

УДК 526.34

В.В.ЗАДВЕРНЮК, Ю.В.ЛОХМАНЕЦЬ, Є.О.СЕВЕРИН

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МУЛЬТИФАЗНОЇ ПРОТИТОКОВОЇ ТЕЧІЇ В ПРЯМОКУТНОМУ КАНАЛІ

V.ZADVERNIUK, YU.LOKHMANETS, E.SEVERIN

NUMERICAL SIMULATION OF MULTIPHASE COUNTER-FLOW AT RECTANGULAR DUCT

Анотація. В роботі розглядається чисельне моделювання процесу взаємодії рідкої та газоподібної фаз в протитечійному теплообміннику контактного типу. Наведено узагальнене математичне формулювання тривимірної задачі нестационарного конвективного теплообміну в мультифазній системі. Розроблено методику чисельного розв'язання з використанням методу скінчених об'ємів для дискретизації визначальних рівнянь переносу та методу об'єму рідини (VOF) для відстеження міжфазної границі незмішуваних фаз. Розроблено чисельну модель ділянки каналу прямокутного перерізу з урахуванням турбулентного режиму течії. Проведено ряд чисельних розрахунків для плоскої та хвилястої форми стінки каналу при варіації гідродинамічних параметрів, об'ємних витрат рідини та швидкостей газу. Запропонована модель дозволяє відстежувати зміни геометричної форми границі розподілу фаз та визначати параметри початку та розвитку режимів течії двофазного потоку у досліджуваному каналі.

Ключові слова: прямокутний канал, протиток, режим течії, числова модель, границя розподілу фаз.

Аннотация. В работе рассматривается численное моделирование процесса взаимодействия жидкой и газовой фаз в участке канала контактного противоточного теплообменника. Приведена обобщенная математическая формулировка трехмерной задачи нестационарного конвективного теплообмена в мультифазной системе. Разработана методика численного решения с использованием метода конечных объемов для дискретизации определяющих уравнений переноса, а также метода объема жидкости (VOF) для отслеживания межфазной границы несмешивающихся фаз. Разработана численная модель участка канала прямоугольного сечения с учетом турбулентного режима течения. Выполнен ряд численных расчетов для плоской и волнообразной формы поверхности стенки канала при изменении гидродинамических параметров, объемных расходов жидкости, скорости газовой фазы. Предложенная модель позволяет отслеживать изменения геометрической формы границы раздела фаз и определять параметры начала и развития режимов течения двухфазного потока в исследуемом канале.

Ключевые слова: прямоугольный канал, режим течения, численная модель, граница раздела фаз.

Annotation. In this paper we examine the numerical simulation of liquid-gas interaction in duct section of contact counter-flow heat exchanger. The generalized mathematical formulation presented describes 3D problem of unsteady convective heat transfer in multiphase systems. The technique of numerical solution uses the finite volume method to discretize the governing transfer equations, while the volume of fluid (VOF) method is used for tracking the interface of immiscible phases. A numerical model is developed for small section of rectangular duct considering turbulent fluid flow. A number of numerical calculations were carried out for plane and wave-shaped wall surface of the duct with variation of hydrodynamic parameters, volumetric flow rates of the liquid, velocity of gas phase. The model proposed provides visualization of interface geometry and position and provides definition of the beginning and development of two-phase flow regimes in the duct.

Key words: rectangular duct section, counter-flow, flow regime, numerical model, interface of immiscible phases.

