

УДК 531.46, 678.073

doi:10.20998/2413-4295.2016.12.02

**ВПЛИВ ТИСКУ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НА КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ПО МЕТАЛЕВІЙ ПОВЕРХНІ****В. М. ВИТВИЦЬКИЙ\*, О. Л. СОКОЛЬСЬКИЙ, І. О. МІКУЛЬОНОК**

Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, УКРАЇНА

\*email: vitek5knaz@rambler.ru

**АНОТАЦІЯ** Наведено результати проведених досліджень руху полімерного матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера, а саме дослідження фрикційного режиму руху декількох типів полімерних гранул по поверхні робочих органів машини. Отримано залежності і проаналізовано вплив тиску на коефіцієнт тертя гранульованого полімерного матеріалу по металевій поверхні за різних температур, а також зміну визначених залежностей залежно від геометричних розмірів (висоти шару гранул) робочих органів екструдера, значення отримані при використанні проскопаралельної моделі екструзії.

**Ключові слова:** полімер, гранула, екструдер, металева поверхня, тертя, навантаження, температура, залежність

**INFLUENCE OF PRESSURE AND TEMPERATURE ON THE FRICTION GRANULAR POLYMERIC MATERIALS TO THE METAL SURFACES****V. VYTVYTSKYI\*, O. SOKOLSKYI, I. MIKULIONOK,**

Department of Chemical, polymer and silica engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Field of production of plastic products is one of the most important fields of the world economy, problems of polymers have been investigating and disclosing in scientific and technical articles of various periodical publications around the world. The most efficient for processing of polymeric raw materials is extrusion equipment, including screw extruders. The successful establishment of the new equipment and managing the process of recycling depends on the accuracy of account of friction on the surfaces of working machines. The purpose of the research are analysis of movement of polymer granules in a feeding zone in screw extruder, experimental determination of friction coefficient of granulated polymeric material on a metal surface, determination of friction coefficient depends on the load and temperature, and changes defined dependencies on changes geometrical dimensions of the working bodies in the extruder. Research of the material movement in a feeding zone is important and actual task, because the performance of the aforementioned zone determines the productivity of the whole process. The research conducted for the two types of polymer granules – copolymer of ethylene with vinyl acetate (sevilene) and polystyrene. Analysis of the results showed a general decrease of friction coefficient with increasing pressure, but upon reaching the maximum values at almost all curves is a transition through a minimum, after which values is begin to rise. For the sevilene the average friction coefficient is increases with increasing a depth of a channel and for polystyrene – is almost independent of changes a depth of a channel. With increasing a temperature of a working surface value of friction coefficient for sevilene is increases but for polystyrene is decreases. The difference between the described dependencies for two researched types of polymer is explains the different form of granules and their mechanical properties, including the values of strength, friction coefficient, deformation at different temperatures.

**Keywords:** polymer, granule, extruder, metal surface, friction, stress, temperature, relationship.

**Вступ**

Галузь виробництва виробів з пластмас є однією із найважливіших галузей світового господарства. Полімери застосовуються майже в усіх напрямках матеріального виробництва й невиробничої сфери, стабільно зростає попит на готові вироби з полімерних матеріалів з боку будівництва, транспорту, сільського господарства, медицини та ін.

Суттєве збільшення виробництва полімерних матеріалів, асортимент яких постійно розширюється, потребує створення високопродуктивного та ресурсо-і енергоефективного обладнання для їх переробки. За результатами теоретичних і практичних досліджень процесів, що проходять під час виготовлення та

використання полімерних матеріалів, публікуються багато різних праць [1 - 6], проблематика полімерів досліджується та розкривається у науково-технічних статтях різних періодичних видань по всьому світу [7 - 10].

Найбільш ефективним для переробки полімерної сировини є екструзійне обладнання, серед якого найчастіше використовуються черв'ячні екструдери [1]. Успішне створення нового обладнання та керування процесом екструзії залежить від точності врахування фрикційного режиму на поверхнях робочих органів машин.

Дослідження руху полімерних матеріалів у зоні живлення черв'ячних екструдерів є важливим і актуальним завданням, оскільки саме продуктивність зазначеної зони визначає продуктивність процесу в

цілому. У зону живлення полімер найчастіше надходить у вигляді сипучих гранульованих матеріалів, потрапляючи крізь завантажувальну лійку 1 (рис. 1) у канал екструдера, де він перебуває у твердому стані і транспортується гвинтовою поверхнею черв'яка 2 вздовж циліндра за рахунок сил тертя.

