

УДК 535.024:620.168:678.02:678.5.059

КОЛОСОВ О. Є., д.т.н., проф.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ОДЕРЖАННЯ ПРЕПРЕГІВ ДЛЯ ЗМІШУВАННЯ, ПРОСОЧУВАННЯ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ ТА НАНЕСЕННЯ НА НИХ ЕПОКСИДНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ

Проаналізовано практичне застосування розроблених енергоефективних технологічних засад одержання препрегів для базових процесів їх одержання, а саме змішування, просочування волокнистих наповнювачів та дозованого нанесення на них епоксидних зв'язуючих, із використанням ультразвуку

Ключові слова: технологія, просочування, склотканина, епоксид, полімер, зв'язуюче, ультразвук, енергозбереження.

© Колосов О. Є., 2014

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. У світі сучасні композити впевнено витісняють «класичні» матеріали. Нові волокна, тканини і попередньо просочені напівфабрикати (так звані препреги) отримали поширення в авіаційній, космічній, атомній промисловості, у трубопровідному транспорті [1-2]. Так, наприклад, препреги застосовують під час виготовлення корпусів літаків і вертольотів, крил, обтічників, гвинтів. Використання цих матеріалів дозволяє знизити вагу і, як наслідок, витрату палива повітряних суден, підвищити міцність і термін їх служби. На основі препрегів виготовляють сучасні будівельні матеріали, що вирізняються унікальними властивостями, а також використовують для армування бетонних конструкцій. Не менш перспективним ринком застосування препрегів є їхнє використання у вітроенергетиці для виготовлення лопатей вітроенергетичних установок [3].

Крім того, препреги застосовують в автомобіле- і суднобудуванні, для виготовлення судових корпусів і невідповідальних деталей автомобільних кузовів. У медицині препреги застосовують при виготовленні протезів. Номенклатура виробів товарів народного споживання, що виготовляють із препрегів, також надзвичайно широка: автомобільні бампери особливої міцності, шоломи та інше захисне обладнання для будівельників, прохідників, спортсменів, товари для туризму і відпочинку (рибальські вудки), а також спортивний інвентар (ключки для гольфу, оснастка велосипедів, роликів ковзанів) [3].

Реактопластичні напівфабрикати-препреги на основі полімерних зв'язуючих (ПЗ), а саме епоксидних зв'язуючих (ЕЗ) та орієнтованих волокнистих наповнювачів (ВН) займають чільне місце за обсягом виробництва і сферами застосування серед полімерних композиційних матеріалів (ПКМ).

Було встановлено, що застосування ефективних методів низькочастотної кавітаційної ультразвукової (УЗ) обробки сприяє суттєвому покращенню фізико-механічних властивостей одержуваних препрегів та сформованих на їх основі ПКМ [4]. Тому актуальним є розвиток науково-практичних основ здійснення ефективної УЗ-модифікації для базових процесів одержання препрегів, що дозволяє покращити експлуатаційні властивості ПКМ, одержуваних на їх основі, для розширення сфер застосування технологічних засад УЗ-дії.

Метою досліджень є аналіз прикладів практичного застосування розроблених енергоефективних технологічних засад виготовлення препрегів, а також сферопластиків, на основі армованих наповнювачів та епоксидних зв'язуючих із використанням ультразвуку, що використовують при одержанні виробів народного-подарського й подвійного призначення, що сприятиме розширенню застосування розроблених технологічних засад.

Стисла характеристика розроблених енергоефективних технологічних засад. Базові процеси просочування і дозованого нанесення є найголовнішими ланками при виготовленні препрегів для ПКМ. На якість просочування впливають такі чинники, як наявність чи відсутність повітряних включень (так званого «пляшкового ефекту») у структурі просочуваного ВН під час його просочення, гомогенність і в'язкість ПЗ, добра змочуваність поверхні ВН тощо [1-2].

Забезпечення певного вмісту ПЗ у наповнювачі, що просочився, є не менш важливим, ніж рівномірний його розподіл наповнювача за перерізом і довжиною. Це можна забезпечити точним регулюванням в'язкості

(варіюванням вмісту розчинника) просочувального розчину в поєднанні з певною швидкістю проходження наповнювача крізь просочувальний пристрій (швидкістю протягування).

