

УДК: 532.5.032

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТИТОКУ В ПЛІВКОВИХ КОНТАКТНИХ АПАРАТАХ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ГІДРОДИНАМІКИ

Кузьменко І.М., канд. техн. наук

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.3>

Двовимірна математична модель протитокового ламінарного руху стікаючої плівки води та потоку повітря в вертикальному каналі контактного апарату, яка розв'язана в пакеті COMSOL MULTIPHYSICS 5.6 показала існування супутніх підйомних потоків на межі поділу води та повітря, що залежить від їх витрат та висоти вертикального каналу.

Двухмерная математическая модель противотокового ламинарного движения стекающей пленки воды и потока воздуха в вертикальном канале контактного аппарата, которая решена в пакете COMSOL MULTIPHYSICS 5.6, показала существование сопутствующих подъемных потоков на границе разделения воды и воздуха, что зависит от их расходов и высоты вертикального канала.

The two-dimensional mathematical model of countercurrent laminar motion of water flow and air flow in the vertical channel of the contact apparatus, solved in the package COMSOL MULTIPHYSICS 5.6 showed the existence of concomitant movement at the water-air interface, depending on their flow and vertical channel height.

Бібл. 11, рис. 8.

Ключові слова: модель, контактний апарат, канал, протитік, плівка, режим руху.

ρ – густина відповідного потоку кг/м^3 ;
 W – швидкість відповідного потоку кг/м^3 ;
 P – тиск, Па;
 K – тензор в'язких напружень, Па
 I – тензор тотожності;
 F – вектор об'ємної сили Н/м^3 ;

μ – динамічна в'язкість Па с;
 H – висота каналу, м;
 Re – критерій Рейнольдса;
 T – турбулентна складова;
 f – плівка;
 air – повітря.

Актуальність роботи. Режим руху в контактних апаратах є одним з факторів впливу на інтенсифікацію процесів теплообміну в них. Тому задача обрахунку швидкостей, зокрема локальних, які визначають інтенсифікацію процесів теплообміну, є важливою та актуальною. Цій задачі присвячено цілий ряд робіт. В [1-2] обрахунок локальних швидкостей в каналі базується на експериментальних значеннях сили тертя на межі розділу фаз, що є недоліком цих робіт. В [3-4] наведено 2D модель для визначення стаціонарного поля швидкостей, що включає рівняння нерозривності та Нав'є-Стокса і описує супутній рух плівки рідини і потоку газу в вертикальному каналі. Однак, автори розраховували лише локальні швидкості за сумісного руху плівки рідини та газового потоку вниз, або в каналі, розміщеному під кутом [5] за підйомного руху потоку газу.

В [6] описано 3D модель з використанням методу об'ємів у рідині (VOF), однак лише для бульбашкового та снарядного режимів руху двофазного потоку в вертикальному каналі.

В [7] для моделювання переходу між режимами в кільцевому горизонтальному каналі використано як комерційний пакет для моделювання динаміки рідин так і штучну нейронну мережу. При моделюванні динаміки рідини з використанням комерційного пакету система рівнянь використовувала VOF метод та підтверджувалася експериментальними даними по перепаду тиску, отриманими авторами. Однак авторами не розглянуто поле швидкостей, зокрема поблизу плівки.

В роботі [8] розглянуто моделювання динаміки рідини та тепломасообміну в турбулентному водомасляному потоці, що рухається в бульбашковому режимі в горизонтальному каналі з використанням комерційного пакету. Автори вказують, що відхилення коефіцієнту теплообміну в моделі від експерименту складає 6%, однак кільцевий потік не розглядався.

Ряд експериментальних робіт описує характеристики плівки в кільцевому потоці. В [9] встановлено вплив швидкостей плівки води та повітря на частоту і амплітуду хвиль в вертикальному кільцевому каналі. Експериментально встановлено, що зростання товщини

плівки збільшує амплітуду хвиль. В [10] експериментально визначено, що висота хвиль у вертикальному кільцевому каналі зростає з ростом числа Re повітря і на основі цього проведено верифікацію поданої нижче моделі.