До одного з найбільш ефективних способів взаємодії теплоносія і робочого тіла відносять безпосередній контакт стікуваної плівки рідини і газу при протічній русі фаз. Така взаємодія фаз супроводжується складними процесами тепло- і масообміну і фазовими перетвореннями. Перспективним методом інтенсифікації процесів тепло- і масообміну між плівкою рідини і газом є використання розвиненої поверхні контакту фаз. Розвиненість поверхні контакту фаз, зазвичай, досягається застосуванням різноманітних насадок до поверхні каналу (сітчасте покриття) чи застосуванням покриття з регулярною шорсткістю, пористістю [1,2]. Важливою умовою забезпечення ефективності роботи контактного апарата є використання особливостей взаємодії рідини і газу в каналі певної геометрії, а також діапазону робочих параметрів, в межах яких реалізується стійка течія рідини. Розрізняють такі основні режими руху в контактних тепломасообмінних апаратах: плівковий, підвісання, захливання, виносу. Режим підвісання розглядається як початковий режим захливання. Геометрична форма поверхні контакту фаз впливає на амплітуду хвиль стікуваної рідини, що, у свою чергу, впливає на граничну швидкість початку режиму захливання при протічній русі фаз. Також до особливостей розглядуваного протічній процесу слід віднести можливість виникнення термокапілярних збурень на плівці рідини, що вертикально стікає [2]. Особливістю дослідження процесів в каналах контактних теплообмінних апаратів є складність визначення всіх факторів, що впливають на гідродинаміку та теплообмін у двофазових протічній системах. Дослідження гідродинаміки при протічній русі в каналах прямокутного перерізу стікуваної плівки рідини і газу проведені експериментально [3,4], а також для мікроканалів [5]. Числове моделювання є перспективним і ефективним методом дослідження таких процесів, оскільки надає більш детальну інформацію про локальні характеристики процесу, дозволяє швидко порівняти значну кількість варіантів та режимів досліджень, обмеживши кількість експериментальних випробувань.

Метою роботи є визначення режимів роботи контактного тепломасообмінного апарата з каналом прямокутного перерізу, в яких відбувається нагрів рідини протічній газом, шляхом числового моделювання мультифазного протічній процесу течії в прямокутному каналі з урахуванням конвективного теплообміну, що на даний момент досліджено не повною мірою.

Математичне формулювання задачі

Розглядається задача нестационарного протічній руху незмішуваних фаз типу «рідина–газ» з урахуванням конвективного теплообміну в каналі прямокутного перерізу. Модель фізичних полів в каналі включає у себе рівняння енергії (1) та рівняння Нав'є-Стокса (руху в'язкої рідини (2) та нерозривності (3)), що в загальному випадку записуються в векторному вигляді:

$$c_p(T)\rho(T)\left[\frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{v} \cdot (\nabla T)\right] = \nabla \cdot [\lambda(T)\nabla T]; \quad (1)$$

$$\rho(T)\left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v}\right] = \nabla \cdot [\mu(T)\nabla \cdot \mathbf{v}] - \nabla P + \rho(T)\mathbf{g}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot [\rho(T)\mathbf{v}] = 0, \quad (3)$$

де c_p – питома ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);

ρ – густина, кг/м³; T – температура, К;

τ – час, с;

$X(x, y, z)$ – декартові координати, м;

λ – теплопровідність, Вт/(м·К);

$\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)^T$ – вектор швидкості, м/с;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, кг/(м·с);

P – тиск, Па;

\mathbf{g} – вектор гравітації, м/с².

Мультифазність течії враховується за допомогою підходу Ейлера, згідно з яким для кожної фази вводиться поняття фазової об'ємної частки. Ці об'ємні частки вважаються неперервними функціями простору і часу, а їх сума в кожній точці області дорівнює одиниці. Рівняння збереження (1–3) записуються окремо для кожної фази і мають аналогічні структури для всіх фаз. Рівняння замикаються за допомогою визначальних співвідношень між фазами, для чого використовується модель об'єму рідини (Volume Of Fluid, VOF) [6].

Модель VOF дозволяє відстежувати форму міжфазної поверхні для двох або більше рідин, що не змішуються. У моделі VOF рівняння руху (2) є загальним для рідин, а об'ємна частка кожної рідини розраховується в кожній точці розрахункової області. Таким чином, змінні та властивості в будь-якій комірці відповідають одній з фаз або їх суміші, залежно від значення об'ємної частки α . Відстеження форми міжфазної границі реалізується розв'язанням рівняння нерозривності для об'ємної частки однієї з фаз:

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} + \mathbf{V} \cdot \nabla \alpha_1 = 0 \quad (4)$$

Для другої фази (в двофазній системі) об'ємна частка визначається як різниця одиниці та частки першої фази. Форма міжфазної границі є кусково-лінійною та визначається згідно зі схемою геометричної реконструкції [7].

