

## ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ПРОЦЕСАХ ПЕРЕРОБКИ ВТОРИННИХ ПОЛІМЕРІВ

Т. М. Терещенко, С. Д. Кузнiченко, Л. Б. Коваленко

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016, Україна. E-mail: tereshchenko.odessa@gmail.com

Наведено загальну класифікацію вторинних полімерних матеріалів за джерелами їхнього виникнення; визначені ефективні способи переробки відходів полімерів, які знижують негативний вплив пластмас на навколишнє середовище. Визначено структуру відходів полімерних матеріалів за видами полімерів. Визначено вплив кількості циклів переробки на температуру деструкції полімеру. Обрана математична модель для розрахунку технологічних і конструктивних параметрів переробки вторинної полімерної сировини. Використання математичної моделі течії розплаву полімерного матеріалу в розподільних каналах екструзійного та соекструзійного обладнання дозволило розрахувати раціональні конструктивні параметри з урахуванням зміни реологічних характеристик вторинної полімерної сировини. Каналом для дослідження обрано простий конічний канал із заданими конструктивними параметрами. Отримано залежності різновиточності виробу від індексу течії полімеру дозволяють спроектувати канали, які забезпечують якісну переробку відходів пластмас.

**Ключові слова:** полімери, математичне моделювання, відходи, реологія.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Т. М. Терещенко, С. Д. Кузнiченко, Л. Б. Коваленко

Одесский государственный экологический университет

ул. Львовская, 15, г. Одесса, 65016, Украина. E-mail: tereshchenko.odessa@gmail.com

Представлена общая классификация вторичных полимерных материалов по источникам возникновения; приведены эффективные способы переработки отходов полимеров, которые снижают негативное влияние пластмасс на окружающую среду. Определена структура отходов полимерных материалов по видам пластмасс. Представлена графическая зависимость количества циклов переработки на температуру деструкции полимера. Выбрана математическая модель для расчета технологических и конструктивных параметров переработки вторичного полимерного сырья. Использование математической модели течения расплава полимерного материала в распределительных каналах экструзионного и соэкструзионного оборудования позволило рассчитать рациональные конструктивные параметры с учетом изменения реологических характеристик вторичного полимерного сырья. В качестве исследуемого канала был выбран простой конический канал с заданными конструктивными параметрами. Полученные зависимости разноточности изделия от индекса течения полимера позволяют спроектировать каналы, которые обеспечивают качественную переработку отходов пластмасс.

**Ключевые слова:** полимеры, математическое моделирование, отходы, реологія.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Одним з найбільш відчутних результатів антропогенної діяльності є утворення відходів, серед яких відходи пластмас займають особливе місце в наслідок своїх унікальних властивостей. Постійне використання та зростання кількості пластичних мас в різних сферах діяльності стає причиною негативного впливу відходів на навколишнє середовище. Зменшення шкоди та утилізація відходів полімерних матеріалів є актуальною загальносвітовою проблемою через вплив на екологію планети. Екологічна грамотність пересічних громадян та національні інтереси розвинених держав стали факторами впливу на розробку загальнонаціональних програм з утилізації полімерних виробів способами, які забезпечують мінімальний вплив на навколишнє середовище. Поховання та спалювання промислових та побутових полімерних відходів визнані непопулярними і не розглядаються як способи утилізації відходів пластмас. Серед тих, що визнаються ефективними та безпечними з огляду на екологію, слід визначити наступні: переробка біополімерів, термічна та хімічна переробка, а також вторинне використання полімерних матеріалів.

Метою роботи є розробка конструктивних параметрів технологічного обладнання переробки вторинних полімерних матеріалів з використанням

математичних моделей процесів розподілу розплаву в каналах екструзійних та соекструзійних головок.

### МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Вторинна переробка полімерних матеріалів має декілька напрямів, які залежать від якості та властивостей відходів.

Незважаючи на велику кількість видів полімерних матеріалів та розвиток технологій сумісного використання пластмас різних типів, найчастіше використовують наступні полімери: поліетилен (ПЕ), поліетилентерефталат (ПЕТФ), полівінілхлорид (ПВХ), полістирол (ПС), поліпропілен (ПП). За різними оцінками експертів [1–4] структура відходів полімерних матеріалів за видами пластмас має вигляд (рис. 1).

