

УДК 536.24

О. П. КОСТЮК, канд. техн. наук; ст. викладач НУВГП, Рівне

РЕЖИМИ ТЕЧІЇ ДВОФАЗОВИХ СУМІШЕЙ У ПРОТОЧНОМУ БАРБОТАЖНОМУ ШАРІ УТИЛІЗАТОРА ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ

Статтю присвячено експериментальним дослідженням, що направлені на підвищення ефективності роботи контактних тепломасообмінних апаратів шляхом збільшення міжфазної поверхні теплообміну та швидкості руху фаз. В роботі представлені результати експериментальних досліджень гідродинамічних режимів та форм руху газорідних сумішей у проточному двофазовому шарі утилізатора теплоти відхідних газів, визначені межі стійкого двофазового режиму, що відповідають граничним значенням критерію стійкості двофазового потоку (критерію Кутателадзе) та безрозмірної швидкості рідини (критерію Фруда).

Ключові слова: газорідна суміш, двофазовий потік, проточний барботаажний шар, контактний тепломасообмінний апарат, вертикальний канал.

Вступ

Більшість питань підвищення ефективності роботи контактних апаратів пов'язано з тепло- і масообміном між рідиною та газом. Розвиток нових сучасних технологій потребує глибокого вивчення процесу тепломасообміну при високій турбулізації поверхні фаз, що контактують між собою. Основним критерієм розробки нових високоефективних контактних апаратів є інтенсифікація процесу тепломасообміну та зменшення капітальних затрат.

Достатньо розвинута поверхня рідкої та газової фаз утворюється при барботажі газу в рідину у вигляді бульбашок або струмин. Такий режим взаємодії середовищ використовується в різних барботаажних апаратах, що мають форму високих колон, робочий простір яких розділено горизонтальними тарілками на ряд камер. Барботаажні апарати характеризуються підвищеною інтенсивністю тепло- і масообміну на одиницю об'єму апарата, допускають роботу з забрудненими та помірно в'язкими рідинами, нечуттєві до коливань витрати теплоносіїв. Проте до їх недоліків відносять складність конструкції, металоємкість, високий гідравлічний опір [1]. В режимі барботаажу такі апарати працюють поблизу критичних швидкостей руху газу, тобто на (15–20) % нижче так званої швидкості захливання, при якій спостерігається втрата стійкості протиточного руху фаз, підвищений винос води та внаслідок цього – підвищений гідравлічний опір. Явище захливання визначається взаємодією сил тертя, інерції, тяжіння та поверхневого натягу, а також геометричними характеристиками апарата.

Аналіз основних досягнень та літератури

На кафедрі ТПТ НТУУ «КПІ» був розроблений контактний апарат [2], в якому організовано рух газів зі швидкістю більше 15 м/с, тобто, яка перевищує верхню межу захливання протиточного руху газу та плівки рідини у вертикальних трубах. При таких значеннях швидкостей газового потоку у вертикальному каналі створюється висхідний супутній рух фаз. Результати експериментального дослідження гідродинамічних характеристик висхідної супутньої течії плівки рідини та газу викладені в роботах [3, 4]. Ці дослідження дозволили встановити ефективний режим роботи контактного апарата, а також отримати узагальнені залежності для розрахунку величини гідравлічного опору при висхідній супутній течії плівки рідини та газу у вертикальній трубі. При роботі контактного апарата у такому режимі досягаються високі значення коефіцієнтів тепло- і масовіддачі [5, 6]. Поверхнею контакту в цьому

© О.П. Костюк, 2014

випадку є плівка рідини у вигляді хвилі, яка тече по стінкам каналу, а газ рухається в ядрі потоку. Інтенсифікувати тепломасообмін можна шляхом збільшення міжфазної поверхні, цього можна досягти в проточному барботажному шарі у вертикальній трубі, зменшивши при цьому швидкість газової фази.

Мета дослідження, постановка задачі

Питання про режими та форми руху газорідних сумішей у барботажних апаратах з штучно організованим проточним двофазовим шаром в сучасний час мало вивчені та потребують додаткових досліджень. Поряд з відомими (з робіт по дослідженню гідродинаміки двофазових сумішей в вертикальних трубах та каналах) загальними закономірностями руху газо- і парорідних потоків виникають специфічні питання, пов'язані з організацією рівномірної структури барботажного шару в місці введення фаз, а також з вибором раціонального режиму роботи відповідного тепломасообмінного пристрою.