Властивості матеріалів, що фігурують в рівняннях переносу, визначаються з співвідношення фаз в кожній точці. У двофазній системі, наприклад, якщо фази позначити нижніми індексами 1 і 2 та відомою є об'ємна частка другої фази, густина в кожній комірці розраховується як:

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (5)$$

Аналогічним чином розраховуються інші властивості матеріалів (в'язкість, теплопровідність, теплоємність і т.ін.). Рівняння руху рідини (2) розв'язується у всій розрахунковій області, результатне поле швидкостей є загальним для фаз. Це рівняння залежить від об'ємних часток фаз через загальну густину згідно (5). Рівняння енергії (1) також є єдиним для фаз, при цьому енергія E і температура T обчислюються усередненням за масою, а саме:

$$E = \frac{\alpha_1 \rho_1 E_1 + \alpha_2 \rho_2 E_2}{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2} \quad (6)$$

де E_1, E_2 – енергії для кожної з фаз, визначаються з питомою теплоємністю фази і температури.

Для урахування турбулентного характеру руху газу (повітря) у каналі, що є справедливим за наявності значних перепадів температури і тиску між входом та виходом каналу, застосована модель турбулентності $k-\varepsilon$ [8] завдяки її відносній простоті, швидкості розрахунку, пристосованості до досить широкого кола задач та прийнятній точності.

Для замикання системи рівнянь (1–3) записуються умови однозначності – початкові умови та граничні умови (ГУ): на зовнішніх поверхнях прямокутного каналу – теплові ГУ 1-го або 3-го роду та умови прилипання на стінці каналу; на площинах симетрії – умови симетрії; на границях між елементами конструкції – умови спряження по температурах та по теплових потоках. Кут змочування між поверхнею і рідиною задано рівним 175°.

Для числового розв'язку розробленої математичної моделі (рівнянь збереження маси, складових моменту руху, енергії та турбулентних величин) використано метод скінченних об'ємів [9]. Кожне з визначальних рівнянь може бути зведене до узагальненого нестационарного рівняння переносу скалярної величини, яке записується в інтегральній формі для кожного контрольного об'єму в межах розрахункової області:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial \tau} dV + \int_A \rho \phi \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = \int_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (7)$$

де \mathbf{A} – вектор площі поверхні;

Γ_ϕ – коефіцієнт дифузії для ϕ ;

S_ϕ – об'ємна густина внутрішнього джерела величини ϕ . Дискретизація рівняння (7) для даної комірки дає:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial \tau} V + \sum_f \rho_f \mathbf{v}_f \phi_f \cdot \mathbf{A}_f = \sum_f \Gamma_f \nabla \phi_f \cdot \mathbf{A}_f + S_\phi V, \quad (8)$$

де N_{fac} – кількість граней, що оточують комірку;
 ϕ_f – потік величини ϕ , що передається через грань f ;
 $\rho_f \mathbf{v}_f \cdot \mathbf{A}_f$ – масовий потік через цю грань;
 \mathbf{A}_f – вектор площі грані f ;
 $\nabla \phi_f$ – градієнт величини ϕ на грані f ;
 V – об'єм комірки.

Рівняння об'ємної долі розв'язується за допомогою явної дискретизації по часу, інтерполяція поверхневих потоків виконується за допомогою схеми геометричного відновлення форми міжфазної границі кусково-лінійним наближенням [10].

