

extrudate swell. [Текст] / *R.I.Tanner*, // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1980- v.6-p.289. **3.** *Allain, C.*, Die swell in semi-rigid polymer solutions. [Текст] / *C. Allain, M. Cloitre, P. Perrot* // *Eur. J. Mech, B/Fluids* 1993- v.12- №2- p. 175-186. **4.** *Beraud, C.* A finite element method for computing the flow of multi-mode viscoelastic fluids: comparison with experiments. [Текст] / *C. Beraud, A. Fortin, T. J. Coupez* // *Non-newtonian Fluid Mech.* 1998- v.75- p. 1-23. **5.** *Silliman, W.J.* Separating flow near a static contact line: slip at the wall and shape of the free surface. [Текст] / *W.J. Silliman, L.E. Scriven* // *J. Comput. Phys.* 1980- v.34- p.287-313. **6.** *Liu, T.* Finite difference solution of a newtonian jet swell problem. №74 [Текст] / *T. Liu, Cheng T.* // *Int. J. For Num. Meth. In Fluids.* -1991 v. 12- p. 125-142 **7.** *Phan-Thien, N.* Influence of wall slip on extrudate swell: a boundary element investigation. [Текст] / *N. Phan-Thien* // *J. Non-newtonian Fluid Mech.* 1988- v.26- p.327. **8.** *Ramamurthy, A.V.* Wall slip in viscous fluids and influence of materials of constructions. [Текст] / *A.V. Ramamurthy* // *J. Rheology* 1986- v.30- p.337. **9.** *Панов, А.А.* Разработка конструкций и метода расчета многоручьевых экструзионных головок: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 [Текст] / *А. А. Панов* // Уфа, 2002. – 165с. **10.** ANSYS POLYFLOW 12.1 User's Guide // ANSYS, Inc., 2009. - 859 p. **11.** *Гадельшина, Г.А.* Моделирование течений неньютоновских жидкостей на выходе из экструдера: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05 [Текст] / *Г. А. Гадельшина* // Казань, 1999. – 126с.

Надійшла до редколегії 20.04.2013

УДК 628.027.3

**Дослідження ефекту розбухання при екструзійному формуванні полімерних профілів / О. Л. Сокольський, М. А. Романченко, К. Г. Коваленко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 26 (999). – С. 84-88. – Бібліогр.: 11 назв.

Проведены исследования эффекта разбухания при экструзионном формировании полимерных профилей; определены зависимости распределения скоростей сдвига и линейных скоростей по длине профиля; проанализирована зависимость коэффициента разбухания от коэффициента трения.

**Ключевые слова:** полимеры, экструзия, эффект разбухания, вязкоупругость.

Research of the swelling effect in extrusion molding polymer profiles was done; the relationship between the shear rate and linear velocity along the length profile was defined; the dependence of swelling coefficient on friction coefficient was analyzed.

**Keywords:** polymers, extrusion, swelling effect, viscoelasticity.

УДК 678.057

**В. І. СІВЕЦЬКИЙ**, канд. техн. наук, проф. каф., НТУУ «КПІ», Київ;

**О. Л. СОКОЛЬСЬКИЙ**, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ;

**М. С. КУШНІР**, аспірант, НТУУ «КПІ», Київ;

**О.В. РОСЛОВ**, студент, НТУУ «КПІ», Київ

## МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ В ДИНАМІЧНОМУ ЗМІШУВАЧІ ЕКСТРУДЕРА

Проведено чисельне моделювання динамічного змішувача бар'єрного типу при нестационарних умовах з врахуванням ефекту дисипації. Показано результати моделювання, що дозволяють досліджувати динаміку зміни температур та гідравлічного опору при течії полімерних матеріалів в змішувальних елементах та здійснювати вибір оптимальних конструктивних параметрів змішувальних елементів або обирати технологічні режими процесів змішування полімерних композицій.

**Ключові слова:** динамічний змішувач, моделювання, гомогенізація, змішування.

**Вступ.** Якість продукції з термопластичних полімерних матеріалів часто залежить від якості змішування базових полімерів з різноманітними інгредієнтами: наповнювачами, стабілізаторами, барвниками та іншими модифікаторами. Особливо в разі використання вторинної полімерної сировини необхідно забезпечити

© В. І. СІВЕЦЬКИЙ, О. Л. СОКОЛЬСЬКИЙ, М. С. КУШНІР, О.В. РОСЛОВ, 2013

гомогенізацію полімерної композиції, тобто вирівнювання вмісту інгредієнтів і властивостей матеріалу по всьому його об'єму. Процеси змішування реалізуються як на стадіях готування полімерних композицій, так і на стадії переробки у виробі і деталі.