У технології одержання препрегів ключовою ланкою є просочувально-сушильні лінії, які за сучасних умов вимагають особливих технологічних підходів, зокрема, підвищення продуктивності й забезпечення енергоресурсозбереження з одночасним підвищенням безпеки виробництва. Адже пара летких розчинників у ПЗ під час сушіння препрегів може накопичуватися у вибухонебезпечних концентраціях [1-2]. Запобігати цьому явищу значною мірою допомагає застосування УЗ на стадіях приготування і гомогенізації ПЗ.

Розроблені енергоефективні технологічні засади базуються на комплексному застосуванні ультразвуку (УЗ) для базових процесів виготовлення препрегів для усунення вищезазначених недоліків під час їхнього одержання. Дослідження, зокрема, свідчать, що ефективна УЗ-дія сприяє покращенню гомогенізації ПЗ, активації поверхні ВН для поліпшення його змочуваності ПЗ, дегазації структури ВН безпосередньо перед просочуванням і збільшенню продуктивності просочування й дозованого нанесення ПЗ завдяки збільшенню швидкості протягування ВН із покращенням властивостей кінцевого затверділого ПКМ [4].

Установлено, що застосування УЗ-впливу на просочування у ванні ВН, а також на ВН, що вже просочилися, можна розглядати як ефективний метод автоматичного підтримання потрібного вмісту ПЗ у просоченому ВН [4]. Унаслідок УЗ-дії скорочується тривалість отримання препрегів, що, у підсумку, також сприяє підвищенню енергоощадності їхнього виробництва. Схему розробленого УЗ-пристрою наведено в праці [3].

Таким чином, розроблені технологічні засади та обладнання для одержання виробів із ПКМ на основі препрегів із застосуванням УЗ-кавітаційної модифікації дозволяють підвищувати технологічні характеристики ЕЗ та експлуатаційні властивості затверділих ПКМ на їх основі з одночасним забезпеченням енергоощадного формування [3-6]. Результатом цього може бути підвищення на 30...45 % змочувальної спроможності полімерної (епоксидної) матриці і покращення її гомогенізації, що сприяє більш швидкому та якісному просочуванню, а також збільшенню адгезії затверділих ПКМ у середньому на 15...25 % із скороченням тривалості виготовлення щонайменше у 2,0...2,5 раза.

Приклади ефективного застосування розроблених енергоефективних технологічних засад. Упровадження розроблених технологічних засад та обладнання для процесів об'ємного озвучування, просочування ВН і дозованого нанесення ПЗ із застосуванням УЗ-модифікації проводили, зокрема, на НВО «Діелектрик» (м. Москва) і Казенному заводі порошкової металургії (КЗПМ; м. Бровари Київської області), на просочувально-сушильній машині МПТ-3М. Її детальний опис і характеристики наведено у статті [3].

Засади впроваджували в одержанні склотекстоліту електроізоляційного марки СТЕФ на базі склотканих матеріалів марок ЕЗ-200, ЕЗ-200П завширшки 1000 мм. Останні просочували ЕЗ марки ЕДТ-10 на базі епоксидного олігомера (ЕО) марки ЕД-20 (ЕД-20У), а також ЕД-16 за температури просочування 30 °С. Для СТЕФ завтовшки понад 5 мм як ВН використовували склотканину марки Т-13.