В зв'язку з цим в роботі наведені результати експериментальних досліджень гідродинамічних характеристик проточного барботажного шару у вертикальному каналі з метою встановлення режимів найбільш раціональної та економічної роботи контактного апарату з такою двофазовою системою.

Схема експериментальної установки та методика проведення експериментів

Дослідження проводились на експериментальній установці, яка представлена на рис. 1.

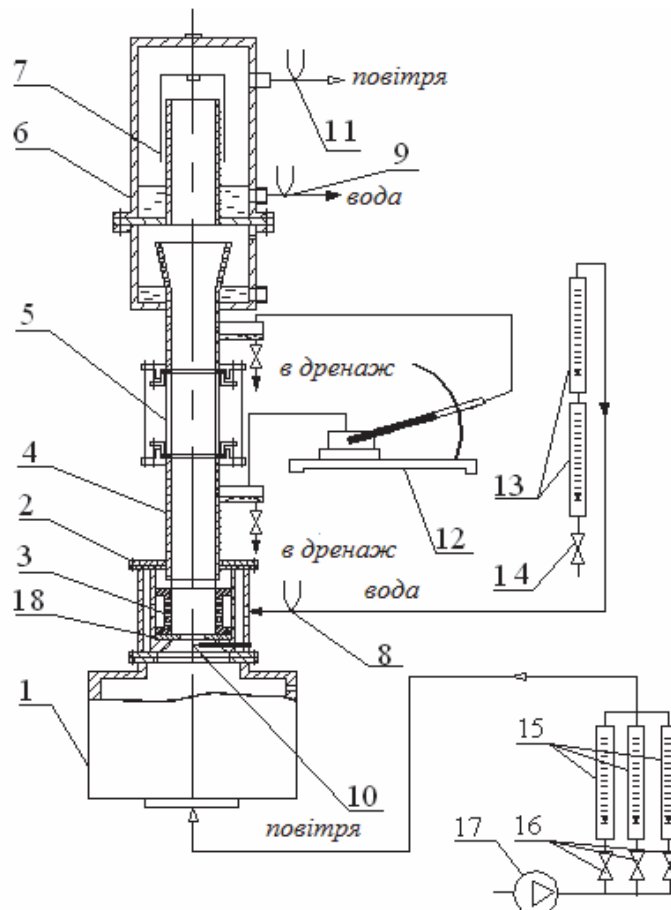


Рис. 1 – Схема експериментальної установки:

- 1 – камера входу; 2 – камера змішування; 3 – пориста вставка; 4 – робочий канал;
- 5 – ділянка візуалізації; 6 – камера збирання рідини; 7 – сепаратор; 8–11 – термопарі;
- 12 – мікроманометр; 13, 15 – ротаметри; 14, 16 – вентилі; 17 – компресор; 18 – шайба

Основними складовими частинами установки є: камера входу 1, камера змішування 2, робочий канал 4 з ділянкою візуалізації 5, камера збирання рідини 6 з сепаратором 7. Внутрішній діаметр ділянки візуалізації 5 співпадає з діаметром робочого каналу 4, що попереджує збурення двофазового потоку. Камера входу 1 виконує роль ресивера для повітря, яке подається компресором 17. Пристрій для введення рідини виконано у вигляді камери змішування 2 з пористою вставкою 3, яка узгоджена з зовнішнім діаметром трубки робочого каналу 4. Робочий канал виконаний у вигляді труб внутрішнім діаметром 0,017 м, 0,026 м, 0,035 м та висотою 0,143 м, 0,264 м, 0,437 м. Витрата повітря вимірювалась ротаметрами 15 та регулювалась за допомогою вентилів 16. Витрата води, яка подавалась у камеру змішування 2, вимірювалась ротаметрами 13 та регулювалась вентилями 14. При цьому швидкість повітря змінювалась від $w_{\text{вх}} = 1,84$ м/с до $w_{\text{вх}} = 14$ м/с, діапазон зміни густини зрошення змінювався від $Q_m = 8,99 \cdot 10^{-6}$ м²/с до $2,1 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

На вході у канал розміщувались шайби 18, які мали отвір, діаметри отворів у шайбах склали 5 мм, 8 мм та 10 мм. Встановлення перед робочою ділянкою шайби необхідно для запобігання провалу рідини. При цьому значення швидкості потоку повітря у перерізі шайби було не менше 15...16 м/с, що забезпечувало подачу всієї рідини у робочий канал.