Метою дослідження, виходячи з розглянутих вище робіт, є вивчення режимів руху шару на межі розділу фаз за протитокового руху фаз теплоносіїв - плівка рідини/потік повітря і встановлено напрямку руху фаз на межі їх розділу, що дозволить інтенсифікувати теплообмін в плівкових контактних апаратах.

В даній роботі розглянуто кільцеву течію (відповідно до карти режимів у каналі [11]) за протиточного руху у вертикальному кільцевому каналі, типу труба в трубі.

Опис моделі та її розв'язок

Постановка стаціонарної задачі включає систему рівнянь Нав'є-Стокса та нерозривності з урахуванням направленості сили тяжіння, рівняння записані для кожної з фаз. Систему рівнянь представлено в двовимірній постановці в циліндричних координатах.

$$\begin{cases} \rho(W \cdot \nabla)W = \nabla \cdot (pI + K) + F \\ \rho \nabla \cdot W = 0 \end{cases}, \text{ де}$$

$$K = \mu(\nabla W + (\nabla W)^T) = \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot W)I$$

Граничні умови на межі фаз та поблизу стінки визначалися умовою прилипання, на межі поділу фаз додавалася умова рівності сил тертя. на вході в канал задавалися значення швидкостей, для не усталеного потоку і на виході з каналу задавалися значення тиску, рівне атмосферному. Враховано вплив сили тяжіння на потоки.

Початкова об'ємна частка води в повітрі в усіх випадках прийнята рівною нулеві.

На рисунку 1 зліва показано геометрію коаксіального каналу. Внутрішня труба має радіус 8,25 мм і по її зовнішній поверхні під дією сили тяжіння збігає плівка води, товщиною 0,25 мм. Радіус зовнішньої труби 18 мм. Потік повітря підіймається знизу-вверх у коаксіальному каналі.

Задача розв'язувалася в комерційному пакеті COMSOL MULTIPHYSICS 5.6 методом скінченних елементів розмір триангуляційної сітки складав від 0,14 мм до 0,7 мм, згущення сітки проводилося в зоні стикання плівки та поблизу стінки каналу. На рисунку 1 справа показано геометрію триангуляційної сітки на межі між плівкою води та потоком повітря.

В ході ітераційних обчислень визначалися тиск, швидкість та її радіальна компонента та компонента по осі Z. Обчислення зупинялися коли розбіжність цих параметрів у послідовних ітераціях не перевищувала 10⁻³.

Для верифікації обчислень обраховано параметри моделі за прямооточного руху плівки води та потоку повітря. Якісно підтверджено, що зростання швидкості повітря та плівки зменшує амплітуду хвиль, як описано в [9-10].

Результати моделювання та їх аналіз

На рис. 2-10 показано результати моделювання у вигляді графіків залежності швидкості потоків на межі поділу фаз та радіальної швидкості від висоти каналу.

Моделювання виконано за наступних параметрів: процес адіабатний з температурою 20 °С, і швидкості фаз наступні – повітря 1,7 м/с в нерозвиненому потоці на