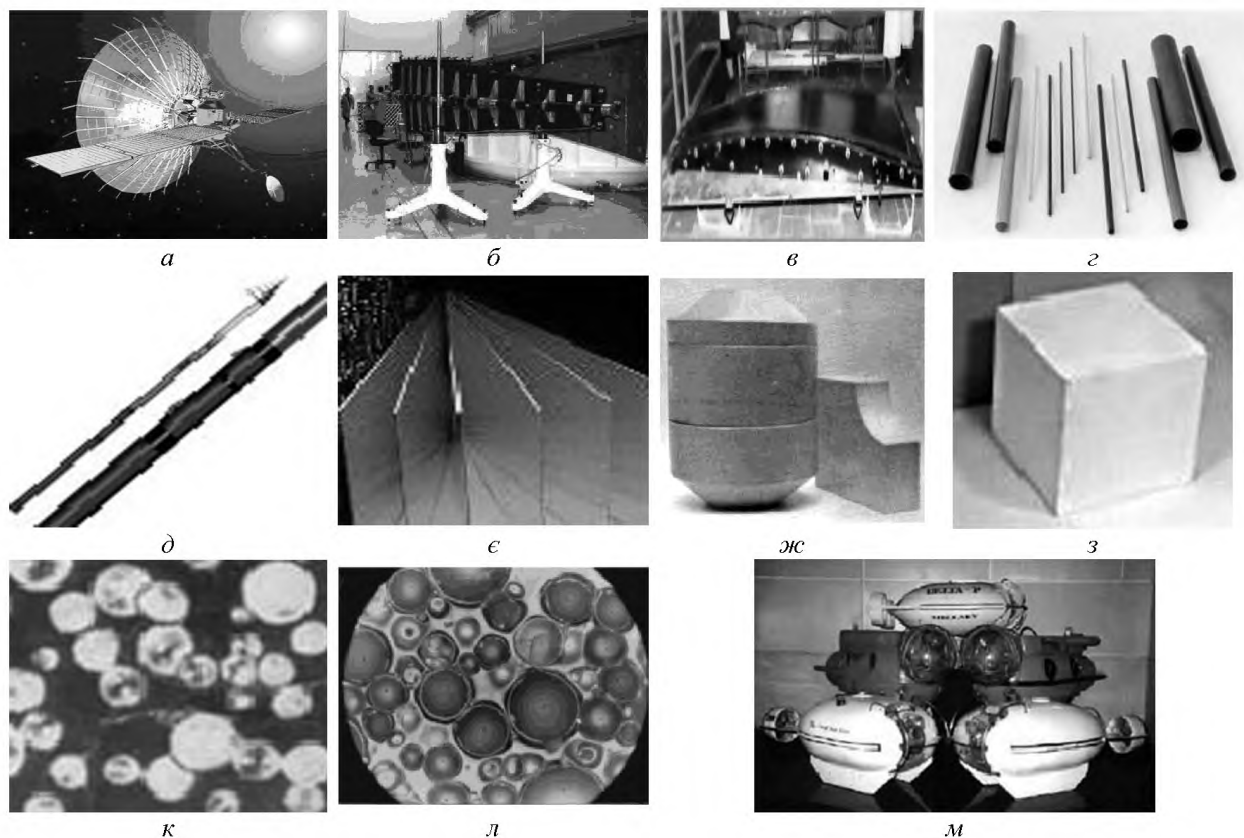
Габарити випромінювальної УЗ-пластини становили 1100×200×10 мм, частота УЗ – 18...22 кГц, амплітуда коливань – 3...5 мкм, інтенсивність УЗК – 3...5 Вт/см², вихідна потужність – 8 кВт, частота – 18...22 кГц, зусилля притискання – 5...15 Н. Кути нахилу випромінювальних пластин до поверхні матеріалу становили 10...15°. Швидкість протягування склотканини варіювали в межах 0,01...0,035 м/с. Величина нанесення зв'язуючого становила 35...38 %. При цьому також проводили попередню УЗ-обробку ЕО з такими параметрами озвучування олігомерів і зв'язуючих на їх основі марки ЕДТ-10: частота – 16...24 кГц; амплітуда – 10...30 мкм; температура – 50...80 °С; тривалість – 25...35 хв. [4].

Установлено, що під час використання на підприємстві КЗПМ традиційної технології за способом аналога [1] нанесення зв'язуючого 35 % досягали за швидкості протягування 0,010...0,012 м/с і коефіцієнті варіації нанесення 16...18 %. При реалізації же розроблених технологічних засад та обладнання це нанесення зв'язуючого досягали за швидкості протягування 0,030...0,035 м/с і коефіцієнті варіації нанесення 4...5 %. При цьому в'язкість просочувальних складів, що використовували, зростає у 1,2...1,4 раза, а коефіцієнт однорідності просоченого матеріалу збільшився у 1,5...2,0 раза порівняно з традиційною технологією. Отримані результати дозволяють рекомендувати розроблені нові технологічні засади тристадійної УЗ-обробки і відповідне обладнання як надійний засіб підтримання наперед заданого значення величини (стабілізації) вмісту ЕЗ у просоченому тканому наповнювачі.