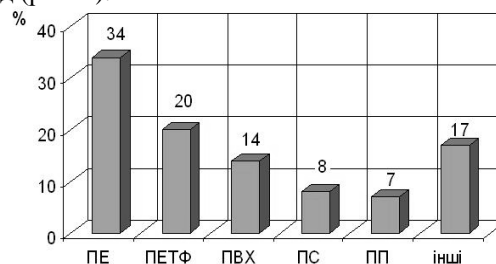


Рисунок 1 – Структура відходів полімерних матеріалів за видами пластмас

При цьому слід зазначити, що відсоток відходів пластмас, які повторно використовуються в технологічних процесах переробки вторинних полімерних матеріалів залишається досить невеликим. Так за даними різних дослідників середні показники вторинних полімерів, що переробляються наступні: ПЕ – 20 %, ПЕТФ – 12 %, ПВХ – 10 %, ПС – 12 %, ПП – 7 %.

Така невелика кількість відходів пластмас, що переробляються, обумовлена кількома причинами. Вихідні полімери мають більш стабільні та кращі показники по фізико-механічним властивостям в порівнянні з вторинними матеріалами, які зібрані і підготовлені з відходів. Деякі види продукції за санітарними нормами забороняється виробляти з використанням вторинної сировини. Дуже часто виникають ситуації, коли продукція, яка виготовлена із вторинних полімерів, не задовольняє естетичним критеріям.

Найбільш прості в переробці є вторинні пластмаси, які утворюються в технологічних процесах на

підприємствах з виготовлення полімерних виробів, наприклад, технологічні відходи та брак виробництва. Це пов'язано з чистотою та однорідністю таких відходів, а також досить прогнозованими технологічними властивостями. Інша група вторинних полімерних матеріалів – це побутові відходи. Вони, як правило, мають різноманітні вclusions, високу ступінь забруднення та знаходяться в складі інших відходів.

Класифікація відходів полімерних матеріалів за місцем виникнення наведена у табл. 1.

Крім показників якості готових виробів виникають труднощі, які пов'язані з процесом отримання цих виробів із вторинної сировини. Технологічні процеси, в яких використовуються відходи пластичних мас, повинні враховувати зміни властивостей матеріалів, такі як часткова деструкція, вміст наповнювачів та домішок, нестабільність реологічних властивостей, неполімерні вclusions.

Таблиця 1 – Класифікація відходів полімерних матеріалів за місцем виникнення

Група відходів полімерів	Джерело утворення	Вміст в загальному об'ємі, %	Способи переробки
Технологічні відходи виробництва	Процеси синтезу та переробки первинних полімерів (кромки, обрізки, літники, уламки та ін.)	5–35	Повторне використання в технологічних процесах виготовлення нових виробів
Відходи виробничого споживання	Галузі промисловості, в яких використовують полімерні вироби (тара і упаковка, с/г плівка, пакувальні мішки для добрива та ін.)	10–25	Повторне використання в технологічних процесах виготовлення нових виробів після очищення, сортування та подрібнення
Відходи громадського споживання	Міські звалища, побутові відходи (забруднені, змішані, важко ідентифікуються)	>50	Збір, сортування, очищення, додаткова модифікація з метою поліпшення технологічних властивостей, обмежене використання в процесах виробництва нових якісних виробів

Властивості вторинної полімерної сировини значно відрізняються від властивостей первинного полімеру. Зниження молекулярної маси стає причиною зменшення в'язкості розплаву полімеру, в наслідок чого збільшується показник плинності розплаву. Це змінює реологічну характеристику полімерного матеріалу, як наслідок знижується термостійкість. З кожним наступним циклом переробки  $k$  скорочується час настання деструкції  $t_{дестр}$  (рис. 2).

Підвищення стабільності реологічних характеристик вторинного полімеру можливо за рахунок додавання стабілізаторів, які мають досить високу вартість. Це знижує конкурентоспроможність готових виробів за рахунок підвищення вартості сировини. Інший шлях компенсації зниження реології полягає в точному розрахунку та конструюванні технологічного обладнання. Така зміна властивостей полімерів є обмеженням при конструюванні технологічного обладнання для переробки вторинної полімерної сировини, наприклад, для розподільних каналів екструзійних та соекструзійних головок. Для забезпечення стабільності процесу переробки

вторинних полімерів при конструюванні розподільних каналів головок необхідно враховувати, що тиск, що створюється в каналі, повинен бути достатнім для розподілу матеріалу, а час перебування в ньому розплаву полімеру бути мінімальним.

