

9. Shambina, S.L. and Kharchenko, V.G. (2013), "Variant modular geometric modeling of complex technical objects", *Bulletin of Russian Peoples' Friendship University. Engineering studies*, vol. 2, pp. 5–8.
10. Virchenko, V.G., Taras, I.P. (2013), "Computer combinatorial-variation geometric modeling of engineering objects", *The Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Transactions on Hydrotechnics*, vol. 58 (72), Fascicola suplimentara, pp. 173–176.
11. Vanin, V.V. and Virchenko H.A. (2014), "Structural-parametric models as a means of integration of computer-aided design of modern aircraft", *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*, vol. 3 (50), pp. 571–574.
12. Aksel'rud, G.A. (1983), *Vvedenie v kapilljarno-himicheskiju tehnologiju* [Introduction to the capillary-chemical technology], Himija, Moscow, Russia.
13. <http://ng-kg.kpi.ua>.
14. Zalewskiy, S.V. (2011), "Geometric modeling of tissue fillers textolite for designs wares", *Ph.D. Thesis*, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine.
15. Vanin, V.V. and Hriaznova, H.P. (2014), "The study forms the surface of the polymer tape in the manufacture of composite parts", *Suchasni problemy modeliuвання*, vol. 3, pp. 34-38.
16. <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-414/applied-geometry-engineering-graphics-ergonomics-and-safety-of-life-414/23604-414-053>.
17. Rudenko, S.Yu. (2013), "Geometric modeling of shaped surfaces of revolution, reinforced of winding thread", *PhD Thesis*, National University Of Civil Protection Of Ukraine, Kharkiv, Ukraine.
18. Kutsenko, L.M. and Rudenko, S.Yu. (2011), "Rotation Surfaces with variable along the axis of curvature of the meridians and their strengthening by winding Kevlar thread", *Komp'uterno-intehrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, vol. 6, pp. 148–153.
19. Ajushev, T.V. (2005), *Geometricheskie voprosy adaptivnoj tehnologii izgotovlenija konstrukcij namotkoj iz voloknistyh kompozicionnyh materialov* [Geometric aspects of adaptive technology of manufacturing structures wound from fiber composite materials], BNC SO RAN, Ulan-Udje, Russia.
20. Kalinin, V.A. (1997), "Theoretical Foundations of geometric modeling of winding processes and calculations of structures made of fiber composite materials", *Dr. of Sc. Thesis*, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia.
21. Bityukov Yu. I. (2010), "Geometric modeling of technological processes and calculations of winding structures of fiber composite materials": *Dr. of Sc. Thesis*, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia.
22. Chernikov, A.V. (2008), "Geometric and computer modeling of the dynamics of change processes objects under the influence of a given factor (for example, filter)", *PhD Thesis*, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine.

УДК 66.011

КОРНІЄНКО Б. Я., д.т.н., доцент
Національний авіаційний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Розглядаються підходи до математичного моделювання процесів зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Здійснена класифікація моделей за типами міжфазної взаємодії. Проаналізовано основні підходи до побудови математичних моделей зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, основні припущення та особливості визначення технологічних параметрів, запропоновані різними авторами.

Ключові слова: псевдооживлений шар, обезвоживание, гранулирование, межфазное взаимодействие, математическое моделирование.

© Корнієнко Б. Я., 2016.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. Гранулювання у псевдозрідженому шарі (особливо при отриманні багатокомпонентних мінеральних добрив) є складним фізико-хімічним процесом, інтенсивність перебігу якого залежить від багатьох факторів. До них слід віднести закономірності гідродинаміки псевдозрідженого шару, кінетику гранулоутворення, регулювання хімічного складу готового продукту, а також інтенсивність тепломасообмінних процесів.

У праці [1] розглянуто основні підходи до математичного моделювання процесів переносу у псевдозрідженому шарі, класифікацію моделей за типами міжфазної взаємодії, з урахуванням стохастичної і хаотичної гідродинаміки та класифікацію процесів в апараті з псевдозрідженим шаром за їх властивостями для гідродинамічних моделей.