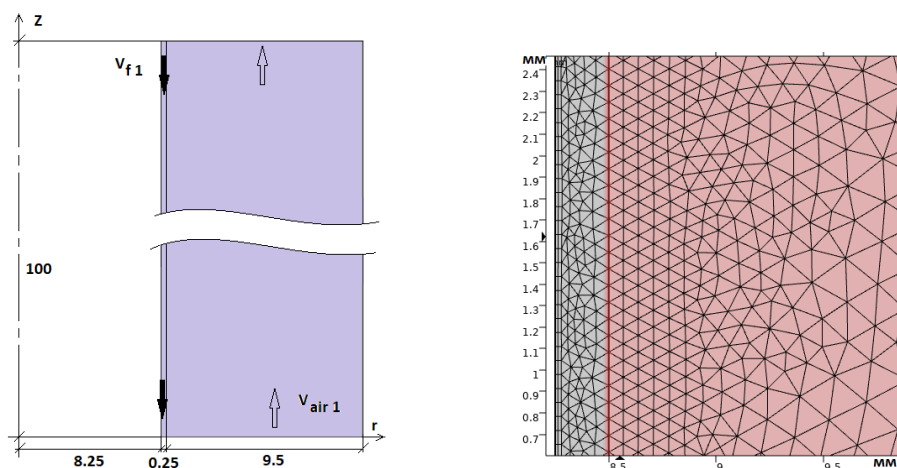


Рисунок 1. Геометричні параметри каналу (в мм) та триангуляційна сітка

вході знизу в канал, та плівка води 0,7 м/с в нерозвиненому потоці на вході зверху в канал. Потоки плівки води та повітря рухаються протитоком без поділяючої стінки. Власне коаксіальний канал типу труба в трубі, має наступну геометрію: висота $H=100$ мм, діаметри труб – меншої 17 і більшої 36 мм. По внутрішній стінці меншої труби збігає плівка води, товщиною 0,25 мм. В ході моделювання встановлено вплив на швидкість на межі поділу фаз наступних параметрів швидкості повітря W_{air} , швидкості плівки води, висоти коаксіального каналу H , товщини плівки води δ . В ході моделювання не встановлено впливу зміни діаметра меншого каналу в діапазоні 10-50 мм та діаметру більшого каналу в діапазоні 20-36 мм. Наведені результати отримано для плівки води, що стікає по внутрішній поверхні меншої труби. У випадку коли плівка стікає по внутрішній поверхні більшої труби результати – аналогічні.

З рисунків 2-10 видно, що не залежно від значень параметрів на вході та геометрії каналу, за висотою коаксіальний канал можна розділити на три зони. Як ознака подільності каналу на зони розглядається направленість швидкості на міжфазній поверхні – повітря-плівка води. Розглянемо рисунок 2, де зображено значення швидкості на міжфазній поверхні від висоти каналу. Значення висоти «0» відповідає входу повітря і, відповідно до граничних умов, швидкість на міжфазній поверхні поблизу плівки відповідає швидкості повітря на вході складає 1,7 м/с. До висоти $H=23$ мм швидкість на міжфазній поверхні поблизу плівки зменшується, але є більшою нуля. Це означає, що швидкість на міжфазній поверхні в режимі протитоку фаз не рівна нулеві і частина плівки води має швидкість більшу нуля, тобто частина стікаючої плівки в каналі рухається співнаправлено потоку повітря (перша зона). Окрім цього ця частина стікаючої плівки в каналі, що рухається співнаправлено

потоку повітря, зменшується з висотою каналу і за висоти $H=23$ мм (в даному випадку) - вироджується.

В другій зоні каналу, за висоти $H=23\ldots80$ мм (для швидкості плівки $W_f=1,1$ м/с) швидкість на міжфазній поверхні рівна нулеві і вся плівка збігає вниз, а весь потік повітря рухається вгору. В подальшому, в третій зоні каналу, за висоти $H=80\ldots100$ (для швидкості плівки $W_f=1,1$ м/с) ситуація на міжфазній поверхні змінюється. Як видно з рисунка 2, швидкість на міжфазній стає від'ємною, тобто – направленою проти осі Z , та зростає за модулем до значення швидкості плівки води 0,7 м/с. В цій, третій зоні каналу, рух частини потоку повітря співнаправлений направленою вниз збіганню плівки води. Аналогічна ситуація спостерігається і за інших швидкостей плівки води на вході в канал.