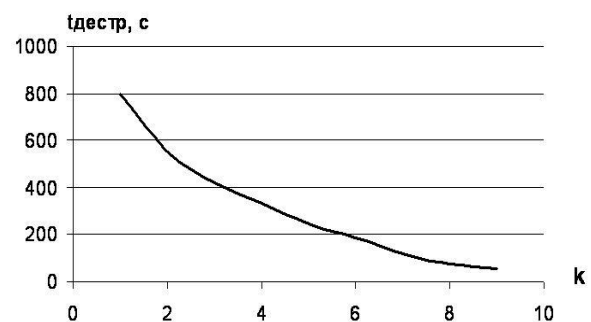


Рисунок 2 – Зниження часу деструкції з кожним циклом переробки

Перепад тиску на ділянках розподільних каналів визначається наступним чином [5, 6]:

$$\Delta P = (R \cdot Q)^n \cdot \mu, \quad (1)$$

де  $\Delta P$  – перепад тиску на ділянці;  $R$  – коефіцієнт спротиву ділянці;  $Q$  – витрати матеріалу на ділянці;  $\mu$  – ефективна в'язкість розплаву полімеру;  $n$  – індекс течії розплаву.

Однією з найбільш поширених моделей, що описують в'язкі неньютонівські рідини, є модель, що підкоряється ступеневому закону [7, 8]:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{b(T-T_0)} \gamma^{n-1}, \quad (2)$$

де  $T$  – температура переробки полімеру;  $T_0$  – температура плавлення полімеру;  $\mu$  – в'язкість розплаву при температурі  $T$ ;  $\mu_0$  – в'язкість розплаву при одиничній швидкості зсуву;  $b$  – коефіцієнт, який визначає щільність температурних кривих;  $\gamma$  – швидкість зсуву;  $n$  – індекс течії розплаву.

Сучасні конструкції екструзійних та соекструзійних головок ускладнені за рахунок використання спіральних конічних каналів, каналів типу «виноградне гроно» та ін. При цьому досягається висока рівномірність розподілу полімерного матеріалу в каналі, проте різко зростає час перебування полімеру в каналі. При переробки вторинних полімерних матеріалів це стає технологічним обмеженням. З вище зазначеного можна зробити висновок, що конструкція розподільного каналу для переробки вторинного полімерного матеріалу повинна бути як можна простіше, а саме копільник і конічний розподільник. Рівномірний розподіл матеріалу має досягатися за рахунок точності виготовлення каналу і точності опису всіх процесів, що відбуваються в ньому. Для цього необхідні математичні моделі течії розплаву полімеру в розподільних каналах з урахуванням зміни реологічної характеристики в широкому діапазоні швидкості зсуву. В роботі [9] запропонована математична модель опису течії розплаву вторинної полімерної сировини, яка враховує реологічні властивості розплаву полімерного матеріалу. В основу моделі покладено принцип електрогідрравлічних аналогій, використання якого дозволяє визначити технологічні параметри в кожній частині розподільного каналу. Така модель дає можливість визначити ділянки каналу, на яких можливо підвищення тиску або зниження швидкості, що може стати причиною деструкції полімерного матеріалу. Формули (1), (2) показують, що індекс течії розплаву суттєво впливає на технологічні параметри переробки. З іншого боку, цей індекс відображає властивості матеріалу і змінюється від циклу до циклу повторної переробки вторинних полімерів. Дана модель використовувалася в роботі для дослідження процесу течії в каналі екструзійної головки.

Існує декілька різновидів конструкцій простих каналів екструзійних головок: циліндрична, конічна, без перепаду діаметру копільника та ін. Вони відрізняються рівномірністю розподілу розплаву полімерного матеріалу. В якості каналу для дослідження було обрано простий конічний канал [10, 11]. Він складається з двох складових: копільника та конічної частини. Діаметр копільника зменшується від місця вприску розплаву полімерного матеріалу в

канал рівномірно. Конічна частина має незмінний зазор від копільника до виходу із каналу. При цьому діаметр цієї частини також рівномірно зменшується. Такі канали мають достатньо просту конструкцію, що важливо при проектуванні та виготовленні технологічного обладнання. При цьому вони забезпечують якісний та рівномірний розподіл розплаву полімеру при мінімальному часі знаходження матеріалу під впливом високих температур та тиску, що знижує вірогідність деструкції полімерної сировини. Такі канали широко використовують при виготовленні екструзійних та соекструзійних головок, які призначені для переробки полімерних матеріалів з низкою термічною стабільністю. До останніх належать вторинні полімерні матеріали. Розрахункова схема каналу представлена на рис. 3.