На рис. 1 наведено елементи виробів, що виготовляли на просочувально-сушильному, намотувальному і формуальному обладнанні із застосуванням розроблених технічних засобів УЗ-модифікації. Це, зокрема, відповідальні елементи несучих конструкційних ПКМ для ракетно-космічної галузі (рис. 1, а-в), пултрузійні

вироби (рис. 1, з), вудки із склопластику (рис. 1, д), фольговані діелектрики (рис. 1, е), сферопластики (рис. 1, ж-з), що використовували як блоки плавучості для глибоководних технічних засобів (рис. 1, м).

Розміростабільні параболічні оболонки й сегменти оболонок радіотелескопа (рис. 1, б, в) – це тришарові конструкції із стільникового заповнювача та обшивок з епоксидного вуглепластика на основі синтетичної тканини з нанесеним на робочі поверхні металізованим шаром, що відбиває радіохвилі. Розміростабільні параболічні оболонки мають такі конструктивні характеристики: граничне відхилення параболічної поверхні від теоретичної – не більше 0,4 мм; коефіцієнт лінійного термічного розширення обшивок – не більше $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; діаметр оболонок – до 2800 мм; розміри сегментів – до 2800×7800 мм; товщина конструкцій – 5...50 мм; маса 1 м² конструкції – від 2,5 кг.



а – загальний вигляд радіотелескопа; б – розміростабільні параболічні вуглепластикові оболонки радіотелескопа у виготовленні; в – сегмент цих оболонок у виготовленні; г – пултрузійні вироби із ПКМ; д – склопластикові вудки; е – склотекстоліт фольгований марки СТЕФ; ж, з – блоки плавучості із сферопластика СДП-1 для глибоководних технічних засобів, одержані з використанням УЗ-обробки; к – алюмосилікатні порожнисті мікросфери під мікроскопом (відбите світло) для сферопластиків; л – структура сферопластика СДП-1 після УЗ-обробки; м – прив'язний глибоководний апарат

Рис. 1 – Елементи виробів із тканих волокнистих полімерних композиційних матеріалів

Пултрузійну технологію (див. рис. 1, г) призначено для виробництва виробів із ПКМ (профільних і площинних) із використанням установки модульного типу. Установку обладнано пристроєм із тягнучим зусиллям до 5 т, а також допоміжним оснащенням. Універсальна, екологічно чиста пултрузійна технологія забезпечує поєднання в одному процесі просочування армівного матеріалу ЕЗ, модифікованим УЗ, неперервну подачу проактивованого УЗ наповнювача, формування з одночасною полімеризацією зв'язуючого, і наступне розмірне різання готового профілю.

За допомогою цієї технології можливо виготовлення будь-яких профілів із ПКМ: суцільних і полегшених стільниковими наповнювачами, площиннопаралельних, трикутного чи круглого перерізу, із декількома несиметричними внутрішніми порожнинами, трубчастих, стрингерних із замкнутими чи відкритими повер-

хнями, площею перерізу до 3000 мм², три- й п'ятишарових панелей із наповнювачем для інтер'єрів і підлоги транспортних засобів. Матеріали, що використовують при пултрузійній технології – скло-, вугле-, органічно-волокно чи ровінги, спеціальні швидкотверднучі зв'язуючі; фарбники, антипіренові добавки, еластомери.

Під час проведення спільних досліджень із кафедрою конструювання та виробництва виробів із композиційних матеріалів Національного університету кораблебудування (м. Миколаїв) розроблені композиційні блоки плавучості (сферопластики) поліпшеної якості для підводних технічних засобів освоєння мінеральних і біологічних ресурсів Чорного моря і Світового океану із застосуванням розроблених режимів УЗ-модифікації за підвищеного робочого тиску.