На рисунку 3 показано епюру швидкості поблизу межі поділу фаз, залежно від швидкості плівки води в діапазоні $W_f=0,3\ldots1,1$ м/с за товщини плівки 0,25 мм ($Re_f=60\ldots210$). Епюра відповідає висоті $H=100$ мм, тобто виходу повітряного потоку з каналу. Як видно з рисунка 3, в усьому вказаному діапазоні швидкостей плівки води існує частина потоку повітря в каналі, що рухається співнаправлено зі стікаючою плівкою води (відповідає швидкості, меншій нуля). Товщина цієї частини потоку повітря складає близько 0,4 мм за швидкості плівки води $W_f=0,3$ м/с і близько 1,6 мм за швидкості плівки води $W_f=1,1$ м/с.

На рисунку 4 наведено залежність радіальної швидкості на межі поділу фаз від швидкості плівки води в діапазоні $W_f=0,3\ldots1,1$ м/с. Як видно з рисунка 4, існування трьох зон а їх параметри зберігаються. Із рисунка 4 також видно, що в першій та третій зонах є радіальна швидкість на межі поділу фаз і ця швидкість варіюється в діапазоні 0,01 м/с.

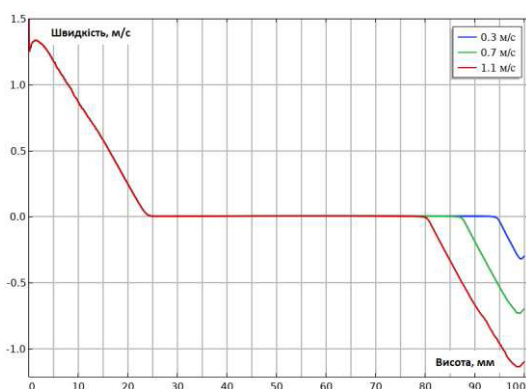


Рисунок 2. Залежність швидкості на межі поділу фаз від швидкості плівки води в діапазоні $W_f=0,3\ldots1,1$ м/с

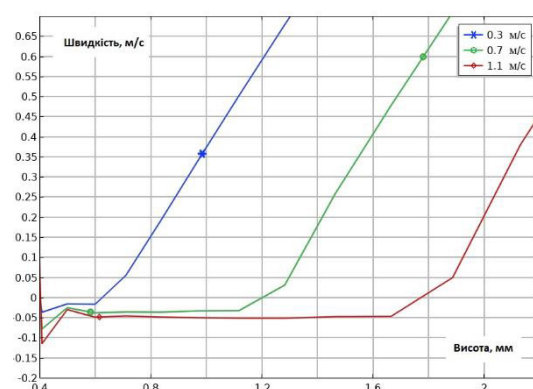


Рисунок 3. Епюра швидкості поблизу межі поділу фаз, залежно від швидкості плівки води в діапазоні $W_f=0,3\ldots1,1$ м/с за $H=100$ мм

Опираючись на рівняння нерозривності, з радіальної швидкості можна якісно оцінити радіальне перенесення маси, тобто хвилювання на поверхні розділу фаз. Очевидно, що за ламінарного руху фаз в другій зоні каналу хвилювання відсутнє, а найбільші хвилі будуть на верхній та нижній границях каналу. Аналогічна картина має місце за інших швидкостей плівки води.

На рисунках 5 і 6 показано залежність швидкості та радіальної швидкості на межі поділу фаз від швидкості потоку повітря в діапазоні $W_{air}=1,2...2,2$ м/с ($Re_{air}=1600...3000$). Як видно з рисунків 5 і 6 існування трьох зон в каналі зберігається. З рисунка 5 також видно, що збільшення першої зони пропорційне зростанню швидкості повітря. З рисунка 6 також видно, що зростання швидкості повітря приводить до збільшення амплітуди пульсацій радіальної швидкості.