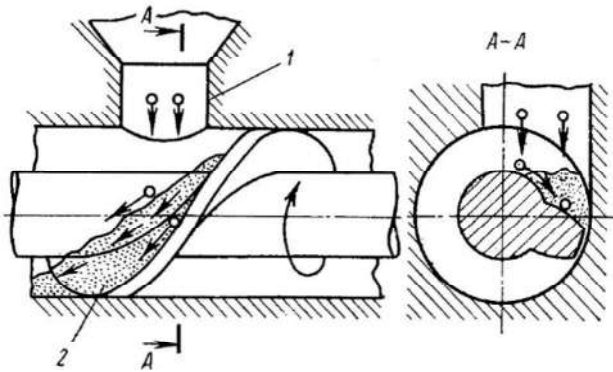


Рис. 1 – Рух матеріалу в каналі черв'яка  
1 – завантажувальна лійка, 2 – гвинтова поверхня нарізки черв'яка

Тертя між перероблюваним матеріалом, циліндром і черв'яком відіграє принципову роль як засіб, що створює умови для переміщення та нагрівання матеріалу [2, 3]. До найважливіших параметрів експлуатаційних режимів тертя відноситься вплив навантаження й температури.

Зазвичай коефіцієнти тертя полімерних матеріалів вимірюють по суцільному зразку, нехтуючи взаємодією між окремими частинками [11]. У той же час, у зоні завантаження черв'ячних екструдерів полімер перебуває саме у вигляді твердих гранул, які можуть проковзувати, перекочуватись одна по одній, деформуватися і т. д., що впливає на рух матеріалу відносно робочих органів екструдера.

### Мета роботи

Метою проведених досліджень є аналіз процесу руху полімерних гранул у зоні живлення черв'ячного екструдера, експериментальне визначення коефіцієнта тертя гранульованого полімерного матеріалу по металевій поверхні, визначення залежності коефіцієнта тертя від навантаження та температури, а також зміни визначених залежностей від геометричних розмірів (висоти шару гранул) робочих органів екструдера.

### Експериментальні дослідження коефіцієнтів тертя гранульованих полімерних матеріалів

У статті наведені експериментальні залежності, що були отримані в результаті дослідження руху полімерних гранул у каналі екструдера з використанням плоскопаралельної моделі

дослідження процесу екструзії [12]. При цьому гвинтовий канал екструдера, утворений нарізкою черв'яка й циліндром, умовно розгортається в площину (рис. 2) і роблять такі припущення: не враховується кривизна каналу, поверхня черв'яка вважається нерухомою, а розгорнута поверхня циліндра такою, що рухається зі швидкістю, яка дорівнює коловій швидкості черв'яка.

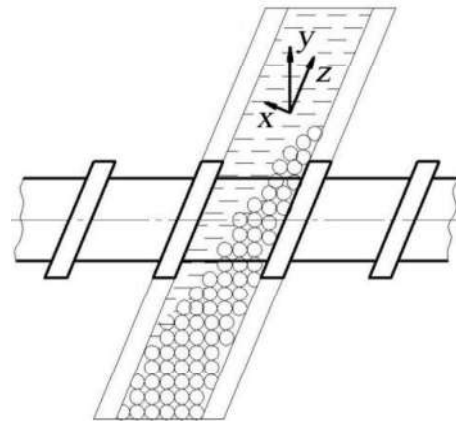


Рис. 2 – Схема плоскопаралельної розгортки каналу екструдера

Процес розглядається в декартовій системі координат, вісь  $x$  якої спрямована перпендикулярно гребеню витка, вісь  $y$  – по висоті каналу, а вісь  $z$  – вздовж розгорнутого каналу (рис. 2). Схему проведення експерименту наведено на рис. 3.

