

УДК 66.011 (045)

КОРНІЄНКО Б. Я., к.т.н., доцент
Національний авіаційний університет (м. Київ)

ДИНАМІКА ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

За допомогою двофазної моделі Ейлера-Ейлера досліджено процеси зневоднення та грануллювання у псевдозрідженому шарі. Одержано переходні характеристики тиску гранул, температури гранул та аксіальні швидкості теплоносія у центральній і периферійних точках апарату псевдозрідженого шару.

Ключові слова: моделювання, псевдозріджений шар, зневоднення, грануллювання.

Постановка проблеми

Основною вимогою до сільського господарства на сучасному етапі розвитку є впровадження принципів раціонального землекористування та ефективних енергозберігаючих технологій. Суттєве значення має виробництво мінеральних добрив нового покоління. Застосування техніки псевдозрідження для одержання твердих композитів із заданими властивостями за наявності фазових переходів дозволяє сумістити низку технологічних стадій. Основою функціонування апаратів із псевдозрідженням шаром, що застосовують для зневоднення й грануллювання, є використання спрямованого циркуляційного руху зернисто-го шару, температурної дифузії, ускладненої турбулентністю й міжфазовим переходом. Створення та дослідження математичної моделі процесів зневоднення та грануллювання у псевдозрідженому шарі з урахуванням їх стохастичної природи є актуальною задачею.

Аналіз попередніх досліджень

Існує декілька математичних моделей процесів переносу в дисперсних системах, що мають різний рівень деталізації. З метою проектування систем теплопередачі в псевдозрідженому шарі створено механістичні моделі для прогнозування коефіцієнтів теплопередачі. Відомий підхід, що ґрунтуються на швидкоплинній провідності між частинками й поверхнею. Можна виокремити моделі окремих частинок і моделі емульсійних фаз [1].

Застосування моделі двофазного потоку має переваги перед іншими моделями, тому що ця модель не потребує вхідних емпіричних параметрів. Двофазний підхід застосовували в моделі теплопередачі, яка описує модель збереження маси, рівняння моментів і теплової енергії у векторній формі [2]. Проте ця модель не враховує турбулентності.

Оскільки для зневоднення й грануллювання у псевдозрідженому шарі характерний двофазний спрямований рух шару, що забезпечується організацією процесу, зокрема конструкцією газорозподільної решітки, то для математичного моделювання слід використати саме двофазний підхід Ейлера-Ейлера [3].

Метою статті є дослідження динаміки зневоднення та грануллювання у псевдозрідженому шарі за допомогою двофазної моделі Ейлера-Ейлера.

Виклад основного матеріалу

У дослідженні використовували двофазну модель Ейлера-Ейлера. Об'єму частку кожної фази розраховували з рівняння нерозривності. Рівняннями імпульсу для кожної фази враховували масообмін між фазами, наявність підйомної сили і сил, що залежать від взаємодії зріджувального агенту з твердими частинками на межі фаз:

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho_{ri}} \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i V_i) \right] = \sum_{j=1}^2 (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}) \\ \frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_i \rho_i V_i) + (\alpha_i \rho_i V_i \cdot \nabla) V_i = -\alpha_i \nabla p_i + \nabla \cdot \tau_i + \alpha_i \rho_i g + \sum_{j=1}^2 [R_{ji} + \dot{m}_{ji} V_{ji} - \dot{m}_{ij} V_{ji}] + F_i + F_{lift,i} + F_{vm,j}; \quad i = \overline{1, 2} \\ \frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_i \rho_i h_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i V_i h_i) = -\alpha_i \frac{\partial p}{\partial \tau} + \tau_i : \nabla V_i + \nabla \cdot (\lambda_i \nabla T_i) + S_i + \sum_{j=1}^2 [Q_{ji} + \dot{m}_{ji} h_{ji} - \dot{m}_{ij} h_{ji}], \end{cases} \quad (1)$$