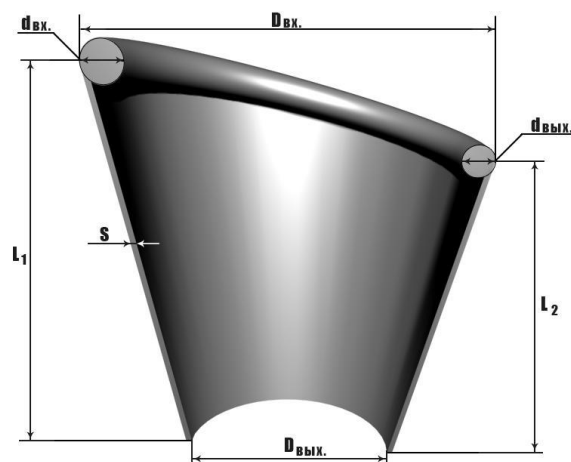


Рисунок 3 – Розрахункова схема конічного каналу

Конструктивні параметри каналу представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Геометричні параметри конічного каналу

№	Параметр	Од. вим.	Значення
1	Діаметр копільника на вході	мм	20
2	Діаметр копільника на виході	мм	15
3	Діаметр конічного каналу на вході	м	0,16
4	Діаметр конічного каналу на виході	м	0,11
5	Зазор в конічному каналі	мм	2 – 3
6	Висота конічного каналу на вході	м	0,15
7	Висота конічного каналу на виході	м	0,10

У якості параметрів моделювання було обрано величину зазору конічної частини каналу та індекс течії розплаву полімеру тому, що вони мають найбільший вплив на рівномірність розподілу полімеру на виході із каналу. Моделювання процесу розподілу вторинного полімерного матеріалу по конічному каналу головки здійснювалося для наступних значень зазору: 2 мм, 2,5 мм, 3 мм. Індекс течії розпла-

ву  $n$  змінювався в діапазоні від 0,14 до 0,28, з інтервалом 0,02. Якість переробки вторинних полімерів оцінюється рівномірністю розподілу розплаву в каналі, яка забезпечує мінімальні перепади товщини стінок готового виробу. Цей параметр впливає на якість та забезпечує стабільність фізико-механічних

характеристик виробів із вторинної полімерної сировини. Графічні залежності перепаду витрат на ділянках конічного каналу головки від індексу течії полімерного матеріалу для різних величин зазору представлено на рис. 4.

