

**СТРУКТУРА ГАЗОРИДИННОГО ПОТОКУ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ
ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО АПАРАТА ЗІ СТРУМЕНЕВО-ІНЖЕКЦІЙНИМ
ГАЗОНАПОВНЕННЯМ**

ДВНЗ „Український державний хіміко-технологічний університет”, м. Дніпропетровськ

Розглянуто структуру потоку та режими роботи у вертикальних низхідних каналах апаратів циркуляційного типу за рахунок струменево-інжекційного газонаповнення. Досліджено умови газонаповнення у вертикальних низхідних каналах. Показано перспективи використання режиму підвисання газової фази у вертикальних каналах апарата для забезпечення високого ступеню конверсії газової фази при проведенні процесів абсорбції однокомпонентних газів (O_2 , O_3 , CO_2 , тощо) у хімічній, біохімічній та харчовій промисловостях.

Апарати циркуляційного типу широко використовуються в хімічній, біохімічній та харчовій промисловостях для проведення масообмінних, реакційно-масообмінних процесів в рідинних, газорідинних та інших системах. Одними з перспективних є струменеві апарати з циркуляційним контуром [1,2], які мають деякі переваги над барботажними, газліфтними та ерліфтними апаратами при проведенні процесів абсорбції газової фази [3]. Відомо, що інжекційна спроможність вільного струменя рідини у вертикальних низхідних каналах може бути використана для газонаповнення реакційного об'єму при проведенні процесів абсорбції однокомпонентних газів [4].

Використання енергії рідини для газонаповнення реакційного простору є перспективним методом для зменшення витрат на проведення процесу абсорбції газу (O_2 , O_3 , CO_2 , тощо) [5]. Це дозволяє уникнути додаткових витрат на подачу газу та збільшити час контакту рідини з газом за рахунок циркуляції по газовій фазі і, як наслідок, підвищити ступінь конверсії газової фази.

Газонаповнення за рахунок струменево-інжекційного ефекту відбувається як за рахунок енергії струменя рідини [1–5], так і за рахунок вільного перетікання рідини у вертикальні низхідні канали [6–9]. Дослідження умов газонаповнення та структури газорідинного потоку у вертикальних низхідних каналах при газонаповненні за рахунок енергії струменя рідини дозволили розробити низку перспективних апаратів, що ефективно використовуються в харчовій промисловості [1–5]. Апарати, у яких для газонаповнення використовується струменево-інжекційний ефект при вільному перетіканні рідини у верти-

кальні труби менш застосовані, що пов'язано з недостатнім дослідженням умов і режимів газонаповнення [6–9]. Найбільш відомим є апарат австрійської фірми Фогельбуш [9], який використовувався в якості шахтного ферментатора. Дослідження умов газонаповнення та газорідинного потоку в апаратах циркуляційного типу дозволить ефективно використати інжекційно-струмений ефект для газонаповнення в апараті в сукупності з такими перевагами, як: висока кратність циркуляції за рідинною фазою та компактність конструкції апарата.

Запропонована методика для розрахунку умов формування вихрової воронки, що призводить до інжекційно-струменевого захоплення газової фази в низхідному каналі [6]. Встановлено, що на виникнення вихрової воронки впливають такі параметри: діаметр зливного отвору D ; геометрія підводу до нього рідини δ ; швидкість рідини в опускній трубі u ; масштаб сили тяжіння $g \cdot (\rho_1 - \rho_2)$; щільність рідини ρ_1 ; масштаб динамічного напору в зливному отворі $\rho_1 \cdot u^2$; в'язкість рідини μ_1 та поверхневий натяг рідини σ . Умови, при яких відбувається захоплення газової фази, в загальному вигляді описується наступним рівнянням:

$$\bar{\delta}_{кр} = f(Fr; Ar) . \quad (1)$$

В рівнянні (1) $\bar{\delta}_{кр} = \delta/D$ – безрозмірний критерій; $\bar{\delta}_{кр} = d_{кр}/D$, де $d_{кр}$ – критичний запас рідини над зливним отвором каналу діаметром D , Fr – критерій Фруда, $Fr = u^2 / g \cdot \Delta \rho \cdot D$, $Ar = g \cdot \Delta \rho \cdot D^3 / \nu^2$ – критерій Архімеда. Авторами

показано, що при значеннях критерію Рейнольдса $Re > Re_{кр}$, тобто при розвиненій турбулентній течії, має місце автомодельність відносно в'язкості, і як наслідок, критерій Ag можна не враховувати. Показано, що при критичному значенні рідини над зливним отвором $\delta_{кр}$ відбувається формування вихрової воронки і, як наслідок, газ захоплюється воронкою при $\bar{\delta} < \bar{\delta}_{кр}$. Для умов вільного переливу рідини рівняння (1) можна записати наступним чином:

$$\bar{\delta}_{кр} = 0,5 \cdot Fr^{1/4}. \quad (2)$$

Таким чином, умови захоплення газу рідиною воронкою для певних умов можна описати рівнянням (2).