де, коли $i = 1$ або g – газоподібна фаза, що розглядається, – повітря, коли $i = 1$ або S – тверда фаза, що складається з окремих гранул; α_i – об'ємна частка фази i в суміші $\left(\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1 \right)$; ρ_i – дійсна густина фази i , kg/m^3 ; ρ_{ri} – середня густина фази i , kg/m^3 ; τ – час, с; $\mathbf{V}_i = (V_x, V_y, V_z)^T$ – вектор швидкості фази i , м/с; m_{ji} – характеристика швидкості передачі маси від фази j до фази i (причому $m_{ji} = 0$), $\text{kg}/(\text{c} \cdot \text{m}^3)$; p – тиск, Па; $p_s = p_2$ – тиск у сипкій фазі, Па; $\tau_i = \alpha_i \mu_i (\nabla \cdot \mathbf{V}_i + \nabla \cdot \mathbf{V}_i^T) + \alpha_i (\eta_i - 2\mu_i/3) \nabla \cdot \mathbf{V}_i I$ – тензор напруги розтягнення-стиснення, Па; μ_i, η_i – дотична та об'ємна в'язкість, відповідно, Па · с; I – одинична матриця; \mathbf{g} – вектор прискорення, пов'язаний із гравітацією, m/s^2 ; \mathbf{F}_i – зовнішня масова сила, Па/м; $\mathbf{F}_{\text{lift},i}$ – підйомна сила, Па/м; $\mathbf{F}_{\text{vm},i}$ – приєднана масова сила, Па/м; $R_{ji} = -R_{ij}$ (причому $R_{ii} = 0$), $\sum_{j=1}^2 \mathbf{R}_{ji} = \sum_{j=1}^2 K_{ji} (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i)$ – сили, що залежать від тертя, тиску, зчеплення частинок та інших чинників на межі фаз, $\text{Н}/\text{м}^3$ (Па/м); $\mathbf{V}_{ji} = \begin{cases} \mathbf{V}_j, & \text{коли } \dot{m}_{ji} > 0 \\ \mathbf{V}_i, & \text{коли } \dot{m}_{ji} < 0 \end{cases}$ – швидкість на межі фаз, м/с; $h_i = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{pi} dT$ – ентальпія, Дж/кг; T – температура, К; λ_i – коефіцієнт теплопровідності фази i , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; S_i – джерело, пов'язане з хімічними реакціями й тепловим випромінюванням, $\text{Вт}/\text{м}^3$; $Q_{ji} = -Q_{ij}$ (причому $Q_j = 0$) – інтенсивність теплообміну між фазами, $\text{Вт}/\text{м}^3$; h_{ji} – ентальпія на межі фаз під час випаровування чи конденсації (кристалізації), $h_{ji} = \begin{cases} h_j, & \text{коли } \dot{m}_{ji} > 0 \\ h_i, & \text{коли } \dot{m}_{ji} < 0 \end{cases}$, Дж/кг.

Температуру гранул розглянуто як вимір випадкового руху в частинках, що є пропорційним площині випадкового руху частинок. Випадковий рух частинок виникає завдяки механічній енергії, що передається частинками гранул. Цей рух створює внутрішню енергію частинок. Транспортне рівняння температури гранул враховує конвективний теплообмін, напругу твердої фази, потік коливання енергії, розсіяння енергії зіткнень, обмін енергії між фазами. Температура гранул пов'язана з напругою твердої фази:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_s \rho_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{V}_s \Theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}) : \nabla \mathbf{V}_s + \nabla \cdot (\lambda_{\Theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma(\Theta_s), \quad (2)$$

