УДК 66.045.14
DOI

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТЕЙ У ПЛІВКОВИХ АПАРАТАХ

Кузьменко І.М., к.т.н., доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ

Анотація. В роботі розглянуто вертикальний канал регулярної насадки для плівкового апарату з зустрічним рухом газового потоку. На основі рівняння Нав'є-Стокса сформульовано математичну задачу руху гравітаційної плівки за зустрічного руху газового потоку. Задачу розглянуто для стаціонарного руху потоків у нескінченному вертикальному каналі круглого поперечного перерізу за умови ламінарного руху гладкої плівки, рівності дотичної напруги на межі поділу фаз, та умови прилипання на твердій поверхні. Дана математична задача розв'язана аналітично, наведені результати розв'язку дозволяють обрахувати локальні швидкості руху гравітаційної плівки та зустрічного руху газового потоку. Для експериментальної перевірки цих результатів зібрано експериментальний стенд, робоча ділянка якого (труба в трубі) має висоту 1 м і діаметри внутрішній/зовнішній 17/36 мм. Тестування експериментального стенду полягало у визначенні товщини гравітаційної плівки, яка порівнювалася з формулою Нуссельта. Точність тестових дослідів на експериментальному стенді - до 15%. Проведено кілька серій експериментів за умови ламінарно-хвильового режиму руху плівки і ламінарного руху повітря $Re_{плівки} / Re_{повітря} = 200/2150$. Відхилення експериментальних результатів для локальних швидкостей руху фаз від результатів розв'язку математичної задачі зростає з ростом швидкостей фаз і складає 19-30 % за ламінарно-хвильового режиму руху плівки в вертикальному каналі контактного апарату.

Ключові слова: канал, локальна швидкість, гравітаційна плівка, рівняння Нав'є-Стокса.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF VELOCITIES DETERMINATION METHOD IN FALLING-FILM APPARATUS

Kuzmenko I.M., Ph.D., docent., «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Abstract. The paper considers the vertical channel of a regular packing for a falling-film apparatus with a countercurrent gas flow. The mathematical problem of the motion of a gravitational film with a countercurrent gas flow is formulated on the basis of the Navier Stokes equation. The mathematical problem includes, the steady flows in the vertical channel of a circular cross-section, a laminar motion of a smooth film is considered, which include the equality of tangential stresses on the boundary between the phase, the condition of adhesion on a solid surface. This mathematical problem is solved analytically, the given solution results allow us to estimate the local velocities of the falling-film and a countercurrent gas flow. An experimental stand with working channel was used for the experimental verification of mathematical results. The working channel like a double pipe has a height of 1 m and internal / external tube diameters of 17/36 mm. A test experiment determines the thickness of the falling-film and compares this to the Nusselt formula. Accuracy of test experiments on an experimental stand - up to 15%. Several series of experiments were carried out under the condition of the laminar-wave regime of falling-film and the laminar motion of air $Re_{film} / Re_{air} = 200/2150$. The deviation of the experimental results for the local velocities of the phases from the results of the solution of the mathematical problem increases with the growth of phase velocities and makes up 19-30% for the laminar-wave mode of motion of the film in the vertical channel of the contact apparatus. The proposed solution of mathematical problem determines the local velocities in the vertical coaxial channel of the falling-film apparatus and allows to provide high accuracy of local velocity calculation at the laminar air movement.

Keywords: channel, local velocity, gravitational film, Navier-Stokes equation

Вступ В харчовій промисловості широко застосовуються контактні апарати різного типу – скрубери, градирні, контактні економайзери. За відсутності поділяючої стінки між теплоносіями, процеси тепло- масообміну в таких апаратах мають вищу інтенсивність, порівняно з рекуперативними теплообмінними апаратами. Однак, сумісне протікання процесів тепло- масообміну ускладнює задачу розрахунку температур та концентрацій в таких апаратах. В свою чергу, їх розрахунок базується на швидкостях теплоносіїв на вході та виході, а також, для точного розрахунку, встановленні локальних значень швидкостей теплоносіїв в контактних апаратах. В даній роботі розроблена та перевірена методика визначення локальних швидкостей у поперечному перетині вертикального каналу плівкового контактного апарату, що працює в режимі протитoku. Дана методика може використовуватися для обрахунку локальних швидкостей в вертикальному каналі кон-

тактного теплообмінного апарату при стиканні гравітаційної ламінарної, або близької до неї, плівки рідини за зустрічного руху газового потоку.