Основні підходи до апроксимації, що використані в рамках методу скінченних об'ємів, включають протипотокову схему QUICK [11] та схему 2-го порядку апроксимації [12], а також неявну схему 2-го порядку для нестационарних членів [9]. Для вузлових значень компонент швидкості та тиску використано методику зсунутої у шаховому порядку сітки для виключення нефізичних розподілів тиску [9]. Для врахування рівняння нерозривності використовується алгоритм SIMPLE [12]. Отримані лінеаризовані дискретні рівняння, записані для всіх комірок розрахункової сітки, розв'язуються за допомогою ітераційного алгоритму на основі методу Гауса-Зейделя з нижньою релаксацією [13].

Числова реалізація моделі

Для числової реалізації моделі конвективного теплообміну в каналі була створена нерівномірна в радіальному напрямку (для більш точного розрахунку в пристінному шарі) розрахункова сітка з шестигранних елементів. Загальна кількість елементів числової моделі становить 232560.

Розрахункова сітка моделі створена для ділянки каналу поперечним перерізом – 10×5 мм і висотою – 10 мм. Оскільки модель є симетричною відносно двох взаємоперпендикулярних площин, то для прискорення розрахунків доцільно розглядати лише четверту частину каналу, що на рисунку 1 показана разом з геометричними розмірами та граничними умовами моделі. Теплофізичні властивості досліджуваних фаз (властивості яких близькі до води та повітря відповідно) наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Теплофізичні властивості досліджуваних фаз

Матеріал	Рідина	Газ
Густина ρ , кг/м ³	998,2	1,225
Питома теплоємність c_p , Дж/(кг·К)	4182	1006,43
Теплопровідність λ , Вт/(м·К)	0,6	0,0242
Коефіцієнт динамічної в'язкості μ , кг/(м·с)	$1,003 \cdot 10^{-3}$	$1,7894 \cdot 10^{-5}$
Температура середовища T , К	300	373

Результатами числових розрахунків є векторні поля швидкостей, границя розподілу фаз, контури статичного тиску та температурні поля.

Результати проведених розрахунків та їх аналіз

Були проведені дослідження зміни форми поверхні взаємодії фаз, розрахунки картини двофазної течії полів швидкостей, тисків, температур для каналу з гладкою стінкою і хвилеподібною стінкою при різних об'ємних витратах рідини та зміні швидкості газу W від 1 до 10 м/с. Обробка результатів дозволила визначити режими руху та гідродинамічні характеристики досліджуваного протитечійного процесу в каналі, які наведені у таблиці 2.

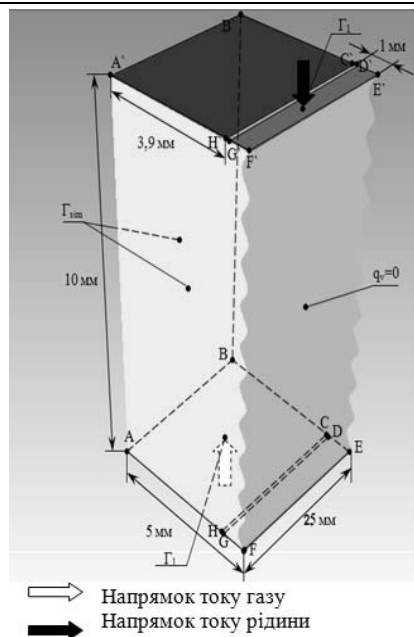


Рис. 1. Геометрія моделі каналу з хвиляподібною бічною стінкою

Таблиця 2

Гідродинамічні характеристики двофазного протитечісного процесу в прямокутному каналі з $d_{\text{екв}} = 1,667 \cdot 10^{-3}$ м