Щоб створити ефективну систему управління виробництвом мінеральних добрив, необхідно проаналізувати математичні моделі зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, визначити основні припущення та основні технологічні параметри.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо математичні моделі процесів зневоднення та гранулювання у апаратах із псевдозрідженим шаром, необхідні для визначення основних параметрів, масштабування та керування процесами.

Дослідження здійснювали для псевдозрідженого шару з висхідним потоком теплоносія та з урахуванням турбулентності у псевдозрідженому шарі. Також використані моделі швидкого псевдозрідження.

Найбільш повно математичну модель можна охарактеризувати за кількістю фаз. Під терміном «фаза» розуміємо область, що містить тверду речовину або газ. Вони можуть відрізнятися за об'ємними частками твердої речовини, за зовнішнім виглядом і гідродинамічними характеристиками. Перші підходи до математичного моделювання апаратів для зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі ґрунтувалися на однофазних моделях. У такий спосіб намагалися встановити продуктивність апарата із псевдозрідженим шаром за розподілом тривалості перебування, тобто осьовим перемішуванням газів. Ця спроба виявилася невдалою, оскільки перетворення у псевдозрідженому шарі описувалися ще гірше, аніж у разі ідеального перемішування. Продуктивність апарата із псевдозрідженим шаром визначається контактом між газом та твердими частинками, з урахуванням наявності бульбашок.

Суттєвим є урахування особливостей гідродинаміки. Використовуючи моделі Девідсона та Харрісона для гетерогенних реакцій, пов'язані відмінностями між перетворенням однієї фази для апарата ідеального перемішування та двофазної моделі, можна отримати умовно повністю перемішану суцільну фазу [2]. З огляду на перебування процесів у дифузійній області, коли швидкість процесу визначається коефіцієнтом масопереносу, відмінності між цими двома моделями є незначними. Разом із цим переваги двофазних моделей є суттєвими. Саме відсутність урахування наявності газових бульбашок при однофазному підході призвела до появи двофазних моделей. Ці моделі містили всі важливі елементи, які були і в усіх більш пізніх моделях – існування різних фаз, розділення газових потоків, масообмін між фазами.

Проаналізуємо основні підходи до побудови таких моделей.

Модель Мая [3]. Основні припущення ранньої моделі В. Мая: розподіл потоку газу відбувається за двофазною теорією; передбачається, що потік бульбашок газу перебуває в загальному потоці; бульбашки газу не містять твердих тіл; потік газу в емульсійній фазі розганяється із загальним потоком; поруватість у фазі емульсії відповідає мінімальним умовам псевдозрідження. Коефіцієнт дисперсії і коефіцієнт масообміну встановлювали експериментально.

Модель Шелла [4–5] є напівемпіричною моделлю, заснованою на двофазній моделі Дж. Ван Дімтера [6], де зроблено такі припущення: газова фаза є вільною від твердих частинок, що перебувають у потоці; потік газу крізь фазу емульсії відсутній; змішування емульсії із газовою фазою моделюється за допомогою турбулентної дифузії. Використовуючи ці припущення, масові баланси за стаціонарних умов і з урахуванням кінетики першого порядку: $dc_b/dz + N_a(c_b - c_e) = 0$; $-d^2c_e/(N_a dz^2) - N_a(c_b - c_e) + N_r c_e = 0$, де c_b – концентрація газової фази, моль · м⁻³; c_e – концентрація емульсійної фази, моль · м⁻³; N_a – безрозмірне число одиниць переносу; N_d – кількість блоків перемішування в емульсійній фазі; N_r – число одиниць реакції.