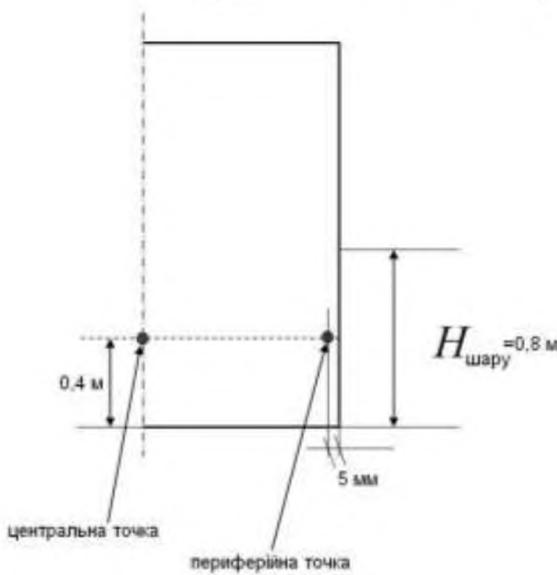


Рис. 1 – Розташування центральної та периферійної точок розрахунку

Початок взаємодії зріджувального суцільного середовища відслідковується, коли $t = 0,8$ с, і характеризується максимальним значенням тиску 450 Па (рис. 2, a), із подальшим різким зменшенням тиску до

де $(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \mathbf{V}_s$ – виділення енергії від механічних напруг у частинках твердого середовища, $\text{Вт}/\text{м}^3$; $\bar{\tau}_s = -\frac{\pi}{6} \sqrt{3} \psi \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}} \rho_s g_{ss} U_{s,\parallel} \sqrt{\Theta_s}$ – тензор напруг зсуву гранул, Па; ψ – коефіцієнт дзеркальної взаємодії між гранулами і стінкою; $U_{s,\parallel}$ – швидкість ковзання гранул вздовж стінки, м/с; λ_{Θ_s} – коефіцієнт дифузії гранул, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$; $\lambda_{\Theta_s} \nabla \Theta_s$ – енергія, що відляється внаслідок дифузії, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $\gamma(\Theta_s)$ – дисипація енергії внаслідок зіткнення гранул, $\text{Вт}/\text{м}^3$.

Під час моделювання використано моделі турбулентності в пакеті прикладних програм Fluent 6.3.

За допомогою математичної моделі розраховано динаміку основних характеристик теплоносія та гранул сульфату амонію у двох точках псевдозрідженої шари – центральній і периферійній (рис. 1).

Установлено, що для перехідних процесів у псевдозрідженному шарі характерна поведінка нелінійних і випадкових систем (рис. 2-4).

нульових значень. При цьому частота до $t \leq 4,0$ с збільшується, а амплітуда зменшується до 200 Па за наявності пульсацій. Це пояснюється різним характером течії газового середовища в цій точці й нестабільною структурою зернистого матеріалу в шарі. Коли $t \geq 6,0$ с спостерігається різке зменшення частоти й стабільне зниження амплітуди до 50...30 Па.

Динаміка зміни тиску в точці, розташованій на відстані 5 мм від стінки апарату (рис. 2, *б*), суттєво відрізняється за частотою та амплітудою. Так, амплітуда коливань у перші 4 с досягає 400 Па за відносно стабільної частоти. Коли $t = 3,8\ldots4,5$ с, частота коливань суттєво збільшується за одночасного зменшення амплітуди до 200...100 Па. Коли $t = 5,0\ldots5,8$ с, гіdraulічний перепад є максимальним (520 Па, що на 27 % перевищує початкові значення). У подальшому ($t \geq 7,0$ с), частота пульсацій збільшується, проте амплітуда коливань перебуває в межах 380...150 Па. Тобто наявність стінки суттєво впливає на флюктуації перепаду тиску завдяки терпю частинок і стінки й вираженому пульсаційному руху газового середовища.