Режим течії	Об'ємна витрата рідини, V , $\text{м}^3/\text{с}$	Швидкість, $W_{\text{кр}}$, $\text{м}/\text{с}$	ΔP , Па	$Re = W_{\text{кр}} \cdot d/v$
Канал з пласкою стінкою				
1. Плівковий 2. Захлинання 3. Виносу	$0,6 \cdot 10^{-6}$	7,2..7,5 9,5..9,6	15 23	до 700 700 900
1. Плівковий 2. Захлинання 3. Виносу	$1 \cdot 10^{-6}$	5,5..5,6 8,5	22 30	до 520 520 800
1. Плівковий 2. Захлинання 3. Виносу	$1,5 \cdot 10^{-6}$	4,0..4,1 7,5..7,6	28 38	до 400 400 700
Канал з хвиляподібною стінкою				
1. Плівковий 2. Захлинання 3. Виносу	$0,6 \cdot 10^{-6}$	8,0 10,0..10,2	9,8 17,5	до 750 750 950
1. Плівковий 2. Захлинання 3. Виносу	$1 \cdot 10^{-6}$	7,2..7,3 8,9..9,1	12,5 22,5	до 680 680 850
1. Плівковий 2. Захлинання 3. Виносу	$1,5 \cdot 10^{-6}$	7,4..7,5 8,0..8,1	15,5 28,1	до 700 700 750

Запропонована модель дає уявлення про миттєві зміни параметрів та геометричної форми границі фазного розподілу. Приклад візуалізації цієї зміни у вертикальному перерізі каналу наведений на рис. 2 та дозволяє визначити початок і розвиток режимів течії двофазного потоку. Явище «підвісання» плівки рідини пов'язане з різким гальмуванням рідини набіжним газовим потоком, внаслідок чого виникає хвиля збільшеної амплітуди, яка змінює напрямок течії верхнього шару рідини. Графічно представлені різними відтінками сірого кольору значення тиску (рис.3) дозволяють визначити значення тиску не тільки на вході та на виході з каналу, але і в будь-

якій точці досліджуваного каналу. Поступове збільшення витрати рідини спричиняє звуження прохідного перерізу для газового потоку, що рухається протитечійно, внаслідок чого гідравлічний тиск в каналі збільшується. За допомогою полів розподілу статичних тисків (рис.3) з досить високою точністю можна визначити величину зміни гідравлічного тиску в каналі ($\Delta P = P_{вх} - P_{вих}$) та визначити зони з надмірним тиском, що обумовлені режимом руху рідини. На рис.3 б),д) спостерігається зниження поля тиску в зоні над плівкою рідини, що знаходиться в стані «підвисання». В напрямку від стінок каналу до його центру тиск зменшується. Значення критичної швидкості газу (див. табл. 2) визначають початок зміни плівкового режиму на режим захлинання та переходу до режиму виносу. Порядок чисел Re , розрахованих на базі критичних значень швидкості газу і які характеризують перехід режиму руху, наведені в таблиці 2. Збільшення значення числа Re при збільшенні об'ємної витрати рідини на хвилеподібній стінці узгоджуються з результатами експерименту в каналі з поверхнею, екранованою сіткою [3]. Наявність канавок у хвилеподібній стінці значно покращує розподіл рідкої плівки по бічній поверхні каналу. Канавки виконують роль накопичувачів і розподільовачів рідини, що навіть при великих числах Re дозволяє підтримувати поверхню змоченою.

Отримані в результаті розрахунку температурні поля дозволяють визначити границі зон з найбільшими та найменшими температурними градієнтами в будь-якій точці досліджуваного каналу. Густина ізотерм (рис.4) поблизу плівки рідини при плівковому режимі течії значно більша порівняно з режимом захлинання. Найгіршим, з точки зору теплообміну між рідиною і газом, є режим виносу, оскільки контакт між фазами в границях робочої зони каналу практично відсутній – рідина виноситься потужним газовим потоком за межі каналу.

Розроблена модель дозволяє визначити інтенсивність теплообміну, ступінь нагріву рідини та охолодження газу при різних витратах, режимах течії, параметрах потоків, геометричних характеристиках каналу, зокрема поверхні теплообміну.