На рисунках 7 і 8 наведено залежність швидкості та радіальної швидкості на межі поділу фаз від висоти каналу в діапазоні $H=50...150$ мм. Як видно з рисунків 7 і 8, існування трьох зон в каналі зберігається. Однак, зі зменшенням висоти каналу з $H=150$ до 50 мм відбувається зменшення лише другої зони. Як видно з рисунка 8, найвища радіальна швидкість спостерігається на верхній та нижній границях каналу. Також пульсації радіальної швидкості зберігаються в першій та другій зонах, що пояснюється хвилюванням плівки.

Залежність швидкості та радіальної швидкості на межі поділу фаз від товщини плівки води на стінці каналу в діапазоні $\delta=0,15...0,31$ мм ($Re_f=80...160$) наведено на рисунках 9 і 10. Як видно з рисунків 9 і 10, існування трьох зон в каналі зберігається, а зі зменшенням товщини плівки води на стінці каналу з $\delta=0,31...0,15$ мм

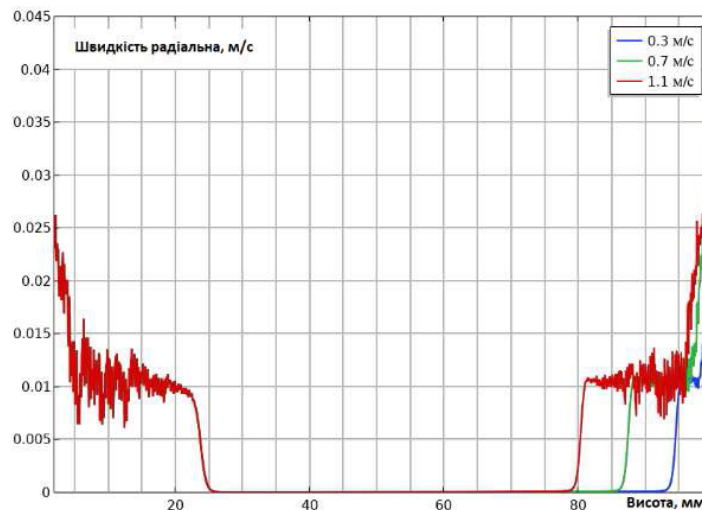


Рисунок 4. Залежність радіальної швидкості на межі поділу фаз від швидкості плівки води в діапазоні $W_f=0,3...1,1$ м/с

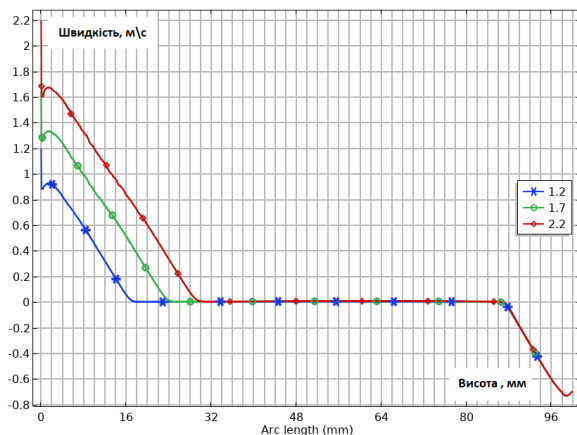


Рисунок 5. Залежність швидкості на межі поділу фаз від швидкості потоку повітря в діапазоні $W_{air}=1,2...2,2$ м/с

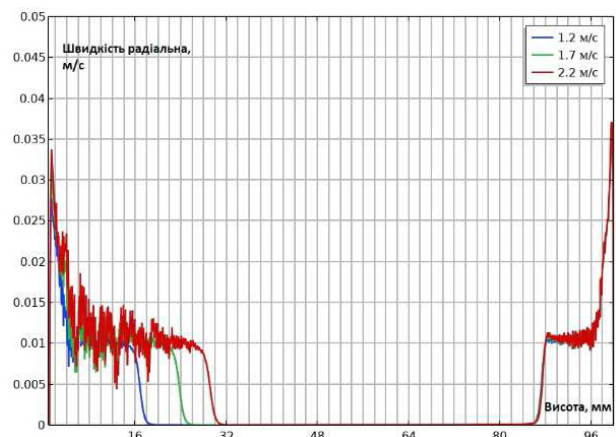


Рисунок 6. Залежність радіальної швидкості на межі поділу фаз від швидкості потоку повітря в діапазоні $W_{air}=1,2...2,2$ м/с