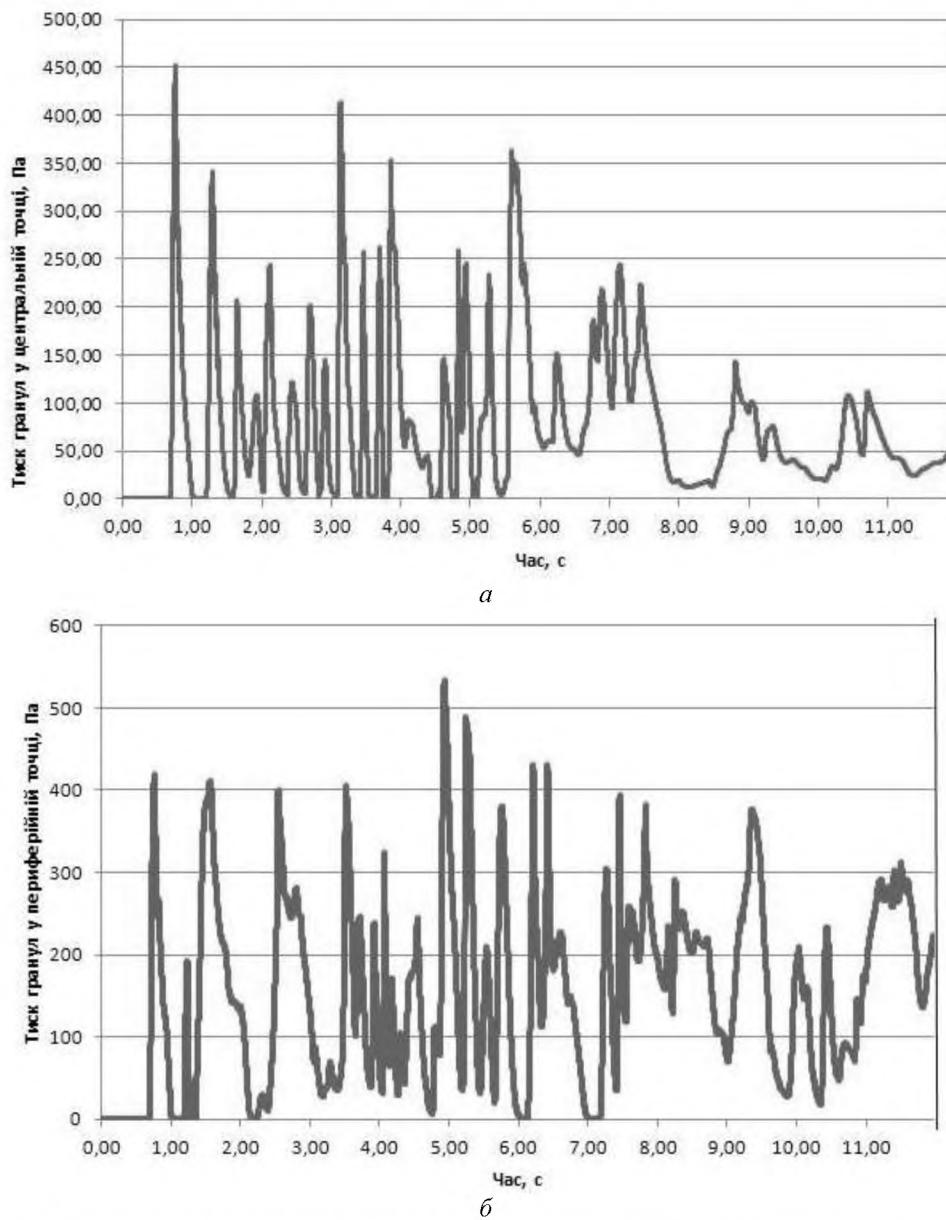


Рис. 2 – Перехідні характеристики тиску гранул у центральній (а) і периферійній (б) точках

Змінення температури гранул є таким. У центральній точці (рис. 3, а), поки до неї не дійшли струмені газу ($t \leq 4,0$ с), температура залишається незмінною (373 К). Коли $t = 4,0 \dots 5,0$ с, спостерігається проскок газової бульбашки й незначне підвищення температури до 373,2 К. І тільки після $t \geq 7,0$ с, коли відбувається відносна стабілізація тиску (див. рис. 2, а), відбувається підвищення температури до 376,5 К із подальшою стабілізацією на рівні 375,5 К. Температура дисперсного середовища стабілізується з $t = 11$ с.

У периферійній точці (рис. 3, б) змінення температури до $t \leq 7,0$ с, із деякими відмінностями, є аналогічним. Але після $t \geq 7,0$ с, внаслідок значних пульсацій тиску, змінення має виражений пульсаційний характер, а температура не досягає сталого рівня.