На сьогодні, незважаючи на те, що процеси змішування і гомогенізації набули надзвичайно великого значення у виробництві, ці процеси ще досить погано вивчені. Полімерні композиції є складними системами, що часто обумовлює емпіричний підхід у дослідженнях та відсутність теоретичних розробок. Існуючі фізичні і математичні моделі процесу плавлення термопластичних полімерів не повністю відображають різноманітність процесів, які відбуваються в черв'ячних машинах, не враховують ряд важливих факторів і потребують подальшого уточнення. Тому для ефективного виробництва термопластів і виробів з них необхідно знати основні закономірності процесу змішування і мати надійні критерії оцінки якості отриманої суміші.

**Аналіз наявних методів моделювання процесів змішування.** Розплави полімерів мають властивості високов'язкої неньютонівської рідини з числом Рейнольдса, меншим за одиницю. Тому сучасні теорії змішування розплавів будуються на припущенні про ламінарний рух суміші. Як правило, використовуються два підходи. Перший (метод смуг) базується на попередньому визначенню поля швидкостей та деформацій суміші і далі по емпіричним залежностям знаходиться ширина смуг окремих компонент, яка приймається за характеристику якості суміші. Другий підхід (метод маркерів) відрізняється тим, що по знайденому полю швидкостей будуються траєкторії руху позначених маркерами елементарних об'ємів кожної компоненти суміші, а потім, по щільності їх в перерізах каналу, де рухається розплав, визначається концентрація окремих складових і якість суміші. Основним недоліком першого підходу є те, що він розрахований на рух суміші по простим траєкторіям, при яких циркуляційні процеси мало впливають на змішування компонент і не враховуються. Але в сучасному обладнанні широко використовуються змішувальні елементи, які збурюють потоки розплавів і примушують рухатись частинки суміші по дуже складним траєкторіям. Другий підхід дозволяє отримати важливу інформацію про закономірності руху кожної компоненти суміші, але при визначенні концентрацій компонент значно ускладнюється контроль закону збереження маси кожної із складових суміші, що може приводити до викривлення результатів розрахунків. Крім того, обидва підходи не передбачають врахування впливу дифузійних процесів на інтенсивність змішування, залежності руху суміші від властивостей компонент, тощо.

**Постановка задачі.** Найбільш обґрунтованим і універсальним підходом до моделювання процесів ламінарного змішування полімерних композицій є підхід, що базується на фундаментальних законах збереження (маси, руху та енергії) в рамках механіки суцільного середовища [1]. Використання зазначених законів в загальному вигляді призводить до зростання трудомісткості завдань, але, зважаючи на постійне підвищення вимог до точності розрахунків і на сучасні досягнення в області чисельних методів і комп'ютерної техніки, такий підхід є цілком виправданим і перспективним. Така математична модель описана в роботі [2].

Інтегральним показником степені гомогенізації полімерної композиції по об'єму робочої області може бути рівномірність розподілу температур в ній, оскільки для полімерних матеріалів характерним є те, що теплообмін в них внаслідок низької

теплопровідності, високої в'язкості та молекулярної маси відбувається переважно за рахунок конвективного переносу об'ємів матеріалу.

До основних задач, які пов'язані з процесами в зоні змішувача, слід віднести:

визначення розподілу швидкостей, в'язкості і температури матеріалу в динамічного змішувача з врахуванням впливу дисипації і конвекції;

визначити вплив геометричних параметрів статора та ротора змішувача на параметри полімеру;

**Результати досліджень.** Моделювання реальних промислових процесів змішування і гомогенізації полімерних розплавів в неізотермічних режимах екструзійного процесу проводилося з використанням змішувача динамічного типу (рис.1). Особливістю досліджуваного змішувача є те, що він включає в себе вхідний кільцевий канал 1, вхідне 2 та вихідне 3 поглиблення, розділені між собою виступами 4, 5, які називаються бар'єрними гребенями, вихідний кільцевий канал 6.

При обертанні ротора змішувача поглиблення на корпусі періодично сполучаються з поглибленнями на роторі (рис.2), тому процес змішування є нестационарним

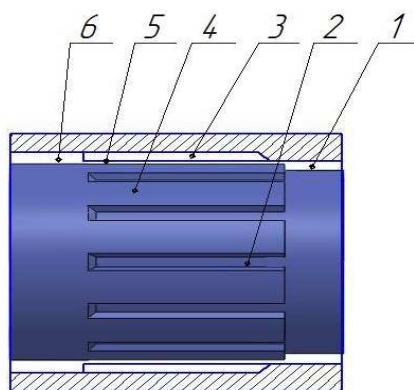


Рис. 1 - Динамічний змішувач: 1 – вхідний кільцевий канал; 2 – вхідне поглиблення ротора; 3 – вихідне поглиблення корпусу; 4 – бар'єрний гребінь ротора; 5 – бар'єрний гребінь корпусу; 6 – вихідний кільцевий канал