Модель Оркутта й Девідсона-Харрісона, запропонована Дж. Оркуттом [7] і відтворена Дж. Девідсоном і Д. Харрісоном [2], була однією з перших, де параметри пов'язані з динамікою газових бульбашок. Вона ґрунтується на таких припущеннях: розподіл газового потоку відбувається за двофазною теорією; потік газових бульбашок перебуває в спільному потоці; газові бульбашки не містять твердих тіл; структура потоку газу в щільній фазі – або повністю змішана, або витісняється; поруватість у фазі емульсії відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; міжфазний масообмін складається з проникнення й дифузії. Коефіцієнт масо переносу $k_{be} = 0,75U_{mf} + 0,975g^{0,25}D_m^{0,5}d_{eq}^{-0,25}$, де U_{mf} – мінімальна швидкість псевдозрідження, м/с; D_m – коефіцієнт молекулярної дифузії, м²/с; d_{eq} – еквівалентний діаметр бульбашки, м. Пізніше цю модель було розширено Р. Дартеном [8] з урахуванням зростання бульбашок у шарі.

Модель Партріджа-Роу [9] принципово відрізняється від попередньої: потік газових бульбашок визначається двофазною теорією; потік газових бульбашок перебуває у спільному потоці; поруватість у спільному потоці відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; але структура потоку газу в щільній фазі витіс-

няється; поруватість у фазі емульсії відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; міжфазний масоперенос визначається за формулою $Sh_c = k_{ce} d_c / D_m = 2 + 0,69 Re_c^{0,5} Sc^{0,33}$, де k_{ce} – коефіцієнт масопереносу між хмарою та емульсією, м/с; d_c – діаметр хмари, м.

Модель Грейса [10], спирається на такі припущення: чистий вертикальний потік газу в щільну фазу відсутній; потік бульбашок газу імовірно витісняється; у застійних зонах щільної фази не відбувається змішування; поруватість у щільній фазі відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; для обчислення масопереносу використовують напівемпіричні рівняння Грейса. Цю модель можна розглядати як спрощення моделі висхідного трифазного шару [11] і моделі протитечі зворотного перемішування [12]. Вважається, що фазою хмари в цій моделі було знехтувано. Припущення про відсутність вертикального потоку газу в щільній фазі, введене у [11], було прийнято. Модель Грейса припускає також наявність твердих тіл в межах фази бульбашок.

Модель Вертера [13–15]. Дж. Вертером запропоновані такі припущення: чистий вертикальний потік газу в щільну фазу відсутній; потік бульбашок газу імовірно витісняється; у застійних зонах щільної фази не відбувається змішування; поруватість в щільній фазі відповідає мінімальним умовам псевдозрідження. Цю модель засновано на більш ранній [16–18], де враховано зростання бульбашки. Коефіцієнт масопередачі вважається незалежним від осьових і радіальних позицій.

Модель Като-Вена [19] враховує зміни розміру бульбашок, що супроводжують процес міжфазного переносу. Основні припущення: чистий вертикальний потік газу в щільну фазу відсутній; псевдозріджений шар поділяється на n відсіків заввишки з діаметр бульбашки на відповідній висоті; кожен відсік складається з фази емульсії і хмари фази бульбашки, розмір якої розраховують за теорією Дж. Девідсона [20]: $V_c/V_b = (\alpha + 2)/(\alpha - 1)$, де V_c – об'єм хмари, м³; V_b – об'єм бульбашки, м³; α – частка об'єму, зайнята твердими частинками; газ повністю змішується на кожному етапі у кожному відсіку; зворотне перемішування між відсіками відсутнє; поруватість у фазі емульсії відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; поруватість шару є сталою і лінійно зростає до 1; масоперенос заснований на рекомендації Х. Кобаяші $k_{be} = 0,11/d_b$, де d_b – діаметр бульбашки, м [21]; зміна розмірів бульбашки з висотою визначається за допомогою адаптації співвідношення Х. Кобаяші $d_b = 0,14 \rho_p d_p xU/U_{mf} + d_{b,0}$, де ρ_p – густина матеріалу шару, кг/м³; d_p – діаметр частинок, м; U – поверхнева швидкість газу, м/с; $d_{b,0}$ – початковий діаметр бульбашки, м [22].