Газонаповнення в низхідних каналах за рахунок інжекційно-струменевого ефекту при формуванні зливної воронки досліджено для зливних патрубків масообмінних тарілок колонних апаратів [7]. Встановлено умови при яких відбувався захоплення газу та визначено газонасичення в зливних патрубках у залежності від витрати рідини $\varphi = f(L_0)$. Умови початку захоплення газової фази воронкою відповідають витраті рідини, при якій швидкість рідини становить $w_{ж} = 0,1 - 0,22$ м/с. При подальшому збільшенні витрати рідини відповідно збільшувався захоплення газу, а при швидкості $w_{ж} \approx 0,8$ м/с над зливним порогом утворювалась стійка воронка і газонасичення становило $\varphi = 0,5$. Подальше зростання витрати рідини призводило до зменшення газомісту в наслідок зміни стійкості воронки і такі конструктивні параметри, як довжина та діаметр зливного патрубка, не мали впливу. Встановлено залежність критичного запасу рідини $H_{кр}$ над зливним патрубком, при якому мав місце захоплення газу:

$$H_{кр}^3 = \left(\frac{\mu_0 D}{4m} \right)^2 \left(H_{кр} + 1 - \frac{\Delta P_{и}}{\rho_p} \right). \quad (3)$$

У формулі (2) μ_0 , m – коефіцієнти, які залежать від гідрравлічних та конструктивних параметрів; $\Delta P_{и}$ – підпір зі сторони тарілки; ρ_p – щільність рідини.

В апаратах з перемішувачами пристроями струменево-інжекційний захоплення газової фази воронкою відбувався в зоні встановлення відбійних перегородок, коли вони виступали над рівнем рідини в реакторі [8]. Гідродинамічна картина в апараті, при якій утворювалась воронка, залежала від інтенсивності циркуляції рідини, яку забезпечувала мішалка. Таким чином, газова фаза насичувала реакційний об'єм у залежності від рівня рідини в апараті і числа обертів мішалки. Залежність для розрахунку числа обертів мішалки n_0' , при яких відбувається явище захоплення газу, має

вигляд

$$\left(\frac{\mu n_0' d_m^2}{D \sigma} \right) \left(\frac{\rho \sigma^3}{g \mu^4} \right)^{1/4} = 2 \left(\frac{H - h_m}{D} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

У формулі (4) – d_m – діаметр мішалки, м; D – діаметр апарата, м; H – рівень рідини в апараті, м; h_m – висота розташування мішалки, м. Залежність (4) отримано для турбінної мішалки, максимальне газонаповнення для апарата становило $\varphi = 0,3$, а величина n_0' залежала від відстані між мішалкою і поверхнею рідини h_n . Діапазон виникнення явища знаходиться в межах:

$$Fr_{від.} \cdot \left(\frac{d_m}{h_n} \right) = 0,36, \quad (5)$$

де $Fr_{від.} = (n_0')^2 \cdot d_m / g$ – відцентровий критерій Фруда.

У випадках [6–8] захоплення газової фази обумовлений виникненням нестационарної воронки в зоні переливу рідинного потоку у низхідний канал з вільного простору. Слід зазначити, що в цих випадках не враховувались відцентрові сили закручування потоку. Характерною була наявність низхідної газорідинної течії в вертикальних трубах [10]. Умови виникнення явища обумовлені розвиненням турбулентної течії та вихрами при низхідному русі газорідинного потоку. Захоплення газової фази відбувався на поверхні рідини в містах переливу, і важливе значення в цьому мали: критичний запас рідини над переливом – $\delta_{кр}$ [6] або $H_{кр}$ [7]; гідродинамічна картина в апараті – Fr [6] або $Fr_{від}$ [8]; геометрія зливного отвору – D [6,7]; та швидкість рідини – u [6] та $w_{ж}$ [7]. Захоплення газової фази з поверхні рідини у випадках [1–5] відрізнявся тим, що основною руйнівною силою був струмінь рідини, який витікає з насадки, далі струмінь попадав на поверхню рідини в низхідному каналі, захоплював газову фазу і утворював низхідну газорідинну течію.