Актуальність проблеми та огляд останніх досліджень та публікацій. В літературі [1-2] локальні швидкості в області „гравітаційна плівка рідини-зустрічний газовий потік у вертикальному каналі” визначаються за сталого гідродинамічного режиму, який включає експериментальне визначення витрат води та газу без урахування дотичної напруги на межі поділу теплоносіїв. Однак, цей спосіб не придатний для визначення локальних швидкостей поблизу поверхні контакту теплоносіїв в вертикальному каналі, оскільки на цю поверхню діє сила тертя потоку газу. Існує ряд способів [3-4] врахувати дію сили тертя на поверхню плівки, однак, вони базуються на феноменологічних результатах, що справедливі лише за певних умов.

В ряді робіт [5-7] наведено чисельний обрахунок стаціонарного поля швидкостей в двовимірній постановці. Система диференціальних рівнянь включає рівняння нерозривності та Нав'є-Стокса і описує супутній рух плівки рідини і потоку газу в вертикальному каналі контактного апарату. Однак, даний спосіб не має точного розв'язку і придатний лише для тільки для чисельного розрахунку локальних швидкостей у вертикальному каналі контактного апарату за сумісного руху плівки рідини та газового потоку вниз, або в каналі, розміщеному під кутом [8] за підйомного руху потоку газу.

Аналіз сучасної наукової літератури показує, що відомі методики або не враховують існування плівки, або не забезпечують точний розв'язок і визначення локальної швидкості за умови руху плівки і зустрічного газового потоку в вертикальному каналі.

Метою даного дослідження є вдосконалення методики визначення локальних швидкостей в вертикальному каналі контактного апарату. Для досягнення цієї мети послідовно вирішено ряд задач: задача аналітичного обрахунку локальних швидкостей в поперечному перетині вертикального каналу за стаціонарного режиму руху теплоносіїв; задача проведення експериментальних досліджень; задача верифікації результатів аналітичного обрахунку з результатами експериментальних досліджень.

Матеріали та методи досліджень. Розглянемо область „гравітаційна плівка рідини та зустрічний газовий потік у вертикальному каналі”, де вертикальний канал має конструкцію – труба в трубі. В частині каналу від R_1 до R_0 рухається в'язкий нестисливий газ, а на зовнішній поверхні меншої труби гравітаційно збігає плівка, товщиною H . Задачу розглянемо в циліндричних координатах. Координату z направимо у напрямку руху газу і розмістимо в центрі труби, а координату r – перпендикулярно до z . Приймемо, що рух в каналі є ламінарним і вісесиметричним.

На рис.1 показано умовне зображення області „гравітаційна плівка рідини-зустрічний газовий потік у вертикальному каналі” де канал має вигляд труба в трубі.

Рисунок 1. Геометрія задачі – область „гравітаційна плівка рідини та зустрічний газовий потік у вертикальному коаксіальному каналі”, R_1 – радіус внутрішньої труби з плівкою, H – товщина плівки, R_0 – радіус зовнішньої труби, U_1 – швидкість плівки води, U_2 – швидкість потоку газу.