Методика експериментального дослідження гідродинамічних режимів двофазової адіабатної течії побудована на основі вивчення закономірностей зміни повздовжнього середнього градієнта повних втрат тиску $\Delta P/L$, який визначався як відношення загального перепаду тиску у потоці ΔP до відстані між відборами тиску L . Перепад тиску вимірювався мікроманометром 12. Для вимірювання перепаду тиску у стінці трубки були просвердлені отвори діаметром 2 мм. Отвори з'єднувались з об'ємом невеликих ємностей, які виконували роль сепараторів. В нижній частині сепараторів збиралась рідина, а верхня, повітряна частина, з'єднувалась з мікроманометром, за допомогою якого проводились виміри перепаду тиску.

Результати досліджень

На рис. 2 представлені залежності повздовжнього середнього градієнта повних втрат тиску від приведеної швидкості повітря та об'ємної густини зрошення.

Характер отриманих залежностей змінюється зі збільшенням приведеної швидкості газу, що свідчить про існування різних режимів течії. Перший злом графіка (рис. 2а) спостерігається при швидкості повітря $w_{\text{вх}} = 6...7$ м/с. Подальше збільшення швидкості повітряного потоку супроводжується більш різким падінням $\Delta P/L$. Зміна характеру залежності повздовжнього середнього градієнта повних втрат тиску від швидкості повітря пояснюється тим, що при швидкостях менше 6...7 м/с у робочому каналі відбувається барботування потоку повітря крізь стовп рідини без помітної взаємодії фаз як в непроточному барботажному шарі.

При збільшенні швидкості повітря вище 6...7 м/с відбувається більш активна взаємодія фаз на межі розділу, яка викликає зростання винесення рідини, що збільшує середній газоміст двофазового шару та більш інтенсивно зменшує гідростатичну складову загального перепаду тиску. Значення критичної швидкості газу при цьому узгоджується з відповідним значенням для початку процесу «захлинання» течії при протитоці газу та плівки рідини [7]. Наступний злом графіка відповідає значенню приведеної швидкості газу 11...12 м/с, вище якої спостерігається різке падіння загального перепаду тиску, що може бути пояснено утворенням наскрізного газового каналу в ядрі двофазового потоку внаслідок викидання перемичок рідини між

великими бульбашками та газовими снарядами, що забезпечує різке зниження гідростатичної складової ΔP практично до нуля. Ріст ΔP при подальшому збільшенні швидкості газу обумовлений лише зростанням втрат на тертя у розділеному висхідному двофазовому потоці. Ця ділянка залежності відповідає початку впорядкованої висхідної кільцевої течії, що також узгоджується з результатами візуальних спостережень. Явний мінімум гідралічного опору, спостерігається при приведеній швидкості повітряного потоку ~ 14 м/с, кількісно відповідає інверсії течії, при якій відбувається припинення низхідної течії плівки рідини при роздільній двофазовій течії та починається формування впорядкованої висхідної кільцевої течії [7, 8].