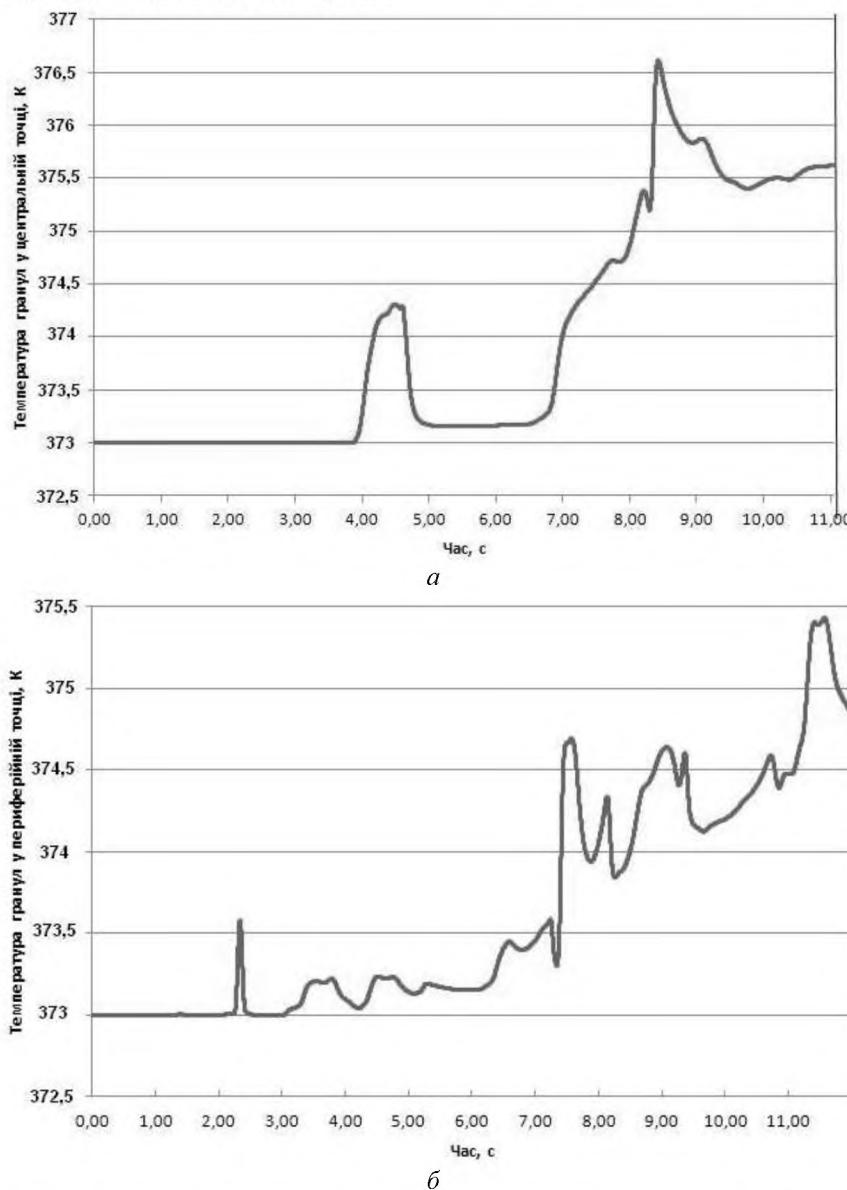


Рис. 3 – Перехідні характеристики температури гранул у центральній (а) і периферійній (б) точках

Змінення аксіальної швидкості до $t \leq 3,0$ с має пульсаційний характер внаслідок розподілення газового середовища в полі зернистого матеріалу. Через флюктуації матеріалу вектор швидкості є протилежно спрямованим в інтервалах 3,0...4,5; 6,2...6,8, 7,8...8,0 с (рис. 4, а). Пульсації суттєво зменшуються, коли $t > 9,0$ с. У шарі, розташованому біля стінки, внаслідок її гальмівної дії пульсації суттєво уповільнюються (рис. 4, б). Коли $t = 3,8$ с, утворюються вихори. Коли $t > 9,0$ с, швидкість стабілізується в межах 0,5...0,9 м/с.