Таким чином, струменево-інжекційней захоплення газу з поверхні рідини воронкою зустрічається як явище в багатьох видах обладнання і може бути ефективно використаним для створення газорідинного шару в апараті без додаткового енергетичного устаткування для подачі газової фази (компресор, газодувка, тощо). Найбільш перспективним для дослідження є режим підвисання газової фази у вертикальних низхідних каналах [7]. За таких умов забезпечується оптимальний час перебування газової фази в апараті, який не обмежений швидкістю спливання газової фази (ерліфтні, газліфтні апарати), або швидкістю газорідинного потоку [1–5]. За рахунок оптимального часу перебування газової фази в реакційно-

му об'ємі можна забезпечити найповнішу конверсію газової фази (абсорбція O_2 , O_3 , CO_2 , тощо).

Газонаповнення за рахунок струменево-інжекційного ефекту було запропоновано використати в апараті циркуляційного типу з двома опускаючими трубами та циркуляційною трубою, в якій було розташовано мішалку, що забезпечувала циркуляцію рідинного потоку [10]. Така конструкція апарата забезпечує високу кратність циркуляції за рідинною фазою, у сукупності зі струменево-інжекційним ефектом газонасичення вертикальних низхідних каналів. Апарат може бути ефективно використаним для проведення газорідинних процесів як в умовах циркуляції за газорідинним потоком, так і в умовах підвищування газової фази у вертикальних низхідних каналах. Перевагами цього технічного рішення є: компактність конструкції апарата, так як циркуляція за газорідинним потоком та струменево-інжекційний ефект газонасичення забезпечується перемішувачем в циркуляційній трубі апарата, і не потребує зовнішнього циркуляційного насоса та додаткових ємностей [1–5]; висока кратність циркуляції за рідинною фазою, що дозволяє проводити процес у більш інтенсивних умовах при низькому гідравлічному опорі циркуляційного контура, на відміну від відомих технічних рішень [1–5].

Для визначення діапазона стійкої роботи та можливих режимів роботи апарата циркуляційного типу зі струменево-інжекційним газонаповненням у вертикальних низхідних каналах досліджено висоту газорідинного шару $H_{гр}$ в залежності від запасу рідини над переливом $h_{пер}$, та числа обертів мішалки n . Запас рідини над переливом ($h_{пер}$) дозволив визначити вплив вихрової воронки на умови захоплення газу. Число обертів мішалки (n) визначало гідродинамічну картину в апараті за рахунок забезпечення циркуляції рідини. Для здійснення досліджень було розроблено експериментальну установку (рис. 1). Модельний реактор 1 складався з бокових низхідних труб і центральної циркуляційної труби. Труби знизу були з'єднані перетоком, а зверху – сепараційним простором. В центральній циркуляційній трубі було розташовано мішалку 2. Апарат працював наступним чином: перемішувач піднімав рідину у сепараційний простір з нижнього перетоку; рідина розподілялась по сепараційному простору і переливалась у бокові низхідні труби, при цьому в місцях переливу утворювались вихрові воронки, в яких мав місце струменево-інжекційний ефект захоплення газу. Експеримент здійснювали на модельних середовищах вода – повітря.

Умови здійснення експерименту надано в таблиці.

Аналіз експериментальних даних виконано за допомогою розрахунку коефіцієнтів статисти-

чної моделі процесу [12] у вигляді:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n \quad (6)$$

Технологічні параметри

Параметр	Значення
Число обертів валу мішалки n , об./хв	500; 625; 750; 825; 1000
Запас рідини над переливом $h_{пер}$, мм	5; 10; 15; 20; 25; 30

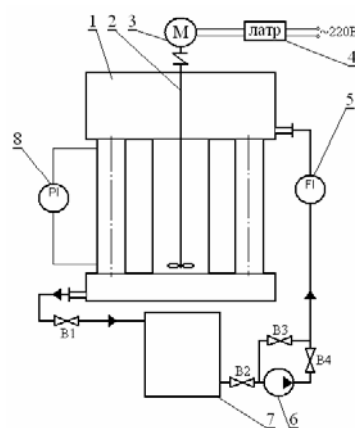


Рис. 1. Експериментальна установка: 1 – лабораторний реактор; 2 – ротор перемішувача; 3 – електродвигун; 4 – лабораторний автотрансформатор; 5 – ротаметр; 6 – відцентровий насос; 7 – бак; 8 – диференціальний манометр