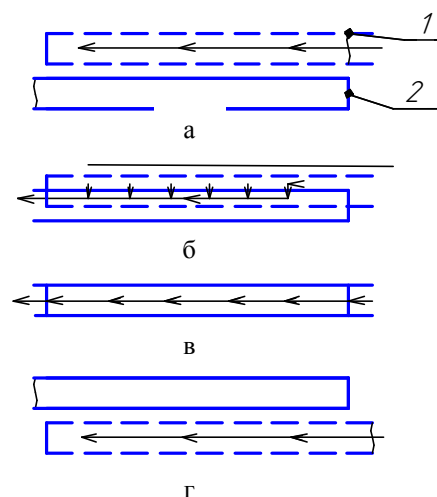


Рис.2 - Схема течії матеріалу в каналах ротора і корпусу: 1 – вхідне поглиблення ротора; 2 – вихідне поглиблення корпусу: а – поглиблення не сполучаються; б – сполучаються частково; в – сполучаються повністю; г – поглиблення вийшли з сполучення

Чисельні дослідження проводилися з метою дослідження розподілу температури з урахуванням енергії дисипації і при різних теплофізичних характеристиках матеріалу, конструктивно-геометричних параметрах змішувача, витратах і теплових режимах. Рівномірність розподілу температур на виході зі змішувача можна вважати критерієм ступені гомогенізації.

В якості досліджуваного матеріалу розглядався поліетилен високої густини марки ПЕВГ 15802-020. Реологічні і теплофізичні властивості матеріалу задавалися з [3].

Швидкість на вході в змішувач задавалася по параболічному закону, з середньою величиною  $V = 20$  мм/с. Обертаний рух задавався внутрішньому циліндру (ротору), а корпус вважався нерухомим.

В якості об'єкту для моделювання взято змішувач (рис.1) загальною довжиною  $L = 85$  мм встановленого на черв'як діаметром 60 мм. Корпус змішувача містить

поглиблення довжиною  $L1 = 50\text{мм}$  і глибиною  $4\text{мм}$ , такі ж поглиблення виконано на роторі змішувача. Довжина вихідної ділянки  $L2 = 20\text{мм}$  і товщина  $h = 2\text{мм}$ .

Дослідження зміни температури, тиску та швидкості руху полімеру в каналах бар'єрного змішувача проводили по центральному повздовжньому перерізу поглиблення ротора на половині його глибини, в момент, коли на нього знаходиться бар'єрний гребінь корпусу тобто поглиблення між собою сполучаються між собою лише через мінімальний зазор між корпусом та ротором (рис.2г).

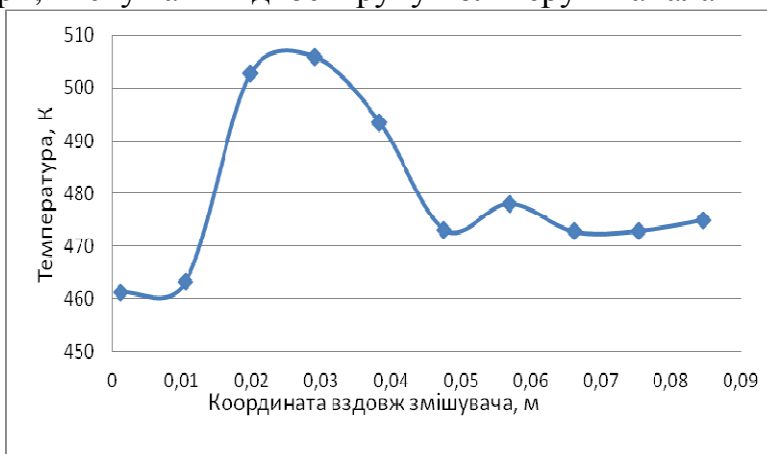


Рис. 3 - Графік розподілу температури по довжині каналу змішувача

На рис.3 зображено графік розподілу температури полімеру по довжині каналу бар'єрного змішувача.

На початковій ділянці  $0,015\text{--}0,03\text{м}$  каналу температура піднімається з  $460\text{К}$  до  $505\text{К}$ , тоді як різниця між вхідною і вихідною температурою становить  $10,5$  градусів. Це пов'язано з ефектом дисипації енергії в зазорі над гребнями внаслідок різкого збільшення швидкості зсуву і перетікання полімеру через нього в канал.