Модель Куній-Левенштіля [11]. Ця модель розглядає три окремі фази (бульбашки, хмара та емульсія) і два різні опори між ними. Зроблено такі припущення: чистий вертикальний потік газу у фазі емульсії відсутній; шар складається з трьох фаз: бульбашки, хмари та емульсії; розмір хмари розраховують за Дж. Девідсоном [20]; газ в бульбашці імовірно витісняється; зворотне перемішування в емульсії відсутнє; поруватість в емульсії і хмарі відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; масообмін між бульбашкою і хмарою є похідним від підходу Девідсона-Харрісона $k_{be} = 4,5U_{mf}/d_b + 5,85D_m^{0,5}g^{0,25}d_b^{-1,25}$ [2]; перенос із фази хмари до емульсії відбувається за теорією проникнення Хігбі:

$$k_{ce} = \frac{S_c}{V_b} \left(\frac{4D_{me}\varepsilon_{mf}u_b}{\pi d_b} \right)^{0,5} \cong 6,77 \left(\frac{D_m\varepsilon_{mf}u_b}{d_b^3} \right)^{0,5} = 6,77 \left(\frac{0,711D_m\varepsilon_{mf}\sqrt{gd_b}}{d_b^3} \right)^{0,5},$$

де k_{ce} – коефіцієнт масопереносу між хмарою та емульсією, м/с; ε_{mf} – поруватість шару за мінімального псевдозрідження; u_b – швидкість підйому бульбашки, м/с.

Висновки. За результатами досліджень зроблено такі узагальнення.

1. Модель Оркутта, що допускає поршневий режим потоку в обох фазах, дає непогані результати розподілу профілів концентрації завдяки врахуванню міжфазного масообміну, проте потребує уточнення параметрів для конкретних експериментальних даних.

2. Неврахування двофазної теорії є проблемою для моделі Партріджа-Роу. Прогнозована область фази бульбашок перевищує загальну площу шару. Спроби скоригувати газові потоки в фазах не долають проблему.

3. Модель Като-Вена задовільно визначає профіль розподілу концентрації в фазі бульбашок, але не може спрогнозувати концентрацію в емульсійній фазі й падіння концентрації біля поверхні шару.

4. Найкращу відповідність знайдено із застосуванням моделі Куній-Левенштіля. За допомогою цієї моделі вірно спрогнозовано концентрацію в щільній фазі завдяки невисокій швидкості міжфазного масообміну. Встановлено, що загальний масообмін в моделі обмежений опором між хмарою та емульсією. Тому модель спрощено до двох фаз із об'єднанням фази бульбашки і хмари.