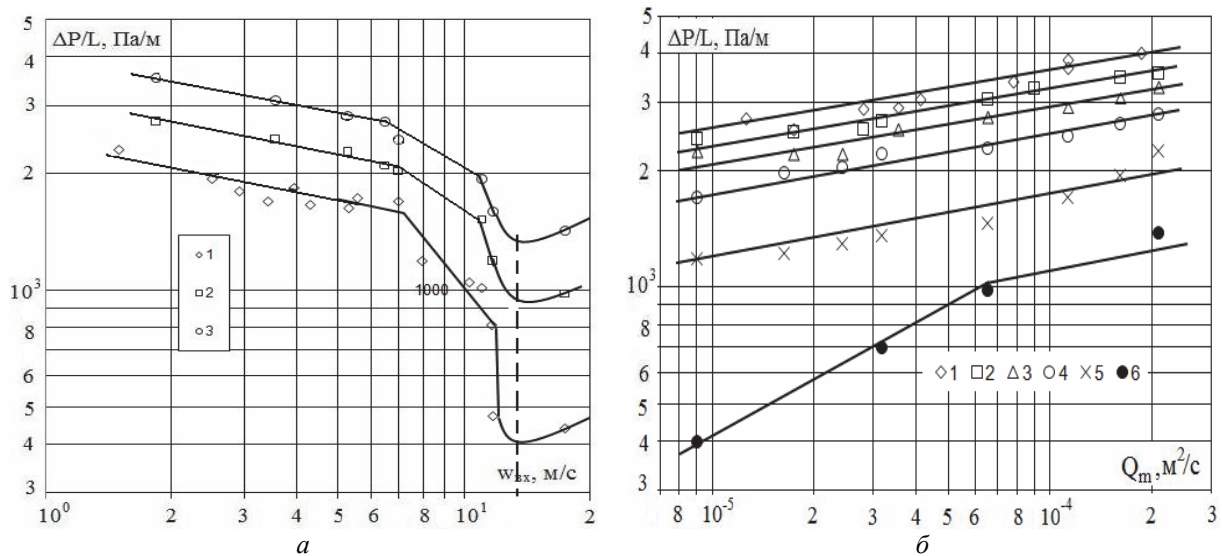


Рис. 2 – Залежність повздовжнього середнього градієнта повних втрат тиску при $d_{тр} = 0,017$ м, $d_{ш} = 5,4$ мм:

a – від приведенної швидкості повітря: 1 – $Q_m = 8,99 \cdot 10^{-6}$ м²/с; 2 – $6,56 \cdot 10^{-5}$; 3 – $2,1 \cdot 10^{-4}$;
б – від об'ємної густини зрошення: 1 – $w_{вх} = 1,84$ м/с; 2 – 2,45; 3 – 3,06; 4 – 5,26; 5 – 9; 6 – 14

При збільшенні густини зрошення якісний характер кривих $\Delta P/L = f(w_{вх})$ (рис. 2а) не змінюється. Проте збільшення витрати рідини викликає зменшення газовмісту потоку, що ускладнює утворення стійкого газового стержня в ядрі двофазового потоку і, як наслідок, забезпечує менше відносне зниження критичного значення $\Delta P/L$. При достатньо великій густині зрошення крива $\Delta P/L = f(w_{вх})$ плавно переходить через мінімум функції без провалу значень $\Delta P/L$, що пояснюється відсутністю розділу фаз при збільшенні швидкості повітря вище критичного значення. Наявність мінімуму на кривій залежності $\Delta P/L = f(w_{вх})$ пов'язане з протилежним впливом гідростатичної складової перепаду тиску та втрат на тертя на загальний перепад тиску ΔP при збільшенні швидкості повітря.

Дослідні дані (рис. 2б) свідчать про монотонний вплив густини зрошення на величину $\Delta P/L$ за винятком нижньої кривої, яка відповідає критичній швидкості повітря $w_{вх} \approx 14$ м/с. При цьому, інтенсивне зростання значень $\Delta P/L$ на першій ділянці залежності свідчить про поступове витіснення наскрізного газового стержня в центральній частині потоку та при збільшенні густини зрошення вище значення $Q_m = (6...7) \cdot 10^{-5}$ м²/с спостерігається «безпровальний» режим течії двофазового потоку при переході через критичну швидкість газу.

Отримані дослідні дані (рис. 2а), чітко фіксують перехід від барботажного до кільцевого режиму течії при незначних значеннях витрати рідини (густини зрошення). Цьому переходу відповідає провал в залежності перепаду тиску при досягненні деякої швидкості газу (повітря), яка рівна ~ 12 м/с. Це значення і є тією критичною швидкістю газу, яка характеризує перехід від снарядного до кільцевого режиму течії. Як показали досліди, проведені на різних каналах, ця критична швидкість газу не залежить від діаметру каналу. Значення критерію стійкості яке відповідає цій швидкості, обрховане для системи повітря-вода при $t = 20$ °С, приблизно рівне $K = 2,5$.

$$K = \frac{w'' \sqrt{\rho''}}{\sqrt[4]{g\sigma(\rho' - \rho'')}} \quad (1)$$

де w'' – приведена швидкість газу, м/с; ρ' та ρ'' – відповідно густина рідини та газу, кг/м³; σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м.