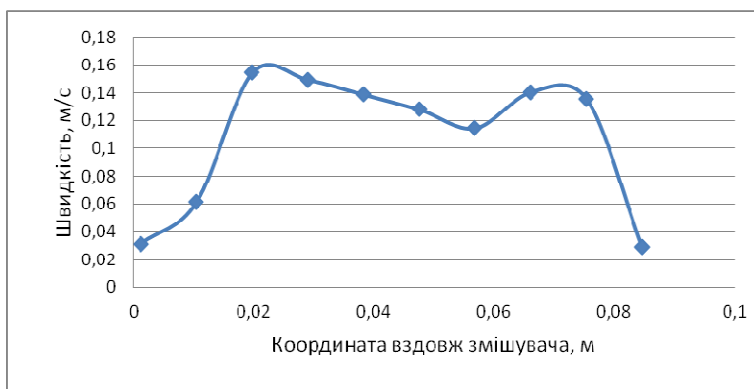


Рис. 4 - Графік розподілу тангенціальної складової швидкості по довжині змішувача

На розподілі тангенціальної складової швидкості по довжині змішувача (рис.4) спостерігаються максимуми в місцях переходу з циліндричного зазору в поглиблення.

Недоліком такого роду змішувачів є значний гідравлічний опір, тобто є виключно елементом, що споживає тиск (рис.5).



Рис. 5 - Графік розподілу тиску по довжині каналу змішувача

Перепад тиску по довжині каналу даного змішувача складає близько  $10\text{МПа}$ .

Доцільним вбачається вдосконалення конструкції змішувача на таку, що знизить його гідравлічний опір та сприяє генерації тиску.

**Висновок.** Метод чисельного моделювання дозволяє досліджувати динаміку зміни температурної неоднорідності при течії полімерних матеріалів в змішувальних елементах і їх опір та здійснювати вибір оптимальних конструктивних параметрів

змішувальних елементів або обирати технологічні режими процесів змішування полімерних композицій.

Перспективою подальших досліджень може бути розробка методики визначення геометрії динамічних змішувачів за необхідним рівнем гомогенізації та вдосконалення конструкції змішувача з метою зниження гідравлічного опору.

**Список літератури:** 1. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды./ Седов Л.И. М: Наука, т.1 (т.2) – 1970, 492 (568) с. 2. *Сахаров А.С., Колосов А.Е., Сокольский А.Л., Сивецкий В.И.* Моделирование процесса смешения полимерных композиций в экструзионном смесителе барьерного типа. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. - №12. – С.3-7. 3. Наполненные термопласты: Справочник / *Пахаренко В.А., Зверлин В.Г., Кириенко В.М.*; под общ. ред. Липатова Ю.С.- К.: Техніка, 1986.- 182с.

Надійшла до редколегії 20.04.2013

УДК 678.057

**Моделювання гідродинаміки та гомогенізації полімерних композицій в динамічному змішувачі екструдера / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, М. С. Кушнір, О.В. Рослов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 26 (999). – С.88-92. – Бібліогр.: 3 назв.**

Проведено численне моделювання динамічного смесителя барьерного типа при нестационарных условиях с учетом эффекта диссипации. Показаны результаты моделирования, позволяющие исследовать динамику изменения температур и гидравлического сопротивления при течении полимерных материалов в смесительных элементах и осуществляют выбор оптимальных конструктивных параметров смесительных элементов или выбирать технологические режимы процессов смешивания полимерных композиций.

**Ключевые слова:** динамический смеситель, моделирование, гомогенизация, смешивание.

A numerical simulation of the dynamic barrier-type mixer with non-stationary conditions, taking into account the effect of dissipation. Showing the results of the simulation, allowing us to investigate the dynamics of change of temperature and pressure drop in the flow of polymer materials in the mixing elements and the choice of optimal design parameters of mixing elements or choose technological modes of mixing of polymer compositions.

**Keywords:** dynamic mixer, modeling, homogenization, mixing.

УДК 621.789

**О. Л. СОКОЛЬСЬКИЙ**, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ;  
**І. В. СЛІСАРЕНКО**, студент, НТУУ «КПІ», Київ

## **ПІДВИЩЕННЯ РІВНОТОВЩИНОСТІ ТЕРМОФОРМОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ**

Запропонована методика вдосконалення процесу термоформування полімерних виробів. Показано результати експериментальних та чисельних досліджень для реалізації даної методики. Це дає можливість отримувати полімерні вироби з листових та плівкових заготовок з рівномірною товщиною стінки та змогу економії полімерної сировини за рахунок її раціонального використання.

**Ключові слова:** термоформування, механічне напруження, механічне навантаження, деформація.

**Вступ.** Широке поширення процесів термоформування для виготовлення полімерних виробів, зокрема одноразових лотків і контейнерів, пояснюється простотою виготовлення, компактністю, відносною дешевизною використовуваного устаткування і технологічного оснащення. На відміну від технології лиття під тиском при виготовленні виробів методом термоформування потрібно значно простіша конструкція формуючих елементів, а виготовлення готової продукції здійснюється з листових рулонних матеріалів.

© О. Л. СОКОЛЬСЬКИЙ, І. В. СЛІСАРЕНКО, 2013