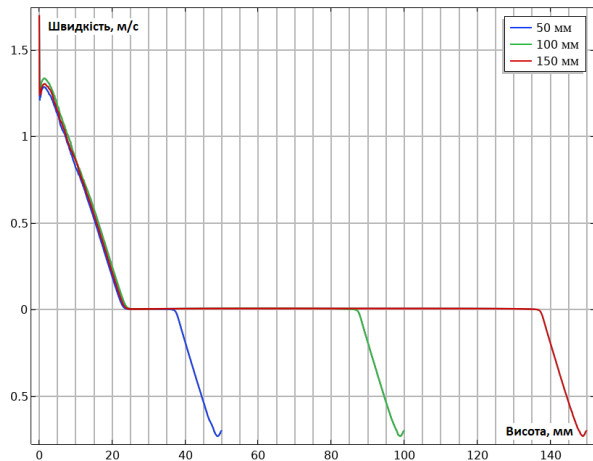


Рисунок 7. Залежність швидкості на межі поділу фаз від висоти каналу в діапазоні $H = 50...150$ мм

відбувається збільшення лише другої зони. Як видно з рисунка 10, найвища радіальна швидкість спостерігається на верхній та нижній границях каналу. Також пульсації радіальної швидкості зберігаються в першій та другій зонах і пояснюються хвилюванням плівки.

Висновки

Встановлено, що за протитоку фаз в ламінарному режимі в вертикальному каналі, залежно від зони по висоті каналу, гідродинаміка відрізняється. Таких зон встановлено три. В першій – підйомний потік повітря створює супутній підйомний потік у збігаючій плівці води, в другій зоні – супутні потоки не встановлені та в третій зоні стікаюча плівка води створює супутній опускний потік у повітрі.

Факторами, які впливають на розміри вищевказаних трьох зон є висота каналу, витрати або швидкості кожної з фаз. Зокрема, на вході плівки води в канал зі швидкістю $W_f = 0,3...1,1$ м/с та товщиною 0,25 мм ($Re_f = 60...210$) обраховане значення товщини супутнього потоку повітря складає $(0,4...1,6) \cdot 10^3$ м і є прямопропорційним швидкості плівки води. Також, зі зменшенням висоти каналу втричі, з 0,150 до 0,050 м існування трьох зон в каналі зберігається, однак висота зони без супутнього потоку прямопропорційно зменшується на один порядок – з 0,137 м до 0,013 м.

Встановлення співнаправлених потоків на межі поділу фаз у каналах плівкових контактних апаратів, дозволяє підібрати гідродинамічний режим для підвищення ефективності теплообміну. Також, існування співнаправлених потоків на межі поділу фаз пояснює зміни у мультифазних потоках, відповідно до карти режимів.

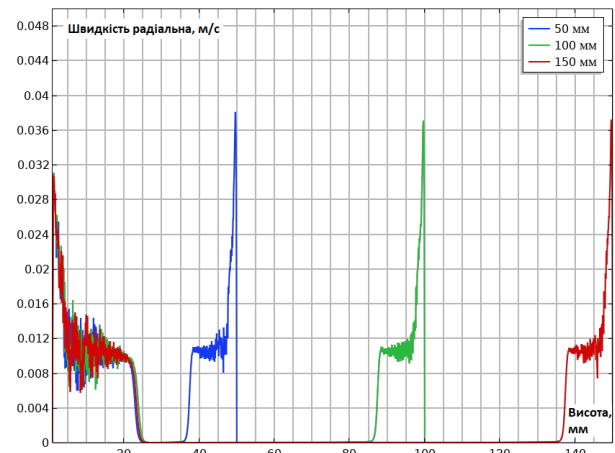


Рисунок 8. Залежність радіальної швидкості на межі поділу фаз від висоти каналу в діапазоні $H = 50...150$ мм