Це значення критерію стійкості свідчить про те, що перехід від снарядного до кільцевого режиму течії у газорідинній системі, в якій надлишкова рідина не має можливості вилитись через нижній кінець труби, відбувається задовго до точки повороту потоку (інверсії течії плівки). Таким чином, при значеннях критерію стійкості $K = 2,5$ має місце нестійка кільцева течія, при якій частина рідини в пристінному шарі (при висхідному в цілому двофазовому потоці) тече вниз. Це цілком узгоджується з результатами аналізу про початок виникнення кільцевого режиму течії в подібних газорідинних системах, наведених у роботі [9].

Отже, наведене вище значення критерію стійкості $K = 2,5$ обмежує область бульбашково-снарядного режиму зі сторони швидкості газу. З іншої сторони, дослідні дані показують, що відмічений провал в значенні перепаду тиску зменшується при збільшенні витрати рідини і при деякому його значенні зовсім зникає, залишаючи лише явний мінімум на залежності перепаду тиску від швидкості газу. Очевидно, починаючи з цього значення, надлишок рідини порушує той рівноважний газовміст, який забезпечує вільний рух газових снарядів та який підтримується у потоці за рахунок ковзання фаз. В цьому випадку надлишок рідини приводить до додаткової турбулізації в потоці та подрібленню газових снарядів на більш мілкі бульбашки. Таким чином, це граничне значення густини зрошення Q_m або відповідного числа Фруда і визначає ту межу барботажної снарядної течії зі сторони витрати рідини, яка відповідає переходу снарядного режиму в емульсійний режим течії двофазового потоку. У відповідності з дослідними даними граничне значення густини зрошення знаходиться в таких межах $Q_m = (0,65 \dots 1,0) \cdot 10^{-4}$ м²/с.

Це значення густини зрошення також не залежить від діаметра каналу. Тоді, граничне значення плівкового числа Фруда, яке визначається як

$$Fr_{пл} = \frac{Q_m}{\delta \sqrt{g\delta}} \quad (2)$$

де Q_m – об'ємна густина зрошення, м²/с; δ – постійна Лапласа, м;

$$Fr_{пл} = 0,15 \dots 0,25.$$

Таким чином, проточний барботажний шар, при умові вільного дрейфу газової фази, знаходиться в області параметрів, які обмежені значеннями $K = 2,5$ та $Fr_{пл} = 0,15 \dots 0,25$. При цьому верхня межа емульсійного режиму по швидкості газу відповідає переходу цього режиму в дисперсно-кільцевий режим течії. Відповідні кількісні дані можна отримати з карти режимів висхідних плівкових течій рідини та

потоків пари, проте, в даний час на карту плівкових течій чітко позначена лише верхня межа переходу до встановленого дисперсно-кільцевого режиму течії. Нижня межа цього переходу, яка є одночасно верхньою межею емульсійного режиму течії, може бути вказана лише імовірно. З врахуванням карти висхідних плівкових течій в перерахунку на критерій стійкості двофазового потоку для системи повітря-вода ($K_p = 3,44 \cdot 10^3$) робочі області та межі розглянутих режимів представлені на рис. 3 в діапазоні зміни числа $Fr_{пл}$ від $1 \cdot 10^{-2}$ до 1,0.

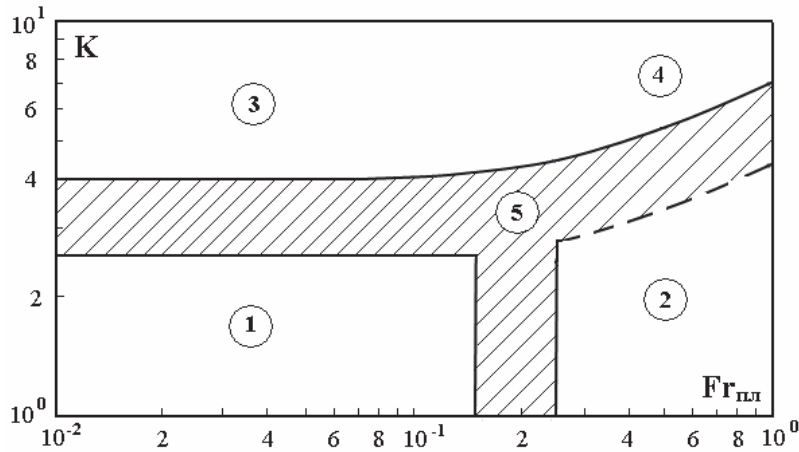


Рис. 3 – Области стійкого проточного барботажного шару та їх межі:
 1 – бульбашково-снарядний режим; 2 – емульсійний режим; 3 – кільцевий режим;
 4 – дисперсно-кільцевий режим; 5 – перехідні режими

На рис. 4а подана типова фотографія структури снарядного режиму течії двофазового потоку.