Рух двофазного потоку в'язкого нестисливого газу і рідини в циліндричній системі координат для вісесиметричної течії в нескінченному каналі, сформованому коаксіальними трубами постійного перетину (рис.1) описується системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, яка в наближенні $\rho_1 \gg \rho_2$ має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\mu_1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du_1}{dr} \right) = \rho_1 g + \frac{dP}{dy}, & R_1 - H \leq r \leq R_1, \\ \frac{\mu_2}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du_2}{dr} \right) = \frac{dP}{dy}, & R_1 \leq r \leq R_0, \end{cases} \quad (1)$$

де:

μ_1, μ_2 – коефіцієнти динамічної в'язкості плівки рідини і газу, відповідно, ρ_1, ρ_2 – густини плівки рідини і газу, відповідно, H – товщина плівки рідини, g – прискорення вільного падіння, dP/dy – градієнт тиску, прикладений до ділянки вертикального каналу, R_0 – радіус вертикального каналу, R_1 – радіус межі поділу фаз «гравітаційна плівка рідини-зустрічний газовий потік у вертикальному каналі».

З граничними умовами:

$$u_1(R_1 - H) = 0, \quad u_2(R_0) = 0 \quad (2)$$

$$u_1(R_1) = u_2(R_1), \quad \mu_1 \frac{du_1}{dr} \Big|_{r=R_1} = \mu_2 \frac{du_2}{dr} \Big|_{r=R_1} \quad (3)$$

Граничні умови (2) характеризують прилипання плівки рідини та газового потоку до твердої поверхні, граничні умови (3) – є умовою спряження полів швидкостей і дотичних напружень на поверхні розділу гравітаційної плівки і газового потоку.

Крайова задача (1-3) дозволяє отримати значення локальних швидкостей для області „гравітаційна плівка рідини-зустрічний газовий потік у вертикальному каналі” у вигляді системи рівнянь (4). З аналітичного розв’язку системи рівнянь (4) з урахуванням (5) видно, що значення локальних швидкостей залежать від градієнта тиску, товщини гравітаційно стікаючої плівки рідини, геометрії каналу та теплофізичних характеристик теплоносіїв.

$$\begin{cases} u_1 = \frac{\rho_1 g}{4\mu_1} [r^2 - (R_1 - H)^2] + \frac{1}{4\mu_1} \frac{dP}{dy} [r^2 - (R_1 - H)^2] + A \ln \left(\frac{r}{R_1 - H} \right), & R_1 - H \leq r \leq R_1, \\ u_2 = \frac{1}{4\mu_2} \frac{dP}{dy} (r^2 - R_0^2) + \ln \left(\frac{r}{R_0} \right) \left[\frac{\rho_1 g R_1 R_2}{2\mu_2} + (R_1 - R_2) \frac{dP}{dy} \frac{R_2}{2\mu_2} + A \frac{\mu_1 R_2}{\mu_2 R_1} \right], & R_1 \leq r \leq R_0, \end{cases} \quad (4)$$

де

$$\begin{aligned} A = & \frac{1}{\ln \left(\frac{R_1}{R_1 - H} \right) - \ln \left(\frac{R_2}{R_0} \right)} \left(\frac{\rho_1 g}{4\mu_1} \left(R_1^2 - (R_1 - H)^2 \right) + \frac{1}{4\mu_1} \frac{dP}{dy} \left(R_1^2 - (R_1 - H)^2 \right) - \frac{1}{4\mu_2} \frac{dP}{dy} (R_2^2 - R_0^2) - \right. \\ & \left. - \ln \left(\frac{R_2}{R_0} \right) \frac{\rho_1 g R_1 R_2}{2\mu_2} - \ln \left(\frac{R_2}{R_0} \right) (R_1 - R_2) \frac{dP}{dy} \frac{R_2}{2\mu_2} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Результати досліджень. Для розрахунку локальних швидкостей теплоносіїв в області „гравітаційна плівка рідини-зустрічний газовий потік у вертикальному коаксіальному каналі” система рівнянь (4-5) крім геометрії каналу та теплофізичних характеристик теплоносіїв, потребує значення товщини гравітаційно стікаючої плівки рідини та перепаду тиску на вході та виході з вертикального каналу типу труба-в-трубі. Тому задачею дослідження на даному етапі було експериментальне визначення значення товщини гравітаційно стікаючої плівки рідини та перепаду тиску на вході та виході з вертикального каналу