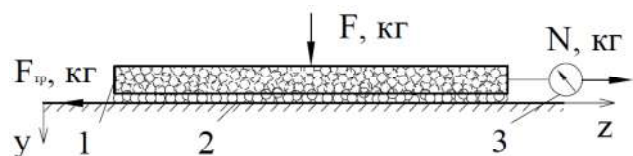


Рис. 3 – Схема проведення експерименту  
1 – коробка, 2 – нерухома металева поверхня, 3 – динамометр

У сталеву коробку 1, що імітує собою розгортку поверхні черв'яка, засипали полімерні гранули до повного заповнення ними об'єму коробки. Далі наповнена коробка 1 переверталась таким чином, щоб гранули опинились на плоскій металевій поверхні 2, яка імітує внутрішню поверхню корпуса циліндра. Кількість гранул у коробці була достатньою для того, щоб між нею й нерухомою поверхнею залишався певний зазор у вигляді шару гранул.

Після цього коробка 1 навантажувалась силою  $F$ . При прикладенні зусилля у напрямку осі  $z$  надавався рух коробки 1 по поверхні 2, при цьому динамометр 3 фіксував значення прикладеного зусилля  $N$ . Динамометр з'єднувався з коробкою гнучким тросом. Дослідження проводили із використанням трьох коробок заввишки

$H = 7, 15$  і  $23$  мм, що відповідає глибині гвинтового каналу екструдера. Співвідношення довжини коробки до її ширини становило не менше п'яти для зниження впливу торцевих поверхонь на тертя.

Коефіцієнт тертя полімерних гранул по металевій поверхні  $K_{тр}$  розраховували для різних величин навантаження  $F$  за формулою (1). Для відображення залежності між навантаженням і коефіцієнтом тертя також додатково розраховувався тиск  $P$  (Па) за формулою (2).

$$K_{тр} = \frac{N}{F}; \quad (1)$$

$$P = \frac{F}{S}, \quad (2)$$

де  $S$  – площа, на яку діє сила  $F$ , тобто площа днища коробки,  $m^2$ .

Дослідження проводились для двох типів полімерних гранул – сополімеру етилену з вінілацетатом (севілену) марки 11104-030 (ТУ 6-05-1636-97) та полістиролу марки ПС-С-1-3 (ГОСТ 20282-86), на рис. 4-5 відповідно наведено їх фотознімки.



Рис. 4 – Фотознімок гранул севілену

### Результати і висновки

На рис. 6–8 зображено апроксимуючі криві, що показують залежність між коефіцієнтом тертя полімерного матеріалу по металевій поверхні  $K_{тр}$  і тиском  $P$  за різних досліджуваних температур  $t$ , які побудовано з використанням поліноміальної або лінійної апроксимації. Середнє значення достовірності апроксимації по всіх кривих не нижче 0,9.



Рис. 5 – Фотознімок гранул полістиролу

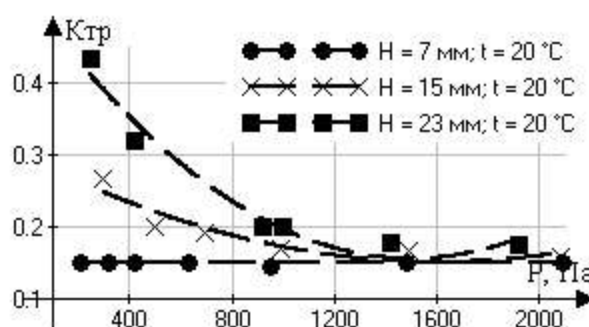


Рис. 6 – Залежність коефіцієнта тертя севілену по металевій поверхні від тиску за різних значень глибини каналу при температурі  $t = 20$  °С

На зазначених графіках видно загальне зменшення значень коефіцієнта тертя при збільшенні тиску. Для севілену (рис. 6) середнє значення коефіцієнта тертя збільшується зі збільшенням глибини каналу і одночасно залежність набуває все більш нелінійного характеру, тобто зростає вплив несущості полімеру.

При збільшенні тиску до максимальних досліджуваних значень майже на всіх кривих відбувається перехід через мінімум, тобто після досягнення певних значень тиску коефіцієнт тертя починає зростати зі збільшенням навантаження. Це можна пояснити тим, що після певних значень тиску шар гранул починає поводити себе подібно до суцільного твердого тіла, залежність коефіцієнта тертя від навантаження якого має в загальному випадку вигляд кривої з мінімумом [12].