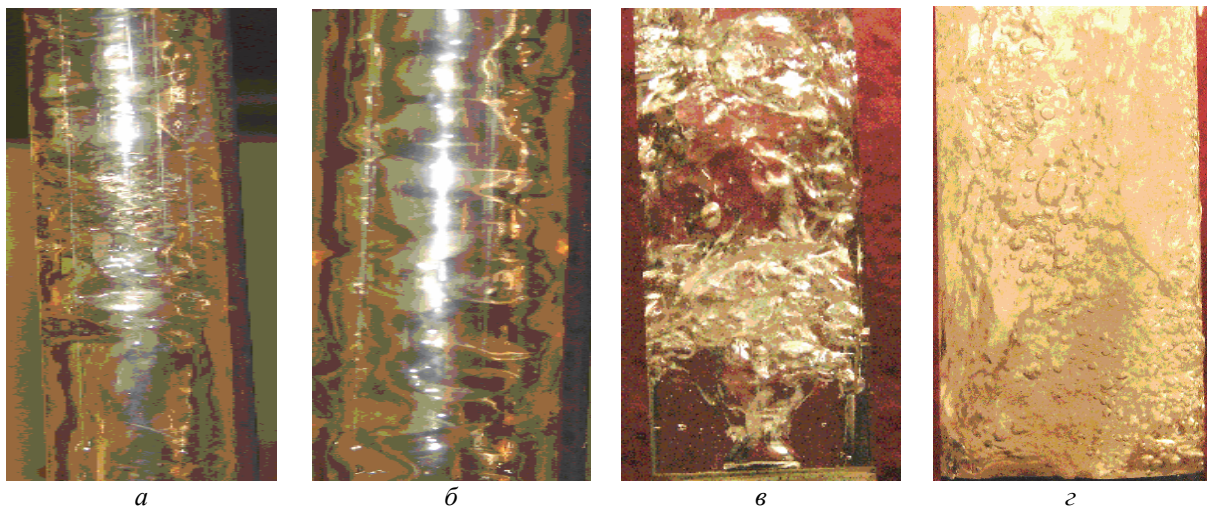


Рис. 4 – Типові структури супутнього режиму течії двофазового потоку:
 а – снарядний режим; б – кільцевий режим; в – бульбашковий режим; г – емульсійний режим

Доволі виразно видно великі несферичні бульбашки, що з помітною швидкістю рухалися відносно навколишньої рідини. Видно також і менші бульбашки, що більше наближались до сферичної форми і розташовувалися між великими снарядами. В русі ці маленькі включення тягнулися (виштовхувалися) до виходу з експериментальної труби великими. Якщо визначити число Бонда для нашого випадку ($d_{тр} = 0,041$ м –

найбільше значення діаметру труби при проведенні дослідів; температура рідини і повітря ≈ 20 °С), то воно матиме значення $Bo = 15,29$. Вкажемо тут на задовільне узгодження з даними роботи [10], де відмічалась наявність переважно снарядного режиму течії газової фази при $Bo \leq 18$.

По-друге, треба відмітити, що при проведенні дослідів спостерігався зворотній напрямок руху рідини біля стінок труби в порівнянні з рухом великих бульбашок (снарядів). При своєму русі бульбашки звільняли простір, який заповнювався рідиною, що туди втікала. Ця обставина враховувалася раніше в літературі, як при висвітлюванні впливу на швидкість підйому поодинокі бульбашки в потоці рідини кінцевих розмірів вертикального каналу [11], так і при побудові кінематичної моделі течії двофазового потоку, що була розроблена авторами роботи [12] (так званий ефект сліду при колективному русі великих бульбашок). Відмітимо, зокрема, також, що така ж картина спостерігалася і в дослідженнях [13].

Третьою особливістю течії двофазового потоку при проведенні цих дослідів був пульсаційний, з деякою часовою затримкою, характер появи на прозорій ділянці експериментальної труби снарядів (такий же характер течії спостерігався і в роботі [13]). При збільшенні витрат повітря (приведеної швидкості його) частота слідування снарядів збільшувалася. Так продовжувалося аж до появи чисто кільцевого режиму течії потоку, при якому спостерігалася відсутність будь-якого пульсаційного характеру течії і повне розшарування фаз: висхідна течія плівки рідини (іноді з наявністю хвиль на її поверхні) по стінці труби і супутнє їй повітряне ядро потоку. Такий режим течії двофазового потоку можна спостерігати на рис. 4б.