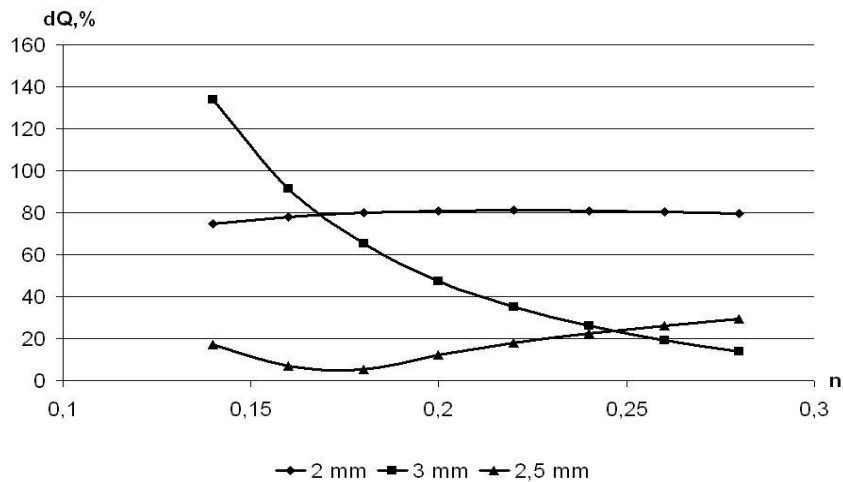


Рисунок 4 – Залежність перепаду товщини від індексу течії розплаву

Отримані залежності дозволяють визначити граничні значення величини зазору при заданих реологічних характеристиках розплаву вторинного полімерного матеріалу. Аналіз графіків та числових значень показав, що для даного каналу зазор на виході з конічної частини повинен бути в діапазоні 2,0 – 2,5 мм. При цьому забезпечується задовільний розподіл розплаву вторинного полімерного матеріалу в каналі екструзійної головки, перепад витрат розплаву полімеру по нижньому діаметру конічної частини каналу не перевищує 80% для зазору 2 мм і 30% для зазору 2,5 мм, індекс течії розплаву полімеру знаходиться в широкому діапазоні – від 0,14 до 0,28. Така зміна індексу враховує вплив кількості циклів переробки на якість вторинної полімерної сировини.

**ВИСНОВКИ.** В результаті проведених досліджень визначено структуру відходів полімерних матеріалів за видами пластмас. Найбільшу кількість становлять відходи поліетилену, який досить легко переробляється в нові вироби. Описана класифікація відходів полімерів за джерелами їхнього виникнення і представлені способи переробки. Визначено технологічні труднощі, які виникають в процесі вторинної переробки полімерів, які пов'язані зі зміною реологічних характеристик матеріалу. Наведено математичні залежності технологічних і реологічних параметрів, які показують вплив індексу течії розплаву на процес переробки вторинних пластмас. В якості обладнання для дослідження використовувався розподільний канал конічної форми з заданими геометричними параметрами. Математичне моделювання течії здійснювалося для широкого діапазону індексу течії, що характерно для процесів повторної переробки полімерних матеріалів.

Подальші дослідження дозволять визначити граничні значення кількості циклів переробки, в межах яких забезпечується задана якість виробів із вторинної полімерної сировини. При цьому такі

дослідження слід проводити для різних видів полімерних матеріалів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Королева О.А. Переработка отходов полимерных материалов // Твердые бытовые отходы. Научно-практический журнал. – 2005. – № 5. – С. 9–10.
2. Мымрин В.Н. Вторичная переработка полимерных материалов в Европе: новые и проверенные решения // Полимерные материалы. – 2013. – № 9. – С. 22–29.
3. Пиріков О.В., Ардацьєв В.Н. Огляд сучасних тенденцій використання полімерів в пакувальній галузі // Науковий вісник Полтавського університету споживчої кооперації України. – 2009. – №1(37). – С. 31–36.
4. Бухкало С.І. Деякі аспекти екологічної безпеки полімерної тари та пакування харчової промисловості // Наукові праці Одеської академії харчових технологій. – 2014. – Випуск 45. Т.3. – С. 76–79.
5. Michaeli W. Extrusion dies for plastics and rubber: design and engineering computations / Hanser Publishers, Munich, 1992. – 340 p.
6. Раувендаль К. Экструзия полимеров. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
7. Hammarström D. A Model for Simulation of Fiber Suspension Flows / KTH Mechanics, Royal Institute of Technology SE-10044 Stockholm, Sweden, 2004. – 125 p.
8. Weio C. Effect of micro-viscosity and wall slip on polymer melt rheology inside micro-channel / Матеріали конференції ANTEC, 2011. – Режим доступу: <http://www.plasticsengineering.org/polymeric/node/4897>.
9. Математическая модель процесса течения полимера в кольцевых распределительных каналах экструзионных головок / В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко, А.В. Гапонов // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у

машинобудуванні: Зб. наук. пр. Луганськ. – 2009. – С. 229–238.

10. Исследование течения расплава вторичного полимерного материала в распределительном канале под давлением / В.В. Дядичев, В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко, Мухамед Анис Фахид Аль Фаури. // Ресурсосберегающие технологии производства и

обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. Луганск. – 2004. – С. 72–77.

11. Levanichev, V. Study of multi-layer flow in coextrusion processes // TEKA Commission of motorization and power industry in agriculture. – 2014. – Vol. 14, Issue 1. – P. 144–153.