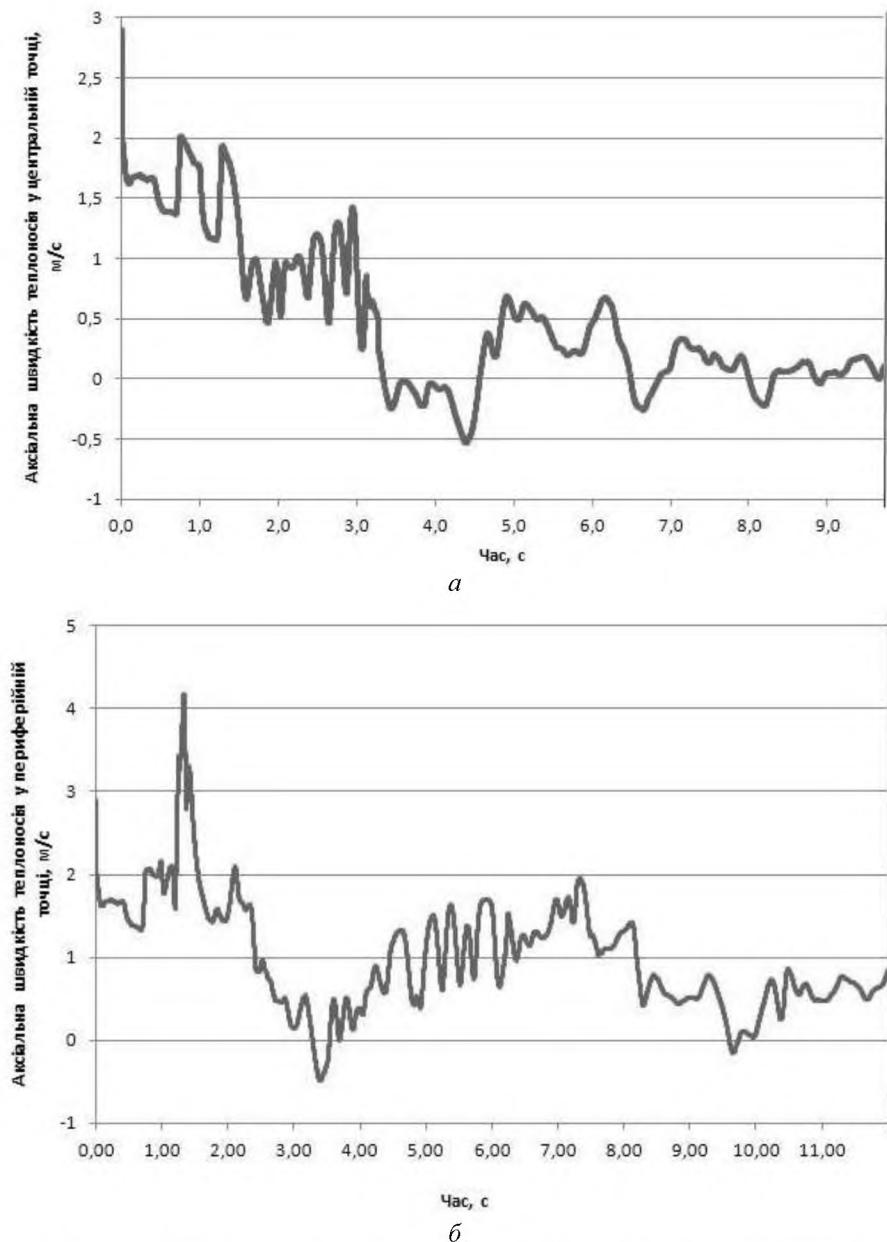


Рис. 4 – Переходні характеристики аксіальної швидкості теплоносія у центральній (а) і периферійній (б) точках

Висновки

Запропонована математична модель дозволяє проаналізувати технологічні параметри, що визначають інтенсивність переносу під час зневоднення й гранулювання водних розчинів сульфату амонію, і врахувати особливості цих процесів під час створення системи управління.