Проводилось візуальне спостереження течії фаз в районі місця вводу повітря в супутній йому потік рідини, тобто, на початковій ділянці формування двофазового потоку.

При середній швидкості повітря (в перерізі отворів шайби) $w_{\text{отв}} \leq 25$ м/с на поверхні шайби над отворами для вводу повітря в потік рідини утворювалося скупчення бульбашок, форма яких близька до сферичної і діаметр – не набагато більший за діаметр отворів в шайбі. Потім на віддалі (висоті) $\sim 30\text{--}35$ мм від шайби це скупчення періодично генерувало великі несферичні бульбашки (снаряди), що можна спостерігати на рис. 4в.

При $w_{\text{отв}} > 25$ м/с витік повітря через отвори в шайбі здійснювався у вигляді вже струменів (звичайно перехід від бульбашкового до струменевого витоку повітря через отвори шайби настував не миттєво (мав місце певний перехідний процес), які теж на висоті $\sim 30\text{--}35$ мм від шайби розпадалися на газові включення неправильної форми, конгломерат яких теж періодично генерував снаряди (рис. 4г).

Висновки

Виходячи з вище наведеного можна зробити такі висновки:

1) В роботі визначена область існування проточного барботажного шару, яка обмежена параметрами критерію стійкості Кутателадзе $K = 2,5$ та плівкового числа Фруда $Fr_{\text{пл}} = 0,15 \dots 0,25$.

2) При збільшенні приведеної швидкості газу до значень близьких до швидкості інверсії плівки у вертикальному каналі та відносно невеликій густині зрошення ($Fr_{\text{пл}} < 0,15 \dots 0,25$) проточний барботажний шар переходить у роздільний (кільцевий) режим течії двофазового потоку.

3) Забезпечення режиму стійкого проточного двофазового шару може бути досягнуто у всьому діапазоні зміни швидкості газу при густині зрошення вище

значення $Q_m = (6...7) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Список літератури: 1. Аронов, И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа [Текст] / И. З. Аронов. – Л.: Недра, 1990. – 280 с. 2. Декларацийний патент на корисну модель № 22852 України, МПК F24H6/00. Нагрівник текучої рідини / Безродний М. К., Назарова І. О., Костюк О. П.; Заявник та власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u2006 13907; заявл. 27.12.2006; опубл. 25.04.2007, Бюл. № 5. 3. Безродний, М. К. Гидравлическое сопротивление при восходящем спутном течении пленки жидкости и газа в вертикальных трубах [Текст] / М. К. Безродный, И. А. Назарова, С. А. Хавин // Промышленная теплотехника. – 2004. – № 2. – С. 13–18. 4. Безродний, М.К. Гидравлическое сопротивление восходящего потока газа и пленки жидкости в вертикальных трубах [Текст] / М. К. Безродный, И. А. Назарова // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2005. – № 2. – С. 35–41. 5. Безродний, М. К. Тепломассообмен при спутном восходящем течении газа и жидкости [Текст] / М. К. Безродный, С. А. Хавин, И. А. Назарова // Промышленная теплотехника. – 2003. – № 1. – С. 23-28. 6. Безродний, М. К. Тепломассообмен при конденсации водяных паров из парогазовой смеси в восходящем потоке с пленкой жидкости [Текст] / М. К. Безродный, И. А. Назарова, С. А. Хавин // Промышленная теплотехника. – 2003. – № 4. – С. 26–30. 7. Сорокин, Ю. Л. Исследование устойчивости пленочного режима течения жидкости в вертикальной трубе при восходящем движении фаз [Текст] / Ю. Л. Сорокин, А. Г. Кирдяшкин, Б. Г. Покусаев // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1965. – № 5. – С. 35–38. 8. Пушкина, О. Л. Опрокидывание движения пленки жидкости в вертикальных трубах [Текст] / О. Л. Пушкина, Ю. Л. Сорокин // Труды ЦКТИ. – 1969. – Вып. 96. – С. 34–39. 9. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения [Текст] / Г. Уоллис. – М.: Мир, 1972. – 440 с. 10. Безродний, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика [Текст] / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. – Киев: Факт, 2005. – 704 с. 11. Кутателадзе, С. С. Гидродинамика газожидкостных систем [Текст] / С.С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с. 12. Лабунцов, Д. А. Паросодержание двухфазного адиабатного потока в вертикальных каналах [Текст] / Д. А. Лабунцов, И. П. Корнюхин, И. Э. Захарова // Теплоэнергетика. – 1968. – № 4. – С. 62–67. 13. Омар, Х. Гидродинамика и структура двухфазного потока при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра [Текст] / Х. Омар, Ю. Е. Похвалов // Теплоэнергетика. – 2006. – № 4. – С. 74–77. 14. Безродний, М. К. Гидродинамика проточного барботажного слоя в вертикальном канале [Текст] / М. К. Безродный, П. А. Барабаш, И. А. Назарова, А. П. Костюк // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 4. – С. 27–33.