ЛІТЕРАТУРА

1. Василенко С.М., Українець А.І., Олішевський В.В. Основи тепломасообміну — К.: НУХТ, 2004. – 250 с.
2. Ключев Н.І., Соловйова Е.А. Математичні моделі двофазних течій – Самара: Самарський університет, 2010. – 51 с.
3. Феддаурі М., Белакхміді Е-М., Мір А., Бенду А. Чисельне дослідження випарного охолодження плівки рідини в ламінарних потоках змішаної конвекційної трубки // International Journal of Thermal Sciences – 2001. – V. 40, № 11. – P. 1011-1020.
4. Alla A.N., Feddaoui M., Meftah H. Comparison of two configurations to improve heat and mass transfer in evaporating two-component liquid film flow // International Journal of Thermal Science – 2018 – V. 126. – P.194-204.
5. Oulaid O., Benhamou B., Galanis N. Simultaneous Heat and Mass Transfer in Inclined Channel with Asymmetrical Conditions // Journal of Applied Fluid Mechanics – 2012. – V. 5, № 3. – P. 53-62.
6. Sjur Mo, Alireza Ashrafiyan, Stein Tore Johansen Simulation of flow regime transitions in vertical pipe flow // 8 International Conference on Multiphase Flow ICMF – 2013. Jeju, Korea, May 26 - 31.
7. Alizadehdakheel A., Rahimi M., Jafar Sanjari J., Alsairafi A.A. CFD and artificial neural network modeling of two-phase flow pressure drop // International Communications in Heat and Mass Transfer – 2009. – V. 34. – P. 850-856.
8. Esam Mejbel Abed, Zahra'a Aamir Auda Simulation and Experimental of Oil-Water Flow with Effect of Heat

Transfer in Horizontal Pipe // International Journal of Mechanical Engineering and Applications – 2014. – V. 2, № 6. – P. 117-127.

9. *Pravin Sawant, Mamoru Ishii, Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Michitsugu Mori*, Properties of disturbance waves in vertical annular two-phase flow // Nuclear Engineering and Design – 2008. – V. 248, № 12. – P. 3528-3541.

10. *Zhaolin Wang, Kamel S. Gabriel, Devon L. Manz* The influences of wave height on the interfacial friction in annular gas-liquid flow under normal and microgravity conditions // International Journal of Multiphase Flow – 2004. – V. 30. – P. 117-127.

11. *Christopher E.B.* Fundamentals of Multiphase Flows. – Cambridge University Press, 2005. – 410 p.

THE SIMULATION AND FEATURES OF COUNTERCURRENT FLOW IN VERTICAL CHANNELS OF CONTACT DEVICES

Kuzmenko I.M.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.3>

The aim of the work is to study the modes of motion of the phases at the interface of the film of water-air flow in the vertical channel during the countercurrent motion of the phases of the coolant. To achieve this goal, the following problems are solved: for each of the phases, the stationary Navier-Stokes equations and continuity are recorded, taking into account the direction of gravity. The obtained system of equations in the two-dimensional formulation in cylindrical coordinates with corresponding boundary conditions is solved in the package COMSOL MULTIPHYSICS 5.6. In the specified package the modeling of the influence of factors on the behavior of the interface of the film water-air flow in the vertical channel during the countercurrent movement of the phases is carried out. It is concluded that the existence of concomitant flows at the interface of the phases, depending on the height of the channel and the flow of phases in the vertical channel.