Відповідно до задачі, на даному етапі було зібрано експериментальний стенд, показаний на рис. 2. Основним елементом стенду є робоча ділянка, яка є вертикальним коаксіальним каналом типу труба в трубі з сіткою, що приварена до зовнішньої поверхні меншої труби, або з гладкими стінками. Експериментальні дослідження проводилися в умовах зустрічного руху гравітаційно збігаючої плівки води та зустрічного потоку повітря. Робота стенду в заданому діапазоні температур і витрат забезпечувалася магістралями підготовки і подачі повітря і води. Для регулювання температур води та повітря використовувалися електронагрівачі. Повітряна магістраль включала повітродувку ЕЛПРОМ-ЛовЕ4- 380W (15), ротаметр типу РС-7 (3) із різними діапазонами шкали вимірювання і електронагрівач повітря. Повітродувка подавала до 0,8 м³/хв повітря з тиском до 400 мм вод.ст. Витрата повітря задавалася регульовальними вентилями (2) і контролювалася за показами відповідних ротаметрів, а надлишок відводився в атмосферу. Потужність нагрівача встановлювалася за допомогою регулятора напруги РНО-250/2 (4) і контролювалася за показами мультиметра DT-830В.

Для вимірювання перепаду тиску у фланці внизу робочої ділянки робився отвір діаметром 0,8 мм і приварювалася імпульсна трубка з краплезбірником, що приєднувалася до мікроманометра типу ММН-240. Зовнішня скляна труба робочої ділянки за рахунок сальникових ущільнень нерухомо закріплювалася між фланцями з верхньою та нижньою імпульсними трубками. Для спрощення монтажу магістралі, що подають теплоносії до робочої ділянки стенду виконані зі стандартних труб, щільно скріплених між собою. Тобто, магістраль подачі повітря включала можливість регулювання витрати/температури повітря і їх контроль.

Іншим теплоносієм була водопровідна вода, що подавалася через запірний вентиль, на схемі не зазначений. Її витрата встановлювалася регульовальним вентилем (8) і контролювалася ротаметром типу РС-3 (7). Далі вода проходила електронагрівач (5) напруга на який подавалася регулятором напруги РНО - 250/2. Потужність останнього контролювалася за показами мультиметра DT-830В. Після цього вода з заданими витратою і температурою надходила в робочу ділянку.

Робоча ділянка мала робочу висоту $H = 1$ м, або 1,16 м – включно з фланцями для кріплення. Вода після електропідігрівача рівномірно розподілялася по зовнішньому периметру труби, завдяки конструкції зрошувача рідини переливного типу. Поверхнею для збігання плівки води в першому випадку є труба з нержавіючої сталі X18H10T Ø16 мм з поверхнею, обробленою механічно, з шорсткістю до 50Е-6 м. Значення шорсткості встановлювалося візуальним порівнянням (із 20-кратним збільшенням) з еталонною шорсткістю, утвореною наждачним папером відомої зернистості. Перед проведенням експериментів для

збільшення адгезії, протягом 50-100 годин труба вимочувалася в водяній бані.

Другим типом поверхні для збігання плівки води в робочій ділянці була труба з нержавіючої сталі X18H10T Ø16 мм з поверхнею, на яку способом контактного зварювання прикріплена нержавіюча сітка з розміром вічка 0,56x0,56 мм. Ширина сітки підбиралась так, щоб в місці зварювання її краї лежали впритул. Перед проведенням дослідів робоча ділянка з привареною сіткою знежирювалась. Для збору плівки рідини після проходження нею робочої ділянки використано збірник рідини особливої конструкції, що створював мінімум перешкод проході газового потоку. Плівка рідини потрапляла в збірник і з нього через гідрозатор виводилася в дренаж. Робоча ділянка зі зрошувачем та збірником рідини нерухомо монтувалася всередині скляної труби, внутрішнім діаметром 37Е-3 м. Для ущільнення місць контакту скляної труби та металевої поверхні фланців, які її тримають, застосовано сальники. Повітряний потік після електронагрівача (3) з відповідною температурою, яка контролювалась термопарою, потрапляв у робочу ділянку. Після повного монтажу всієї робочої ділянки проводилася перевірка її вертикальності. Температура повітря за робочою ділянкою вимірювалася термопарою, яка закріплювалася усередині потоку за сітчастим захисним екраном. Визначення температури води на вході/виході в робочу ділянку проводилося перед зрошувачем та на виході з робочої ділянки. Для визначення температури застосовувалися хромель-алюмелеві термопари із діаметром королька 0,5 мм.