Список використаної літератури

1. Корнієнко Б. Я. Особливості моделювання процесів переносу у дисперсних системах / Б. Я. Корнієнко // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін-т», сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 2 (8). – С. 5–9.
2. Дэвидсон Дж. Псевдоожигение / Дж. Дэвидсон, Д. Харрисон. – М. : Химия, 1973. – 725 с.
3. May W. G. Fluidized-Bed Reactor Studies / W. G. May // Chem. eng. progress. – 1959. – 55, No. 12. – P. 49-56.
4. de Vries R. J. Design criteria and performance of the commercial reactor for the Shell chlorine process / R.J. de Vries, W.P.M. van Swaaij, C. Mantovani, A. Heijkoop // Proc. of 5th European Symp. on Chem. Reaction Eng., Amsterdam, Elsevier Publ. Corp., 1972. – P. B9–59–B9–69.
5. van Swaaij W. P. M. Investigation of Ozone decomposition in fluidized beds on the basis of a two-phase model / W. P. M. van Swaaij, F. J. Zuiderweg // 2nd Int. Symp. in Chem. Reaction Eng., Amsterdam, 1972. – P. B9-25.
6. van Deemter J. J. In fluidization / J. J. van Deemter, A. A. H. Drinkenburg (Ed.) // Netherlands University Press, Amsterdam, Netherlands, 1967. – P. 334–347.
7. Orcutt, J. C. Reaction time distribution in fluidized catalytic reactors / J. C. Orcutt, J. F. Davidson, R. L. Pigford // Chem. eng. progress symp. ser. – 1962. – Vol. 58, No. 38. – P. 1–15.
8. Darton R. C. A bubble growth theory of fluidized bed reactors / R.C. Darton // Transactions of the Institution of Chemical Engineers. – 1979. – Vol. 57. – P. 134–138.
9. Partridge B. A. Chemical reaction in a bubbling gas-fluidised bed / B.A. Partridge, P.N. Rowe // Transactions of the Institution of Chemical Engineers. – 1966. – Vol. 44. – P. 335–348.
10. Grace J. R. Fluidized beds as chemical reactors, in gas fluidization technology / J. R. Grace. – Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore : John Wiley & Sons, 1986. – 428 p.
11. Куний Д. Промышленное псевдоожигение / Д. Куний, О. Левеншпиль. – М. : Химия, 1976. – 448 с.
12. Fryer C. C. Experimental investigation of models for fluidized bed catalytic reactors / C. C. Fryer, O. E. Potter // AIChE Journal. – 1976. – Vol. 22. – P. 38–47.
13. Werther J. Influence of the distributor design on bubble characteristics, in fluidization / J. Werther // Davidson and Keairns (Eds.). – Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1978. – P. 7–12.
14. Werther J. Mathematical modeling of fluidized bed reactors / J. Werther // Int. chem. eng. – 1980. – Vol. 20. – P. 529–541.
15. Werther J. Modeling and scale-up of industrial fluidized bed reactors / J. Werther // Chem. Eng. Sci. – 1980. – Vol. 35. – P. 372–379.
16. Werther J. Effect of gas distributor on the hydrodynamics of gas fluidized beds / J. Werther // German Chem. Eng. – 1978. – 1. – P. 166–174.
17. Werther J. Scale-up of fluidized bed reactors / J. Werther // German Chem. Eng. – 1978. – 1. – P. 243–251.
18. Werther J. Mathematische Modellierung von Wirbelschichtreaktoren / J. Werther // Chemie Ingenieur Technik. – 1978. – Vol. 50. – No. 11. – P. 850–860.
19. Kato K. Bubble assemblage model for fluidized bed catalytic reactors / K. Kato, C. Y. Wen // Chem. Eng. Sci. – 1969. – Vol. 24. – P. 1351–1369.
20. Davidson J. F. Symposium on Fluidization – Discussion / J. F. Davidson // Transactions of the Institution of Chemical Engineers. – 1961. – Vol. 39. – P. 230–232.
21. Kobayashi H. Fluidization models / H. Kobayashi, F. Arai, T. Sunawaga // Chem. Eng. Tokyo. – 1967. – Vol. 31. – P. 239.
22. Kobayashi H. Behavior of bubbles in a gas-solid fluidized bed / H. Kobayashi, F. Arai, T. Chiba // Chem. Eng. Tokyo. – 1965. – Vol. 29. – P. 858–863.

Надійшла до редакції 10.09.2015

Korniienko B. Y.

MATHEMATICAL MODELING OF DEHYDRATION AND GRANULATION IN A FLUIDISED BED

Approaches to the mathematical modeling of dehydration and granulation in a fluidised bed. Classification by type models interfacial interaction. Proanalizovno basic approaches to building mathematical models of processes of dehydration and granulation in a fluidised bed, basic assumptions and characteristics determine basic technological parameters proposed by different authors.

The most complete mathematical model can be characterized by the number of phases. The term "phase" mean area containing solid or gas. They may differ in Volumetric particles of solid appearance, and for hydrodynamic characteristics. The first approaches to mathematical modeling apparatus for dewatering and granulation in fluidized bed based on a single-phase models, ignoring the segregation of gas and solid particles from the presence of cavities. So were trying to predict the performance of the device fluidized-bed exclusively for residence time distribution, ie axial mixing gases. This attempt was unsuccessful because the transformation described in the fluidized bed is worse than in the case of ideal mixing. Performance fluidized-bed unit is determined by the contact between the gas and solid particles, given the presence of bubbles. It is essential taking into account the characteristics of hydrodynamics.

According to the research made the following generalization.

Model Orcutt: This model allows piston flow regime in both phases, gives good results distribution profiles of concentration by taking into account interphase mass transfer. Needs to refine the specific experimental data.