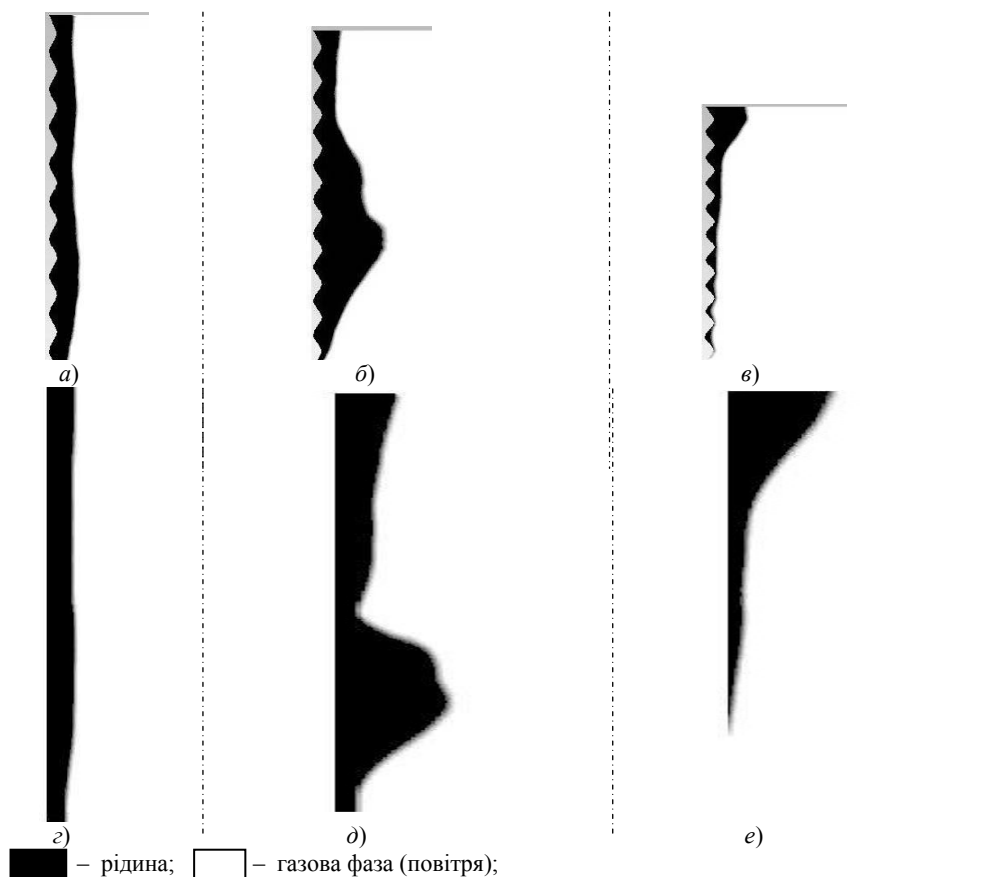


Рис. 2. Приклади картини фазного розподілу при різних режимах течії в каналах з хвилеподібною (верхній ряд) і пласкою поверхнею (нижній ряд).

a), c) – плівковий режим течії; *б), d)* – режим захлинання; *е), e)* – режим виносу.