У процесі досліджень вимірювалися:

1. Температура і вологість навколишнього повітря. Для цього застосовувалися два лабораторних термометри зі шкалою 0...50 °С і ціною поділки 0,1 °С. Кулька одного з термометрів оберталася гігроскопічним матеріалом і змочувалася водою.
2. Витрата води і повітря за ротаметрами, типу РС-3 та РС-5, відповідно. Ротаметри мали індивідуальні тарувальні залежності.
3. Температура плівки води на вході/виході та повітря на виході (датчиками температури є хромель-алюмелеві термопари з діаметром королька 0.5 мм).
4. Перепад тиску на робочій ділянці за допомогою диференційного мікроманометру з похилою трубкою ММН-240. Похила трубка встановлювалася з мінімальним кутом нахилу, що дозволяло вимірюватися низькі перепади тиску.

Перед проведенням досліджень проводили тестування експериментального стенду за умови гравітаційного збігання плівки для кількох значень витрати води і відсутності потоку повітря. Отримані результати порівнювалися з відомою аналітичною залежністю швидкості плівки від її товщини за умови гравітаційного збігання плівки.

Тестування проведено за температури плівки води 10 - 20 °С, Re плівки води = 138 - 308 при збіганні плівки води в гладкому коаксіальному каналі. Встановлено, що експериментальні дані за збігання плівки води в гладкому коаксіальному каналі з відхиленням до 15 % відповідають аналі-

Рис.2. Схема експериментального стенду з робочою ділянкою (1, 8 – регульовальні вентилі; 2 – повітряний ротаметр РС-7; 3, 5 – електронагрівачі; 4 – робоча ділянка; 6 – термопари; 7 – водяний ротаметр РС-3).

чень витрати води і відсутності потоку повітря. Отримані результати порівнювалися з відомою аналітичною залежністю швидкості плівки від її товщини за умови гравітаційного збігання плівки.

Тестування проведено за температури плівки води 10 - 20 °С, Re плівки води = 138 - 308 при збіганні плівки води в гладкому коаксіальному каналі. Встановлено, що експериментальні дані за збігання плівки води в гладкому коаксіальному каналі з відхиленням до 15 % відповідають аналі-

тичний залежності, а товщина плівки складає $(0.19 - 0.42) \cdot 10^{-3}$ м.

Методика проведення експерименту полягала в наступному. У процесі досліджень задавалася витрата і температура води, а надалі методом відсікання визначалася товщина плівки. В подальшому проводилося дискретне збільшення витрати води і заміри повторювалися в усьому дослідженому діапазоні витрат води. Серія дослідів полягала у варіюванні витрати повітря за сталої витрати води. Методика проведення полягала в наступному: задавалася витрата води і її температура, потім задавалася витрата повітря і знімалися покази РС-5, РС-7 та ММН-240. Надалі методом відсікання визначалася товщина плівки (подача повітря при цьому перекривалася) і на наступному кроці проводилося дискретне збільшення витрати повітря (для певної сталої витрати води) та повторювалися заміри в усьому дослідженому діапазоні витрат повітря.

Після цього робоча ділянка замінювалася на коаксіальний канал з гладкими стінками і досліди повторювалися.