As a result of the simulation, it was found that the countercurrent phases in the laminar mode in the vertical channel, the hydrodynamics at the interface of the phases differs in the height of the channel. At the inlet, at the bottom of the channel, the airflow creates a concomitant flow in the flowing film of water at the interface. Accordingly, at the top of the channel, at the inlet, the film of water creates a concomitant flow in the flow of wind, moving countercurrent. And in the canal itself, there is an area where the movement of water and air flows has no concomitant flows.

That is, as a result of simulation it was found that the countercurrent phases in the laminar mode in the vertical channel, the hydrodynamics at the phase boundary differs, depending on the zone at the height of the channel and three such zones.

Factors that affect the size of the above three zones are the height of the channel, flow rate, or speed of each of the phases. In particular, at the inlet of the water film into the channel with a speed $W_f = 0,3...1,1$ m/s and a thickness of 0.25 mm ($Re_f = 60...210$), the calculated value of the thickness of the concomitant airflow is (0.4 .. 1.6) 103 m and is directly proportional to the speed of the water film. Also, with a decrease in the height of the canal three times, from 0.150 to 0.050 m, the existence of three zones in the canal is

maintained, but the height of the zone without concomitant flow decreases in direct proportion by one order - from 0.137 m to 0.0113 m.

The establishment of co-directed flows at the phase separation boundary in the channels of film contact devices for selection of the hydrodynamic regime to increase the efficiency of heat exchange.

References 11, figures 8.

Key words: simulation, contact apparatus, vertical channel, countercurrent flow, water film, flow regime.

1. Vasylenko S.M., Ukrainets A.I., Olishevsky V.V. Basics of heat and mass transfer. K.: NUHT, 2004. - 250 p.

2. Klyuyev N.I., Solovyova E.A. Mathematical models of two-phase flows - Samara: Samara University, 2010. - 51 p.

3. Feddauri M., Belakhmidi E.M., Mir A., Bendu A. Numerical study of evaporative cooling of a liquid film in laminar flows of a mixed convection tube // International Journal of Thermal Sciences - 2001. - V. 40, № 11. - P. 1011-1020.

4. Alla A.N., Feddaoui M., Meftah H. Comparison of two configurations to improve heat and mass transfer in evaporating two-component liquid film flow // International Journal of Thermal Science - 2018 - V. 126. - P.194-204.

5. Oulaid O., Benhamou B., Galanis N. Simultaneous Heat and Mass Transfer in Inclined Channel with Asymmetrical Conditions // Journal of Applied Fluid Mechanics - 2012. - V. 5, № 3. - P. 53-62.

6. Sjur Mo, Alireza Ashrafiyan, Stein Tore Johansen Simulation of flow regime transitions in vertical pipe flow // 8 International Conference on Multiphase Flow ICMF - 2013. Jeju, Korea, May 26 - 31.

7. Alizadehdakhel A., Rahimi M., Jafar Sanjari J., Alsairafi A.A. CFD and artificial neural network modeling of two-phase flow pressure drop // International Communications in Heat and Mass Transfer - 2009. - V. 34. - P. 850-856.

8. Esam Mejbil Abed, Zahra'a Aamir Auda Simulation and Experimental of Oil-Water Flow with Effect of Heat Transfer in Horizontal Pipe // International Journal of Mechanical Engineering and Applications - 2014. - V. 2, № 6. - P. 117-127.

9. Pravin Sawant, Mamoru Ishii, Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Michitsugu Mori, Properties of disturbance waves in vertical annular two-phase flow // Nuclear Engineering and Design - 2008. - V. 248, № 12. - P. 3528-3541.

10. Zhaolin Wang, Kamel S. Gabriel, Devon L. Manz The influences of wave height on the interfacial friction in annular gas-liquid flow under normal and microgravity conditions // International Journal of Multiphase Flow - 2004. - V. 30. - P. 117-127.

11. Christopher E.B. Fundamentals of Multiphase Flows. - Cambridge University Press, 2005. - 410 p.

Отримано 24.01.2022

Received 24.01.2022