Пицък //Вісник Дніпропетровського університету, серія Ракетно-космічна техніка - 2008, № 12. - С. 45-56.
5. Численное моделирование турбулентного обтекания цилиндра при докритических числах Рейнольдса /А.К. Травин // Вестник молодых ученых – 1997, №4. - С. 62- 70.

6. Обтекание кругового цилиндра над линией раздела двухслойной жидкости при наличии крышки и дна /К.В. Кириллин, С.И. Филиппов // Известия КГАСУ. Сер. Естественные науки – 2006, №2(6).- С. 116-120.
7. Распределение статического давления и гидродинамического сопротивления в плоском канале с полуцилиндрическими коридорно расположенными выступами /Величко В.И., Пронин В.А. //ИЖФ – 1987. - Т. 53, №4. - С. 540-544.
8. Задача о движении круглого цилиндра под свободной поверхностью тяжелой жидкости / Г.Г.Тумашев, Н.Д. Черепин// Казанский гос. университет. Труды семинара по краевым задачам. Вып. 10, 1973. - С. 140-151.
9. Яблонский С. Краткий курс технической гидромеханики – М: ГИ Физ-Мат Лит., 1961. – 355 с.
10. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов – М: Мир, 1979. -389 с.
11. Гідродинаміка плівки на сітчастій структурі/ Дикий М.О., Кузьменко І.М., Туз В.О., Лебедь Н.Л.// Промислова теплотехніка – 2005.- Т. 24, № 4. - С. 23-27.