У рівнянні (6) вільний член a_0 та коефіцієнти регресії a_i отримано методом множинної кореляції [13]. Параметри y та x_i визначено наступним чином: $y = \ln(H_{гр})$, $x_1 = \ln(h_{пер})$, $x_2 = \ln(n)$. Після перетворення за допомогою операції потенціювання, модель процесу має вигляд:

$$H_{гр} = e^{a_0} h_{пер}^{a_1} n^{a_2} \quad (7)$$

На рис. 2 наведена залежність висоти газорідинного шару ($H_{гр}$) в бокових низхідних трубах апарата від числа обертів (n) мішалки в циркуляційній трубі.

Експериментальні дані (рис. 2) демонструють, що в залежності від висоти запасу рідини над переливом $h_{пер}$ можна виділити три режими роботи апарата за умовами газонасичення в реакційній трубі: перший – для $h_{пер} = 30, 25$ та 20 мм; другий – для $h_{пер} = 15$ та 10 мм; третій – для $h_{пер} = 5$ мм.

Для першого режиму роботу характерне швидке зростання висоти газорідинного потоку в реакційній трубі до максимального значення $H_{гр}$ [7,8]. Режим роботи полягає в тому, що при чис-

лах обертів від 500 до 625 утворюється вихрова воронка над боковими низхідними трубами, в яких відбувається незначне захоплення газу з накопиченням його в режимі підвисання в верхній частині труб, а нижня частина воронки лежить над площиною переливу. При числах обертів від 750 до 1000 стрімко зростає висота газорідинного потоку і апарат вже працює в режимі циркуляції за газорідинним потоком, а нижня частина воронки лежить на межі переливу з сепараційного простору у бокові низхідні труби. Такий режим відрізняється низькою упаковкою реакційної труби бульбашками газу і, як наслідок, невеликим значенням газонасичення.

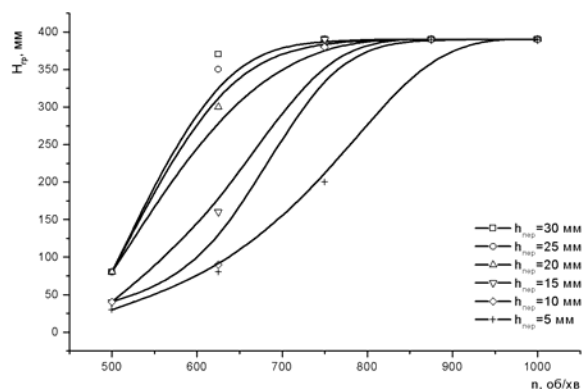


Рис. 2. Залежність висоти газорідинного шару в бокових низхідних трубах ($H_{гр}$) від числа обертів (n) мішалки в циркуляційній трубі

Для другого режиму роботи характерне поступове збільшення газорідинного потоку. При числах обертів від 500 до 625 відбувається захоплення газу в верхній частині бокових низхідних труб зі щільною упаковкою бульбашок і великим локальним газонасиченням. При числах обертів від 750 до 925 поступово зростає насичення бульбашкам бокових низхідних труб, а подальше підвищення числа обертів мішалки призводить до циркуляції газорідинного потоку через центральну циркуляційну трубу. Нижня частина воронки при таких запасах рідини над переливом розташована нижче лінії переливу. При таких умовах має місце більш інтенсивне захоплення газу. Режим відрізняється високою упаковкою бульбашок по висоті бокових низхідних труб і, як наслідок, великим локальним газонасиченням [6,7].

Для третього режиму характерним є формування переливу рідини по периметру переливного отвору низхідних труб без утворення стійкої воронки. Інжекція газу відбувається в низхідних трубах на відстані від переливу більшої за діаметр зливного отвору. Для такого режиму характерним є найменший середній діаметр бульбашок і велика упаковка бульбашок. Слід зазначити, що інтенсивність захоплення газу менша за другий режим

роботи, що описаний раніш [4,5,9].