Сферопластики мають низьку позірну густину і використовуються у конструкціях підводних технічних засобів як елементи додаткової плавучості. Сферопластики марки СДП-1 виготовлені на основі порожнистих скляних мікросфер діаметром 30 мкм груп А2 чи Б2 та Е3 на основі ЕО марки ЕД-16. При цьому об'ємна частка сферичних включень перевищувала 50 %. Технічні характеристики сферопластиків СДП-1 є такими: позірна густина – 440...550 кг/м³; гідростатична міцність за густини 440 кг/м³ – 25 МПа, 500 кг/м³ – 41 МПа, 550 кг/м³ – 81 МПа; робоча глибина за густини 440 кг/м³ – 1500 м, 500 кг/м³ – 3000 м; температура експлуатації – від мінус 70 до плюс 70 °С. Завдяки УЗ-обробці досягали підвищення гідростатичної міцності сферопластиків у середньому на 14...18 %.

Спеціалістам Феодосійського виробничого об'єднання «Море» передано проект дослідних технологічних засад виготовлення відповідальних конструктивних елементів із склопластиків для суден із динамічними принципами підтримки (підводні і надводні крила, елементи повітряної подушки тощо).

При цьому апробацією розроблених технологічних засад та обладнання для їх реалізації із застосуванням УЗ-модифікації встановлено, що вони дозволяють не лише підвищувати продуктивність базових процесів, але й використовувати більш в'язкі суміші з меншим вмістом розчинників. Крім того, використання розроблених технологічних засад та обладнання дає можливість економити електроенергію, що витрачається на випаровування розчинників і твердіння композиту, поліпшувати екологічну ситуацію на виробництві, а також створювати ПКМ із новими властивостями.

Висновки

Розглянуто приклади впровадження (у тому числі із застосуванням просочувально-сушильної машини МПТ-3М) розроблених технологічних засад і обладнання, що забезпечують енергоощадність для процесів приготування ЕЗ, просочування ВН і дозованого нанесення на них ЕЗ із застосуванням УЗ. Завдяки використанню розроблених технологічних засад та обладнання досягається можливість використання високов'язких і висококонцентрованих просочувальних складів, а також складів із дисперсним наповнювачем.

Результатом використання розроблених технологічних засад і обладнання є збільшення продуктивності процесів просочування й дозованого нанесення ЕЗ, тобто швидкості протягування матеріалу і швидкості видалення надлишків ЕЗ під час одержання однорідного матеріалу, що просочився, майже без повітряних включень. Це дозволяє рекомендувати розроблені нові технологічні засади тристадійної УЗ-обробки та відповідне обладнання як надійний засіб підтримання наперед заданого значення величини (стабілізації) вмісту ЕЗ у просоченому тканому наповнювачі, а також ефективний метод підвищення гідростатичної міцності сферопластиків.

Список використаної літератури

1. *Цыплаков О. Г.* Научные основы технологии композиционно-волокнистых материалов / О. Г. Цыплаков. – Пермь, 1974. – Ч. 1. – 317 с.
2. *Кербер М. Л.* Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др. ; под ред. А. А. Берлина. – СПб : Профессия, 2008. – 560 с.
3. *Колосов О. Є.* Аналіз особливостей просочувально-сушильного обладнання для виготовлення препрегів, а також перспективності використання ультразвуку для їх енергоощадного одержання / О. Є. Колосов // Наук. вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін.-т» ; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2013. – №1 (11). – С. 5–16.
4. *Колосов О. Є.* Формування полімерних композиційних матеріалів із застосуванням фізико-хімічної модифікації. Частина 2. Ефективні режими та обладнання для здійснення фізико-хімічної модифікації / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький. – К. : НТУУ КПІ, 2006. – 196 с.
5. *Колосов О. Є.* Технологія одержання багатокомпонентних епоксиполімерів із застосуванням направленої фізико-хімічної модифікації / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, Є. М. Панов. – К. : НТУУ КПІ, 2010. – 220 с.

6. Колосов О. Є. Математичне моделювання базових процесів виготовлення полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвукової модифікації / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, Є. М. Панов та ін. – К. : ВД «Едельвейс», 2012. – 268 с.

Надійшла до редакції 07.02.2014.