Model Partridge-Rowe: Neglect of a two-phase theory caused a serious problem for this model. Estimated bubble phase region exceeds the total area of the layer. Attempts to adjust gas flows in phases not overcome this problem completely.

Model Kato-Wen: This model provides a satisfactory concentration distribution profile in phase bubbles, but it can not predict the concentration of the emulsion phase and can not predict the drop in concentration at the surface layer.

Model Kunii-Levenspiel: The best match was found using this model. With this model correctly predicted concentration in dense phase, due to the low speed interphase mass transfer. It was established that the total mass transfer model Kunii-Levenspiel limited resistance between the cloud and the emulsion and the model is simplified to two phases, phase aligning bubbles and clouds.

Keywords: fluidized bed, dehydration, granulation, interfacial interaction, mathematical modeling.

References

1. Korniyenko, B.Y. (2011), "Features of the modeling of transport processes in disperse systems", *Proceedings of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" Series "Chemical engineering, environment and resources."*, no 2(8), pp. 5–9.
2. Davidson, J.F. and Harrison, D. (1973), "Fluidization", Chemistry, Moscow, USSR.
3. May, W.G. (1959), "Fluidized-Bed Reactor Studies", *Chem. eng. progress*, Vol. 55, no. 12, pp. 49–56.
4. de Vries, R.J., van Swaaij, W.P.M., Mantovani, C. and Heijkoop, A. (1972), "Design criteria and performance of the commercial reactor for the Shell chlorine process", *Proc. of 5th European Symp. on Chem. Reaction Eng.*, Amsterdam, Elsevier Publ. Corp., pp. B9–59–B9–69.
5. van Swaaij, W.P.M. and Zuiderweg, F.J. (1972), "Investigation of Ozone decomposition in fluidized beds on the basis of a two-phase", *2nd Int. Symp. in Chem. Reaction Eng.*, Amsterdam, pp. B9–25.
6. van Deemter, J.J. Drinkenburg (Ed.) A.A.H. (1967), "In fluidization", *Netherlands University Press*, Amsterdam, Netherlands, pp. 334–347.
7. Orcutt, J.C., Davidson, J.F. and Pigford, R.L. (1962), "Reaction time distribution in fluidized catalytic reactors", *Chem. eng. progress symp. ser.*, Vol. 58, No. 38, pp. 1–15.
8. Darton, R.C. (1979), "A bubble growth theory of fluidized bed reactors", *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 57, pp. 134–138.
9. Partridge, B.A. Rowe, P.N. (1966), "Chemical reaction in a bubbling gas-fluidised bed", *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 44, pp. 335–348.
10. Grace, J.R. (1986), "Fluidized beds as chemical reactors, in gas fluidization technology", *John Wiley & Sons*, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore.
11. Kunii, D. and Levenspiel, O. (1976), "Industrial fluidization", Chemistry, Moscow, USSR.
12. Fryer, C.C. and Potter, O.E. (1976), "Experimental investigation of models for fluidized bed catalytic reactors", *AIChE Journal*, Vol. 22, pp. 38–47.
13. Werther, J. (1978), "Influence of the distributor design on bubble characteristics, in fluidization", *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, pp. 7–12.
14. Werther, J. (1980), "Mathematical modeling of fluidized bed reactors", *Int. chem. eng.*, Vol. 20, pp. 529–541.
15. Werther, J. (1980), "Modeling and scale-up of industrial fluidized bed reactors", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 35, pp. 372–379.
16. Werther, J. (1978), "Effect of gas distributor on the hydrodynamics of gas fluidized beds", *German Chem. Eng.*, vol. 1, pp. 166–174.
17. Werther, J. (1978), "Scale-up of fluidized bed reactors", *German Chem. Eng.*, vol. 1, pp. 243–251.