Список використаної літератури

1. Botterill, J. S. M. The Mechanism of Heat Transfer to Gas Fluidized Beds Botterill [Text] / J. S. M. Botterill, J. R. Williams // Trans. Inst. Chem. Engrs. – 1963. – V. 41. – P. 217.
2. Kuipers, J. A. M. A Numerical Model of Gas-Fluidized Beds [Text] / J. A. M. Kuipers, K. J. van Duin, F. P. H. van Beckum, W. P. M. van Swaaij // Chem. Eng. Sci., accepted. – 1992.

3. Корніенко, Б. Я. Особливості моделювання процесів переносу у дисперсних системах // Вісн. НТУУ «КПІ» ; Сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 2 (8). – С. 5-9.

We consider the study of the dynamics of mathematical models of the processes of dehydration and granulation in a fluidized bed by means of two-phase Eulerian-Eulerian. We obtain the pressure transient response of granules, granules temperature and axial velocity of the coolant in the central and peripheral points of the apparatus with a fluidized bed.

Keywords: modeling, fluidized bed, dehydration, granulation.

Надійшла до редакції 15.02.2012

УДК 517.958

ЛЕБЕДЕВ В. Є.¹, асп.; ЩЕРБАНЬ Г. І.², асп.

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

² Запорізька державна інженерна академія (м. Запоріжжя)

ВИМІРЮВАННЯ ЗВОРОТНОЇ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ ТА ЗАГАЛЬНОГО ОПОРУ АЛЮМІНІЄВОГО ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА

Розроблено методику вимірювання зворотної електрорушійної сили й загального активного опору алюмінієвого електролізера в реальному часі, яку можна використовувати для розрахунку електролізерів різних конструкцій за умови врахування їх особливостей.

Ключові слова: алюмінієвий електролізер, EPC, загальний активний опір.

Постановка проблеми

Попри тривалу історію застосування електролізу алюмінію, із достатньою точністю вимірюють лише деякі параметри ванн, зокрема різницю потенціалів на електродах та електричний струм. Це пояснюється агресивністю середовища і високим струмом.

Метою статті є узагальнення напрацьованого матеріалу щодо розроблення способу вимірювання зворотної електрорушійної сили й загального опору алюмінієвого електролізера.

Виклад основного матеріалу

Будь-який електролізер можна подати як електрохімічну ланку, що складається з двох електродів та електроліту. Під електродом розуміють межу розділу фаз, на якій спрямований рух електронів (носіїв заряду) змінюється на спрямований рух іонів чи навпаки. Під час електролізу поверхня електродів завжди поляризується. Поверхня поділу електрод – розчин (подібно до конденсатора) несе два протилежні за знаком і рівні за величиною заряди, один з яких розташовано на електроді, інший – у розчині. Окрім електролітичного опору в електрохімічній ланці існує ємнісний опір подвійного шару (імпеданс Фарадея), що зменшує напругу, прикладену до електроліту та електроду. Але цей конденсатор із витоком, що має, окрім ємнісної, й омічну провідність.

Утворення електронного конденсатора супроводжується виникненням суттєвої різниці потенціалів між металом і розчином, причому метал, завжди заряджається позитивно. Вона значною мірою визначає абсолютний потенціал металу, ємність і поверхневу енергію міжфазної межі [1].

Оскільки в спрощеному вигляді електролізер є хімічним джерелом струму (ХДС) у режимі заряду, раціональним є використання методик визначення його поточного технологічного стану з використанням відомих експрес-методів діагностики ХДС. Основними способами визначення параметрів ХДС є: вимірювання напруги й струму під навантаженням; вимірювання тривалості розряду за номінального сталого навантаження; імпульсний; відгук на тестовий сигнал; імпеданс.