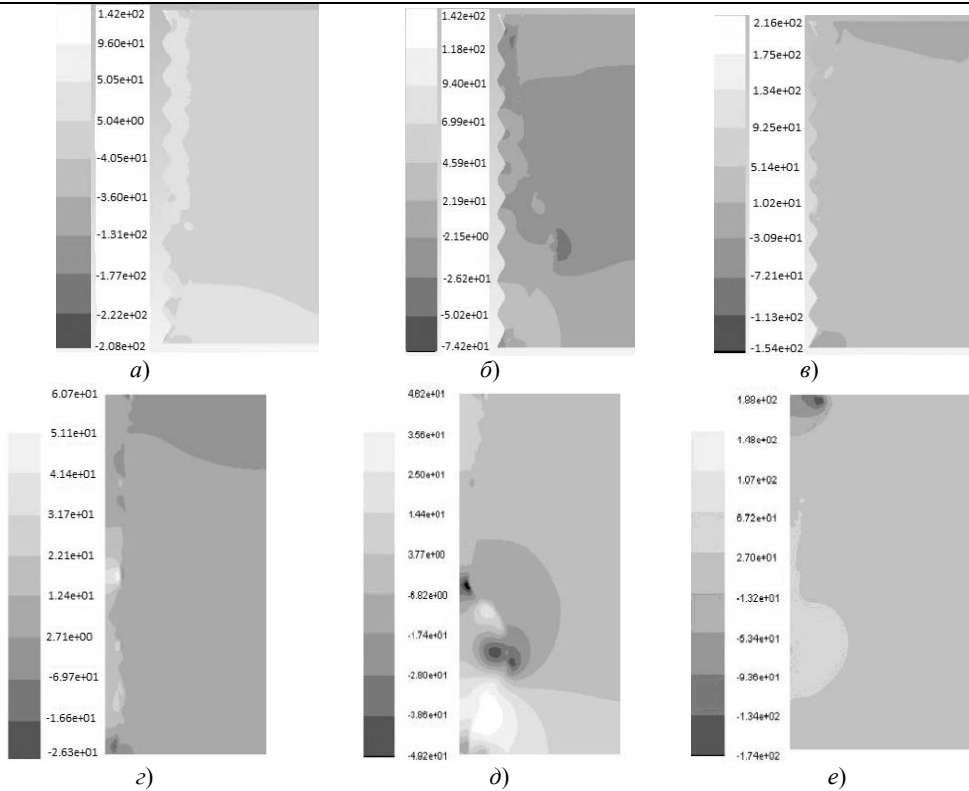


Рис. 3. Контури статичного тиску при різних режимах течії в каналах з хвилеподібною (а,б,в) і плоскою поверхнею (з, д, е):

а), з) – плівковий режим течії; б), д) – режим захливання; в), е) – режим виносу.

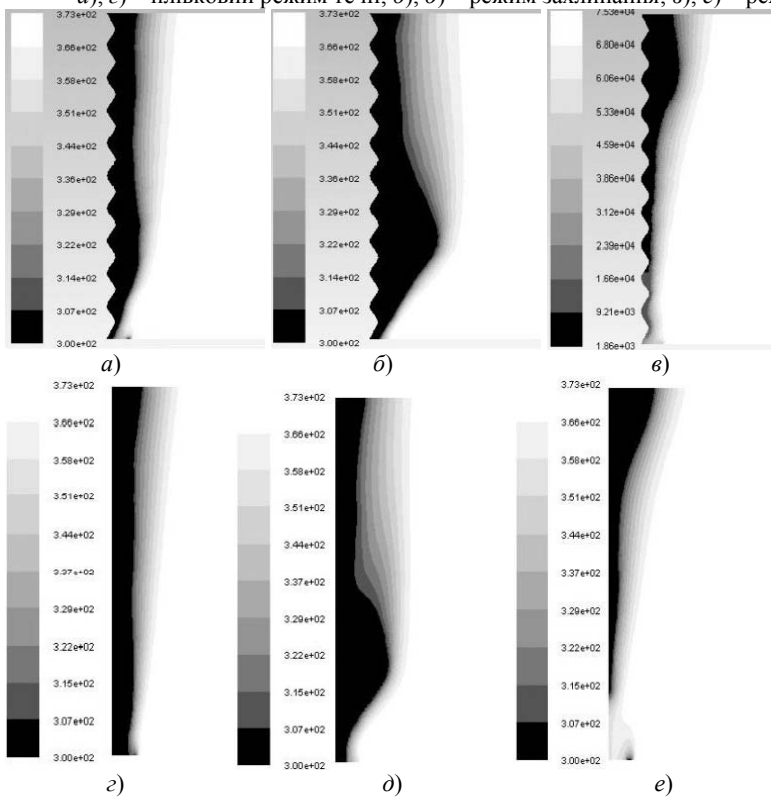


Рис. 4. Температурні поля при різних режимах течії в каналах з хвилеподібною (а,б,в) і плоскою поверхнею (г,д,е):

а), з) – плівковий режим течії; б), д) – режим захливання; в), е) – режим виносу.