Kolosov O. Ye.

THE OBTAINED PREPREG PROCESS OF MIXING, IMPREGNATION OF FIBROUS FILLER AND DOSED APPLICATION OF EPOXY BINDER WITH USING ULTRASONIC ON THEM

It was stated that the basic processes of impregnation and dosed application are the important parts of the production of prepreg for polymer composite materials (PCM). This is because the quality of the impregnation is influenced by such factors as the presence or absence of air inclusions (so-called "bottle effect") in the structure of the impregnated fibrous filler during its impregnation, the homogeneity and the viscosity of the polymeric binder, good surface wettability of fibrous filler and so on.

The essence of the developed energy-efficient technological foundations is based on the integrated use of ultrasonic for the basic processes of manufacture of prepregs to overcome the above said drawbacks in their preparation.

Studies have shown that the effective effect of ultrasonic helps to improve the homogenization of the polymer binder, activation of fiberfill surface to improve its wettability with the polymer binder drainage structures fiberfill right before impregnation and to increase the productivity of the process of impregnation and dosed application of polymer binder by increasing the speed of a fiber-fill drawing with improving of properties of the final solidified PCM.

Furthermore, it was found out that the use of ultrasonic exposure to the impregnated fibrous filler in the bath and also to already impregnated fibrous filler may be regarded as an effective method for automatically maintaining of the required amount of containing of the binder polymer in the impregnated fibrous filler.

In addition, due to the action of ultrasonic reduces cumulative time of receipt of the prepregs, which ultimately also contributes to energy saving in the preparation of prepregs.

The result of the application of the developed technological bases and the equipment is the increase of productivity of the impregnation processes and dosed application of polymer binder, i.e. speed of drawing of the material and speed of removal of excess polymer binder in the preparation of a homogeneous impregnated material with virtually no air pockets.

This allows recommending the developed new technological basis of three-stage ultrasonic processing and the necessary equipment as a reliable means to maintain a predetermined value of the quantity (stabilization) of content of the polymer binder impregnated fabric filler.

A number of case studies (including the use of impregnation-drying machine MPT-3M) with the developed technological bases and equipment, providing energy saving process of preparing a polymer binder, impregnating a fibrous filler and dosed application to them the polymer matrix using ultrasonic was studied.

It is noted that with the use of the developed technological bases and equipment is achieved the use of highly viscous and high concentrated impregnating compositions, and compositions with the disperse filler.

Keywords: technology, impregnation, glass-cloth, epoxy, polymer, resin binder, ultrasonic, energy saving.

References

1. *Tsiplakov O. G.* Nauchnie osnovi tekhnolohyy kompozytsyonno-voлокnystikh materyalov [Scientific basis of the technology of composition-fibrous materials] / O. H. Tsiplakov. – Perm, 1974. – 317 s.
2. *Kerber M. L.* Polymernie kompozycyonnie materyali. Struktura. Svoystva. Tekhnolohyy [Polymer composite materials. Structure. Properties. Technology] / M. L. Kerber, V. M. Vynogradov, Gh. S. Gholovkyn i dr.; pod red. A. A. Berlyna. – SPb. : Professyja, 2008. – 560 s.
3. *Kolosov O. Ye.* Analiz osoblyvostei prosochivalno-sushylnoho obladnannia dlia vyhotovlennia preprehiv, a takozh perspektyvnosti vykorystannia ultrazvuku dlia yikh enerhooshchadnoho oderzhannia [Analysis of features of equipment for prepregs and prospects for using of ultrasound to obtain its with saving of energy] / O. Ye. Kolosov // *Nauk. visn. Nats. tekhn. un-tu Ukrainy «Kyiv. politekhn. in.-t»*; ser. «Khim. inzheneriia, ekolohiia ta resursozberzhennia». – 2013. – № 1 (11). – S. 5–16.
4. *Kolosov O. Ye.* Formuvannia polimernykh kompozytsiynykh materialiv iz zastosuvanniam fizyko-khimichnoi modyfikatsii [Formation of polymer composite materials using physical and chemical modification. Effective treatment and equipment for physical and chemical modification] / O. Ye. Kolosov, V. I. Sivetskyi. – K. : NTUU KPI. – 2006. – 196 s.