На рис. 3 надано структуру газорідинного шару у вертикальних низхідних трубах апарата при числах обертів 625 об./хв. При запасі рідини над переливом 30 мм для газорідинного шару характерною є низька упаковка бульбашок і така картина зберігалась при збільшенні числа обертів до режиму циркуляції за газорідинним потоком (рис. 3,а). При запасі рідини 15 мм отримано щільну упаковку низхідного каналу бульбашками і, як наслідок, велике насичення газом (рис. 3,б). При запасі рідини 5 мм отримано більш повну упаковку низхідного каналу бульбашками; висота газорідинного шару зменшилась (рис. 3,в); при подальшому збільшенні числа обертів до 750 об./хв мала місце щільна упаковка низхідної труби бульбашками при збереженні режиму підвисання газової фази (рис. 3,г).

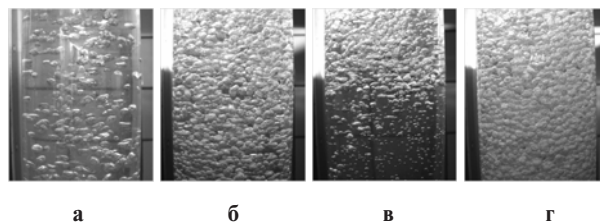


Рис. 3. Структура газорідинного потоку в залежності від запасу рідини над переливом: а – $h_{пер}=30$ мм, $n=625$ об./хв; б – $h_{пер}=15$ мм, $n=625$ об./хв; в – $h_{пер}=5$ мм, $n=625$ об./хв; г – $h_{пер}=5$ мм, $n=750$ об./хв

Виконано статистичний аналіз отриманих даних за рівнянням (7). Для всього діапазона експериментальних даних отримано коефіцієнт детермінації $R^2=0,87$, який є достатнім з урахуванням допустимої похибки, яка спостерігалася при дослідженні гідродинаміки газорідинних потоків. Аналіз коефіцієнтів a_1 та a_2 показав, що $|t_{a1}|=0,518 < t_c=1,323$, $|t_{a2}|=8,178 > t_c=1,323$, де t_c – табличне значення критерію Стюдента для чисел свободи $f=21$ та ймовірності $p=0,8$ [13]. Результати аналізу критерію Стюдента показали, що висота запасу рідини над переливом не є значимою для всього діапазона експериментальних даних. Для урахування в рівнянні (7) висоти запасу рідини над переливом, необхідно окремо розглянути режим поступового газонаповнення в вертикальних низхідних трубах і режим циркуляції газорідинного потоку.

Аналіз рівняння (7) з урахуванням лише режиму поступового зростання $H_{гр}$ без циркуляції газорідинного потоку показав, що коефіцієнт детермінації $R^2=0,90$ є значно більшим, ніж для попередньої вибірки експериментальних даних. Аналіз коефіцієнтів a_1 та a_2 показав, що $|t_{a1}|=1,363 > t_c=1,345$, $|t_{a2}|=8,009 > t_c=1,345$, значення критерію Стюдента для чисел свободи $f=14$ та ймовірності $p=0,8$ [13]. Таким чином, висота рідини над переливом ($h_{пер}$) та число обертів вала перемішуючого пристрою (n) є значимими для об-

раного діапазона даних.

Аналіз експериментальних і статистичних даних показав, що в апаратах циркуляційного типу зі струменево-інжекційним наповненням газом, режим з поступовим упакуванням газорідного потоку без циркуляції за газовою фазою може бути ефективно використаним для процесів абсорбції з максимальною конверсією газової фази, яка досягається завдяки підвищенню газової фази в низхідних трубах [14]. Для дослідженого режиму отримано рівняння:

$$N_{гр} = 2 \cdot 10^{-12} \cdot h_{пер}^{0,488} \cdot n^{4,733} \quad (8)$$

Рівняння (8) отримано для системи вода–повітря в апараті експериментальної конструкції (рис. 1) з діаметром реакційної труби 80 мм, діаметром циркуляційної труби 110 мм, висотою труб 390 мм, мішалкою пропелерного типу діаметром 70 мм.

На рис. 4 надано межу режимів підвисання газової фази та циркуляції газорідного потоку в вертикальних низхідних трубах апарата.