#### USE OF MATHEMATICAL MODELING FOR SECONDARY POLYMERS PROCESSING

T. Tereshchenko, S. Kuznichenko, L. Kovalenko

Odessa State Environmental University,

vul. Lvivska, 15, Odessa, 65016, Ukraine. E-mail: tereshchenko.odessa@gmail.com

**Purpose.** The amount of waste plastics is constantly growing. The variety of waste plastics types requires the development of new processes of secondary polymer recycling with a minimal impact on our environment. The disposal of waste plastics through the secondary manufacturing of end products is an important task for the European countries, including Ukraine. **Methodology.** This publication is the synthesis of the structural and technological parameters of the polymer recycling processes by using mathematical models of the melt flow channels in the distribution head extrusion. The application of the methods of mathematical modeling makes it possible to get an accurate picture of the processes that occur during the recycling of secondary polymers and define rational design parameters of the equipment which allow to obtain the high quality end products as per given technical characteristics. **Results.** During the studies it was identified the waste plastics structures by the type of plastic. Polyethylene constitutes the biggest part of plastics waste and is quite easily recycled into new products. It is described the classification of waste polymers by the place of origin and the ways of their processing. It is identified technological problems occurring during the recycling process which are associated with the change of the rheological characteristics of the material. It is illustrated the mathematical relationship between the technological and rheological parameters which demonstrates the influence of melt flow index in the process of recycling of the secondary plastics. The conically shaped distributing channel with predetermined geometric parameters was used as test equipment. Mathematical modeling of flow was realized for a wide range of flow index which is typical for the process of the secondary polymer recycling. **Originality.** The use of mathematical models of melt flow allows to calculate boundaries of the gap which will provide uniform distribution of material in the channel and a satisfactory wall gage of the end product. **Practical value.** Further studies are related to determine the limit number of recycling cycles of polymers during which changes of the rheological properties of the material has minimal impact on the quality of end products. References 11, tables 2, figures 4.

**Key words:** waste plastics, mathematical modeling, rheology

#### REFERENCES

1. Koroleva, O.A. (2005), "Recycling of Plastic Waste Materials", *Tverdye bytovyye othody. Nauchno-prakticheskiy zhurnal*, vol. 5, pp. 9–10.

2. Mymrin, V.N. (2013), "Recycling of Plastics in Europe: New and Proven Solutions", *Polimernyye materialy*, vol. 9, pp. 22–29.

3. Pyrikov, O.V., Ardatyev, V.N. (2009), "Review of current trends in the using of plastics in the packaging industry", *Naukovyy visnyk Poltavskogo universytetu spozhyvchoyi kooperatsiyi Ukrayiny*, vol. 1, no. 37, pp. 31–36.

4. Buhkalo, S.I. (2014), "Aspects of the environmental safety of plastic packaging in food industry", *Naukovi pratsi Odeskoyi akademiyi kharchovykh tekhnologiy*, iss. 45, vol.3, pp. 76–79.

5. Michaeli, W. (1992), *Extrusion dies for plastics and rubber: design and engineering computations*, Hanser Publishers, Munich, Germany.

6. Rauwendal, C. (2008), *Ekstruziya Polimerov* [Polymer extrusion], Profession, St. Petersburg, Russia.

7. Hammarström, D. A. (2004), *Model for Simulation of Fiber Suspension Flows*, KTH Mechanics, Royal Institute of Technology SE-10044, Stockholm, Sweden.

8. Weio, C. (2011), "Effect of micro-viscosity and wall slip on polymer melt rheology inside micro-channel", *Materialy Konferentsii ANTEC*: <http://www.plasticsengineering.org/polymeric/node/4897>.

9. Levanichev, V.V., Tereshchenko, T.M., Gaponov, A.V. (2009), "Mathematical Model for Polymer Flow Process in Annular Distribution Channel of Extrusion Dies", *Resource-Saving Technologies for Production and Pressure*, pp. 229–238.

10. Dydichev, V.V., Levanichev, V.V., Tereshchenko, T.M., Mohamed Fahid Anis Al Fauri (2004), "Research of Secondary Polymeric Material in the Melt Distribution Channel Under Constraint", *Resource-Saving Technologies for Production and Pressure*, pp. 72–77.

11. Levanichev, V. (2014), "Study of multi-layer flow in coextrusion processes", *TEKA Commission of motorization and power industry in agriculture*, vol. 14, iss. 1, pp. 144–153.

Стаття надійшла 26.11.2016.