5. Kolosov O. Ye. Tekhnolohiia oderzhannia bahatokomponentnykh epoksyopolimeriv iz zastosuvanniam napravlenoi fizyko-khimichnoi modyfikatsii [Technology of multi-component epoxy polymers using directional physical and chemical modification] / O. Ye. Kolosov, V. I. Sivetskyi, Ye. M. Panov. – K. : NTUU KPI, 2010. – 220 s.
6. Kolosov O. Ye. Matematychnе modeliuвання bazovykh protsesiv vyhotovlennia polimernykh kompozitsiinykh materialiv iz zastosuvanniam ultrazvukovoi modyfikatsii [Mathematical modeling of basic processes of manufacture of polymer composite materials using ultrasound modification] / O. Ye. Kolosov, V. I. Sivetskyi, Ye. M. Panov ta in. – K. : VD “Edelveis”, 2012. – 268 s.

УДК 681.3.06

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

ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Розглянуто задачу статичної оптимізації зневоднення та гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі за квадратичним критерієм якості. Одержано оптимальні значення витрат вихідного розчину й теплоносія – повітря.

Ключові слова: оптимізація, псевдозріджений шар, зневоднення, гранулювання

© Корнієнко Б. Я., 2014.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. Протягом останніх 15 років внаслідок дії кризових факторів у сільському господарстві України суттєво зріс дефіцит азотних, фосфорних, калійних і комплексних мінеральних добрив. Повноцінний урожай сільськогосподарських культур без використання добрив та сівозмін є майже неможливим. Для вирішення агроекологічних проблем, відновлення й підвищення родючості ґрунтів особливу увагу слід звернути на внесення органічної речовини в ґрунт у формі сучасних ефективних комплексних орґано-мінеральних добрив, складовими компонентами яких є основні елементи мінерального живлення рослин (азот, фосфор, калій), мікродомішки та органічні гуміновмісні речовини (торф, сапропель, буре вугілля). Це дозволить поєднати корисні властивості органічних і мінеральних добрив, уникнувши недоліків, характерних для кожного з них. У технології виробництва мінеральних добрив однією з основних стадій формування якості продукту є гранулоутворення з подальшою чи одночасною стабілізацією структури (сушінням або охолодженням) та виділенням товарної фракції [1]. У багатьох випадках як енергоефективну застосовують техніку псевдозрідження [2].

Існує низка підходів до математичного моделювання зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі [3]. Для задачі оптимізації запропоновано використовувати математичну модель, що враховує взаємозв'язок між різними параметрами процесу за наявності двох фазових переходів – видалення розчинника та утворення шару мікрокристалів на поверхні гранул [4].

Промислова експлуатація грануляторів із псевдозрідженим шаром свідчить, що на надійну роботу такої технологічної системи впливає велика кількість чинників. Їх вплив на стійкість роботи технологічної системи виробництва добрив із заданими властивостями дотепер вивчено не повністю. Попри те, що деякі виробництва працюють понад 25 років, оптимальні режими ведення гранулювання й зневоднення не знайдені.

Метою статті є дослідження неперервного безрециклового процесу одержання гранульованого продукту заданого дисперсного складу та обговорення результатів статичної оптимізації зневоднення і гранулоутворення з водяних розчинів сульфату амонію із застосуванням гранулятора з псевдозрідженим шаром.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи природу процесу, доцільною є оптимізація шляхом зміни витрат повітря й вивантаження частини продукту з апарата для підтримання заданого перепаду тиску в шарі [5]. Пропонується розглянути як керівні впливи витрати повітря й вихідного розчину.

Під час аналізу процесів, що супроводжуються фазовим переходом, із точки зору оптимізації, суттєвий вплив на кінетику процесу мають енергетичні показники. Мінімізуючи відхилення температури шару і витрат потужності на процес, вибрано квадратичний критерій якості:

$$I = 0,5q(T_{\text{ш}} - T_{\text{ш}}^{\text{зад}})^2 + 0,5r_1 G_{\text{п}}^2 + 0,5r_2 G_{\text{п}}^2 \rightarrow \min ;$$