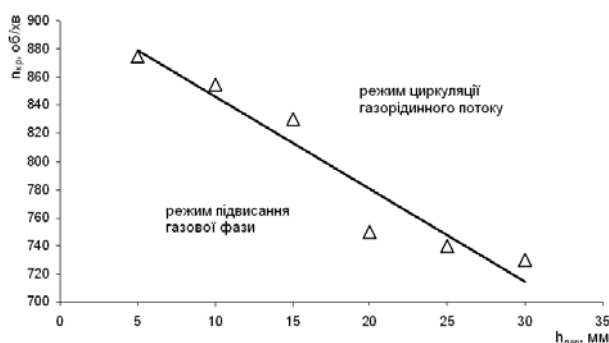


Рис. 4. Межа режимів підвисання газової фази та циркуляції газорідного потоку

Рис. 4 демонструє, що при запасі рідини над переливом 20–30 мм режим циркуляції відбувається при числах обертів мішалки близька 740 об./хв, газорідний потік відрізняється низькою щільністю упаковки. Час перебування газової фази визначається швидкістю циркуляції в апараті. При запасі рідини над переливом 5–15 мм режим циркуляції відбувається при числах обертів мішалки близька 840 об./хв, газорідний потік має щільну упаковку. Такий режим більш ефективний як в умовах підвищення газової фази, так і в умовах циркуляції газорідного потоку.

Отримано рівняння для визначення критичного числа обертів $n_{кр}$, при якому відбувається режим циркуляції газорідного потоку:

$$Fr_{кр} h_{пер}^{0,225} = 2,3 \quad (9)$$

де $Fr_{кр}$ – критичне значення відцентрового критерію Фруда, $Fr_{кр} = (n_{кр})^2 \cdot d_m / g$. Рівняння (9) встановлює межу між дослідними режимами підвисання газової фази в вертикальних низхідних трубах апарата та циркуляції газорідного потоку в апараті (рис. 4).

Таким чином, досліджено структуру потоку в низхідних трубах циркуляційного апарата зі струменево-інжекційним наповненням газу. Встановлено, що мають місце два режими роботи апарата: режим підвисання газової фази та режим циркуляції газорідного потоку. Отримано рівняння для визначення висоти газорідного шару в низхідних трубах в режимі підвисання газової фази. Показано межі виникнення режимів і отримано рівняння, що їх визначають. Отримані результати дозволяють визначити найбільш оптимальні умови роботи апарата. Для розробки інженерної методики розрахунку експериментальної конструкції апарата необхідні подальші дослідження газомісту та поверхні контакту фаз в низхідних трубах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
2. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
3. Яблокова М.А., Соколов В.Н., Сугак А.В. Гидродинамика и массоперенос при струйном аэрировании жидкостей // Теоретические основы химической технологии. 1988. – № 6. – С.734-739.
4. Соколов В.Н., Яблокова М.А., Сугак А.В. Инжектирующая способность свободной струи жидкости // Известия ВУЗов. Сер. Химия и химическая технология. – 1987. – Т.30. – № 3. – С.109-111.
5. Сивенков А.В. Интенсификация гидродинамических процессов в струйных аппаратах пищевой промышленности: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.18.12. – СПбГУНиПТ. – Санкт-Петербург, 2011. – 16 с.
6. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. – Новосибирск.: Наука, 1984. – 320 с.
7. Трубки В.Е., Чепура И.В., Павлов В.П. Исследование гидродинамики сливных устройств с защищенным переливом в тарельчатых колонных аппаратах // Теоретические основы химической технологии. – 1972. – № 6. – С.900-907.
8. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. – Л.: Химия, 1984. – 336 с.
9. Соколов В.Н., Яблокова М.А. Аппаратура микробиологической промышленности. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 278 с.
10. Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускного пузырькового течения / О.Н. Кашинс-

кий, В.В. Рандин, П.Д. Лобанов, Г.В. Богословцев // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т.12. — № 4. — С.637-643.

11. *Оптимизация* аппаратного оформления стадии аммонизации в производстве комплексных минеральных удобрений / В.В. Ведь, В.Л. Юшко, С.Г. Птицин, В.А. Яриз // *Вопр. химии и хим. технологии*. — 2008. — № 1. — С.159-163.

12. *Tasdemir T., Tasdemir A., Oteyaka B.* Gas entrainment rate and flow characterization in downcomer of a Jameson cell // *Physicochem. Probl. Miner. Process.* — 2011. — № 47. — P.61-78.

13. *Ахназарова С.Л., Кафаров В.В.* Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. — М.: Высш. шк., 1985. — 327 с.

14. *Агаев К.Э., Сивенков А.В., Новоселов А.Г.* Структура газожидкостного потока в трубах КСИА в условиях начального устойчивого режима работы // *Процессы и аппараты пищевых производств*. — СПбГУНиПТ. — 2012. — № 6. — С.2-9.

Надійшла до редакції 27.02.2013