Висновки

1. Розроблено математичну модель нестационарного теплообміну в мультифазній системі, яка дозволяє досліджувати режими течії та процеси теплообміну при різних вихідних умовах і спостерігати як миттєві їх характеристики, так і їх динаміку. Виконано числову реалізацію моделі за допомогою методу скінченних об'ємів та адаптовано для розрахунків стандартне програмне забезпечення. Проведено ряд числових розрахунків і отримано розподіл температурних полів та характер розподілу полів швидкостей в прямокутному каналі.
2. Розроблена чисельна модель дозволила проаналізувати перехідні режими руху фаз. Візуалізація результатів розрахунків значно доповнює результати натурних експериментів, покращує деталізацію загальної картини процесу та визначення локальних характеристик процесу. В кінцевому рахунку, модель дозволяє прискорити і уточнити дослідження, підвищити ефективність використання теплової енергії.
3. В результаті числових досліджень встановлено, що режим захливання для заданих геометричних характеристик каналу з хвилеподібною стінкою починається при витраті рідини $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ та числі Рейнольдса $Re=750$, при цьому перепад тиску дорівнює $\Delta P=9,8 \text{ Па}$. При тій же витраті рідини $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ режим захливання пласкої стінки починається при значенні $Re=700$, перепад тиску при цьому $\Delta P=15 \text{ Па}$.
4. Подальший розвиток моделі стосується дослідження двофазних протічійних процесів з врахуванням масообміну при конденсації чи випаровуванні на границі розподілу фаз.

Література

1. Марценюк А.С., Стабников В.Н. Пленочные и тепломассообменные аппараты в пищевой промышленности. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981.– 160 с.
2. Тадеуш Хоблер. Теплопередача и теплообменники. Под ред. П.Г. Романкова. Л. : 1961.
3. Задвернюк В.В. Дослідження характеристик роботи контактної конденсатора з насадкою, екранованою сітчастою поверхнею з метою підвищення його енергоефективності./ В.В.Задвернюк, В.І. Шкляр // Екологія. Економіка. Енергозбереження. Матеріали V Міжнародної ювілейної науково-практичної конференції (14–16 травня 2009 р.) / О.Г. Гусак. – Суми : СумДУ, 2009. – С. 80–82.
4. Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю. Совершенствование тепломассообменной аппаратуры для энергетических систем./ Проблемы региональной энергетики 2008. №2. С.32–38.
5. Шатский Е.Н. Взаимодействие гидродинамических волн с термокапиллярной неустойчивостью в стекающей пленке жидкости. Материалы 5-той Российской научной конференции по теплообмену. Т.5 С.119–122, 2010.
6. C. W. Hirtand, B. D. Nichols. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free
7. boundaries. Journal of Computational Physics, 39:201–225, 1981.
8. D. J. Benson. Volume of fluid interface reconstruction methods for multimaterial problems. Applied Mechanics Reviews, 55:151–165, 2002.
9. Launder B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder, D. B
10. Spalding. — London : Academic Press, 1972. — 126 p.
11. Калиткин Н. Н. Численные методы : уч. пособие / Н. Н. Калиткин ; под ред. А. А. Самарского. — М. : Наука, 1978. — 512 с.
12. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Патанкар С.; [пер. с англ. В. Д. Виленского]. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 153 с.
13. B. P. Leonard and S.Mokhtari.ULTRA-SHARP Nonoscillatory Convection Schemes for High-Speed Steady Multidimensional Flow.NASA TM 1-2568 (ICOMP-90-12), NASA Lewis Research Center, 1990.
14. T. J. Barth and D.Jespersen.The design and application of upwind schemes on unstructured meshes.Technical Report AIAA-89-0366, AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1989.
15. Ferziger J. H. Computational methods for fluid dynamics. 3rd Ed. / J. H. Ferziger, M. Peric.— 2001.— New York : Springer. —423 p.
16. D. L. Youngs. Time-dependent Multi-material Flow with Large Fluid Distortion. In K. W. Morton and M. J. Baines, editors, Numerical Methods for Fluid Dynamics Academic Press, 1982.