Bibliography (transliterated): 1. Aronov, I. Z. *Kontaknyj nagrev vody produktami sgoranija prirodnogo gaza*. Leningrad: Nedra, 1990. Print. 2. Bezrodnyj, M. K., I. O. Nazarova, and O. P. Kostjuk. "Nagrivnyk tekuchoi ridyny." U Patent 22852 (MPK F24H6/00). 25 April 2007. 3. Bezrodnyj, M. K., I. A. Nazarova and S. A. Havin. "Gidravlichesкое soprotivlenie pri voshodjashhem sputnom techenii plenki zhidkosti i gaza v vertikal'nyh trubah." *Promyshlennaja teplotehnika* 2 (2004): 13–18. Print. 4. Bezrodnyj, M. K., and I. A. Nazarova. "Gidravlichesкое soprotivlenie voshodjashhego potoka gaza i plenki zhidkosti v vertikal'nyh trubah." *Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija* 2 (2005): 35–41. Print. 5. Bezrodnyj, M. K., S. A. Havin and I. A. Nazarova. "Teplomassoobmen pri sputnom voshodjashhem techenii gaza i zhidkosti." *Promyshlennaja teplotehnika* 1 (2003): 23–28. 6. Bezrodnyj, M. K., I. A. Nazarova and S. A. Havin. "Teplomassoobmen pri kondensacii vodjanyh parov iz parogazovoj smesi v voshodjashhem potoke s plenkoj zhidkosti." *Promyshlennaja teplotehnika* 4 (2003): 26–30. Print. 7. Sorokin, Ju. L., A. G. Kirdjashkin and B. G. Pokusaev. "Issledovanie ustojchivosti plenochного rezhima techenija zhidkosti v vertikal'noj trube pri voshodjashhem dvizhenii faz." *Himicheskoe i nefljanoe mashinostroenie* 5 (1965): 35–38. Print. 8. Pushkina, O. L., and Ju. L. Sorokin. "Oprokidyvanie dvizhenija plenki zhidkosti v vertikal'nyh trubah." *Trudy CKTI* 96 (1969). 34–39. Print. 9. Uollis, G. *Odnomernye dvuhfaznye techenija*. Moscow: Mir, 1972. Print. 10. Bezrodnyj, M. K., I. L. Pioro and T. O. Kostjuk. *Processy perenosa v dvuhfaznyh termosifonnyh sistemah. Teorija i praktika*. Kiev: Fakt, 2005. Print. 11. Kutateladze, S. S., and M. A. Styrikovich. *Gidrodinamika gazozhidkostnyh sistem*. Moscow: Jenergija, 1976. Print. 12. Labuncov, D. A., I. P. Kornjuhin and I. Je. Zaharova. "Parosoderzhanie dvuhfazного adiabatного potoka v vertikal'nyh kanalah." *Teplenergetika* 4 (1968): 62–67. Print. 13. Omar, H., and Ju. E. Pohvalov. "Gidrodinamika i struktura dvuhfazного potoka pri barbotazhnom rezhime v trubah nebol'shого diametra." *Teplenergetika* 4 (2006): 74–77. Print. 14. Bezrodnyj, M. K., et al. "Gidrodinamika protochnого barbotazhного sloja v vertikal'nom kanale." *Promyshlennaja teplotehnika* 31.4 (2009) 27–33. Print.

Надійшла (received) 14.02.2014