18. Werther, J. (1978), "Mathematische Modellierung von Wirbelschichtreaktoren", *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 50, No. 11, pp. 850–860.
19. Kato, K. and Wen, C.Y. (1969), "Bubble assemblage model for fluidized bed catalytic reactors", *Chem. Eng. Sci.* vol. 24, pp. 1351–1369.
20. Davidson, J.F. (1961), "Symposium on Fluidization – Discussion", *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 39, pp. 230–232.
21. Kobayashi, H., Arai, F. and Sunawaga, T. (1967), "Fluidization models", *Chem. Eng. Tokyo*, vol. 31, p. 239.
22. Kobayashi, H., Arai, F. and Chiba, T. (1965), "Behavior of bubbles in a gas-solid fluidized bed", *Chem. Eng. Tokyo*, vol. 29, pp. 858–863.

УДК 678.026

МАЛАЩУК Н.С., магістр.; РОМАНЧУК Б. В., асп.;
КОЛОСОВ О. Є., д.т.н., с.н.с., проф.; СІВЕЦЬКИЙ В. І., к.т.н., проф.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ МОДИФІКОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ (огляд)

Проаналізовано інноваційні методи модифікування полімерних композиційних матеріалів на основі епоксидних олігомерів, зокрема, нановуглецевих, а також компонентів із пам'яттю форми. Визначено перспективні шляхи у напрямі розроблення рецептури й технологій виробництва композиційних матеріалів і конструкційних виробів із них із застосуванням датчиків напружено-деформованого стану. Описано методологічний підхід, що передбачає чисельне моделювання процесів підготовки полімерних композиційних матеріалів і формування виробів із них і проектування полімерного обладнання й формувального оснащення з урахуванням дії залишкових напружень. Передбачається визначити необхідну кількість інтелектуальних датчиків для отримання інформації про напружено-деформований стан полімерної композиції й виробів з неї, а також установлювати ефективні параметри ультразвукового оброблення полімерної матриці на стадіях компаундування та ультразвукового просочування. Також передбачається встановити ефективне співвідношення полімерної матриці, армувального макронаповнювача й наномодифікаторів, схеми розташування датчиків у просоченому напівфабрикаті або в інтелектуальному полімерному композиційному матеріалі.

Ключові слова: вуглецеві нанотрубки, композиційний матеріал, нанотехнологія, модифікування, напружено-деформований стан.

© Малащук Н. С., Романчук Б. В., Колосов О. Є., Сівецький В. І., 2016.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. Розроблення нових перспективних полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) пов'язано, поряд з іншим, із інноваціями останнього часу – вуглецевими нанотрубками (ВНТ), датчики напружено-деформованого стану (НДС), матеріалами з ефектом пам'яті форми тощо.

ВНТ було винайдено на початку 1990-х [1]. Вони мають унікальні пружно-міцнісні, теплофізичні та електричні властивості. Завдяки малій дефектності структури, а також здатності до деформацій вуглецевих циклів, за високої жорсткості на розтяг нанотрубки легко згинаються. Тому не дивно, що їх не обійшли увагою й розробники епоксидних ПКМ. Так, наприклад, наномодифіковані матеріали на епоксидній основі широко використовують для підвищення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування.

Останнім часом для покращання властивостей ПКМ широко використовують дисперсні й волокнисті наповнювачі. Їхнє введення в епоксидне зв'язуюче утворює гетерогенні ізотропні чи анізотропні матеріали. Властивості таких матеріалів визначаються властивостями полімерної матриці чи наповнювача. У першому випадку одержують ізотропний матеріал із достатньо високими адгезійними й когезійними властивостями відносно вихідної (ненаповненої) матриці [3].

За відсутності специфічних взаємодій олігомера з поверхнею неактивного наповнювача молекулярна рухливість від його природи майже не залежить [4]. Але введення навіть невеликої кількості (до 1 %) дрібнодисперсних наповнювачів може суттєво змінити фізико-механічні властивості композитів [5].

Одним з ефективних шляхів підвищення експлуатаційних характеристик композитів є застосування ультразвукового оброблення (УЗО). При цьому важливим є передача потужного імпульсу протягом короткого проміжку часу, що значно пришвидшує взаємодії у системі «адгезив – субстрат» [6].