Обговорення результатів досліджень. В результаті, на основі дослідних даних визначено та обраховано наступні параметри: товщину гравітаційно збігаючої плівки води, середні швидкості теплоносіїв та перепад тисків у вертикальному каналі контактного апарату.

Ці параметри дають змогу обрахувати за системою рівнянь (6-7) значення локальних швидкостей теплоносіїв та визначити їх середні швидкості. В табл. 1 наведена верифікація обрахованих за системою рівнянь (6-7) середніх швидкостей теплоносіїв з дослідними даними.

Таблиця 1

Верифікація швидкостей

N	W пов експ, м/с	$W_{\text{пов розрах}}$, м/с	Re пов	W пл експ, м/с	Re пл	Відхилення, % $I - W_{\text{пов експ}} / W_{\text{пов розрах}}$
1	1,77	2,19	2150	2,544	200	19,06
2	2,45	3,50	3000	2,539	190	29,9

Розрахунки приведені для вертикального коаксіального каналу типу труба в трубі, висотою 1,17 м і внутрішнім/зовнішнім діаметром 17×36 мм для сталих температур води/повітря 12/14 °С, відповідно. При цьому, відносне відхилення розрахунку середніх швидкостей за запропонованим способом від визначених експериментально складає до 19,1 % для ламінарного режиму руху повітряного потоку (число Рейнольдса $Re = 2054 < 2300$), що забезпечить задовільну точність визначення локальних швидкостей в контактному апараті.

Висновки

У роботі наведено вдосконалену методику визначення локальних швидкостей в вертикальному каналі контактного апарату. Методика ґрунтується на аналітичних результатах для розрахунку локальних швидкостей теплоносіїв, записаних для випадку вертикального каналу, типу труба в трубі. Для верифікації аналітичних результатів зібрано дослідний стенд з робочою ділянкою, висотою 1,17 м тестові дослідження пройдені на стенді з відхиленням до 15%. Верифікація отриманих дослідних результатів з аналітичними дає відхилення до 19,1% для ламінарного режиму руху повітря.

Запропонована методика визначення локальних швидкостей в вертикальному каналі контактного апарату дозволяє забезпечити високу точність обрахунку локальної швидкості за ламінарного режиму руху повітряного потоку всередині каналу, сформованого системою коаксіальних нескінченних труб постійного кругового поперечного перетину.

References.

1. Hall Taylor, N.S., Hewitt, I.J., Ockendon, J.R., Witelski, T.P. (2014). A new model for disturbance waves, International Journal of Multiphase Flow, 66, 38–45.
2. Brennen, C.E. (2005). Fundamentals of Multiphase Flow. NY.: Cambridge University Press, 317.
3. Vasylenko, S.M., Ukrayinets, A.I., Olishevskyy, V.V. (2004). Osnovy teplomasoobminu. K.: NUKHT, 250.
4. Klyuyev, N.I., Solovyova E.A. (2010). Matematychni modeli dvofaznykh techiy. Samara: Sam. Universitet., 51.
5. Nigmatulin, R.I. (1987). Dinamika mnogofaznykh sred. Part 2. M.: Nauka, 360.
6. Feddaoui, M., Belahmidi, E.M., Mir, A., Bendou, A. (2001). Numerical study of the evaporative cooling of liquid film in laminar mixed convection tube flows, Int. Journal of Thermal Sciences, 40, 11, 1011-1020.
7. Alla, A.N., Feddaoui, M., Meftah, H. (2018). Comparison of two configurations to improve heat and mass transfer in evaporating two-component liquid film flow, Int. Journal of Thermal Science, 126, 194-204.
8. Oulaid, O., Benhamou, B., Galanis, N. (2012). Simultaneous Heat and Mass Transfer in Inclined Channel with Asymmetrical Conditions, Journal of Applied Fluid Mechanics, 5, 3, 53-62.

Отримано в редакцію: 09.04.2019

Received: 09.04.2019

Прийнято до друку: 12.06.2018

Approved: 12.06.2018