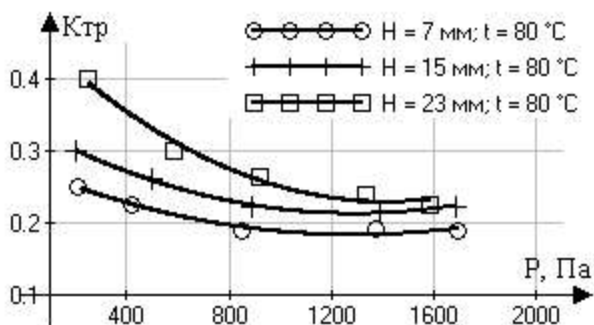


Рис. 7 – Залежність коефіцієнта тертя севілену по металевій поверхні від тиску за різних значень глибини каналу при температурі  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

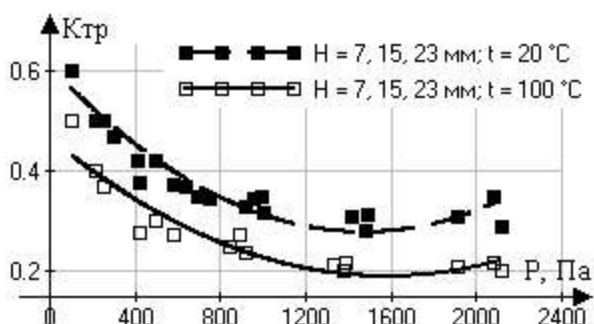


Рис. 8 – Залежність коефіцієнта тертя полістиролу по металевій поверхні від тиску за різних значень глибини каналу при температурах  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Збільшення коефіцієнта тертя внаслідок збільшення глибини каналу можна пояснити тим, що гранули севілену (рис.4) мають округлу форму й можуть проковзувати із обертанням одна відносно одної, проте одночасно є деформованими і внаслідок цього взаємодіють одна з одною, тому при малій товщині шару гранул  $H$  вони частково провертаються, а при збільшенні товщини шару гранул – стискаються і рухаються як одне ціле.

Середнє значення коефіцієнта тертя полістиролу (рис. 8) майже не залежить від збільшення глибини каналу, на графіку зображена одна апроксимуюча крива за результатами вимірювань для трьох значень глибини  $H$ . Це можна пояснити тим, що його гранули мають не сферичну форму, а форму приплюснутих циліндрів з гострими гранями (рис.5), і майже не деформівні, тому провертання та стискання майже відсутнє, і шар гранул під час руху поводить себе як тверде тіло, тобто як єдине ціле, навіть за незначного навантаження.

За певних значень прикладеного навантаження графік залежності коефіцієнта тертя полістиролу по металевій поверхні від тиску (рис. 8) має перехід через мінімум аналогічно севілену.

При збільшенні температури поверхні, по якій відбувається рух гранул, значення коефіцієнта тертя для севілену (рис. 7) зростає, а для полістиролу (рис. 8) – навпаки, зменшується. Це можна пояснити різними механічними властивостями досліджуваних полімерів, зокрема значеннями міцності, коефіцієнта тертя, деформованістю за різних температур, що підтверджується багатьма дослідженнями, описаними у [11].

#### Список літератури

- 1 **Tadmor, Z.** Principles of Polymer Processing / **Z. Tadmor, C. Gogos.** – A John Wiley & Sons, Inc. – 2006. – 984 p.
- 2 **Rauwendaal, C.** Understanding extrusion / **C. Rauwendaal** // Munich: Hanser Publishers. – 2010. – 231 p.
- 3 **Rauwendaal, C.** Polymer extrusion / **C. Rauwendaal** // Munich: Hanser Publishers. – 2014. – 934 p.
- 4 **Noriega, P.** Troubleshooting the extrusion process: a systematic approach to solving plastic extrusion problems / **P. Noriega, C. Rauwendaal** // Munich: Hanser Publishers. – 2010. – 208 p.
- 5 **Bausser, M.** Extrusion: Second Edition / **M. Bausser, C. Sauger, K. Siehert;** transl. from German by **A. F. Castle** // Ohio: ASM International. – 2006. – 592 p.
- 6 **White, J. L.** Screw Extrusion: Science and Technology / **J. L. White, H. Potente, U. Berghaus** // Munich: Hanser Publishers. – 2003. – 444 p.
- 7 **Potente, H.** Polymer pellet flow out of the hopper into the first section of a single screw / **H. Potente, T. C. Pohl** // International polymer processing. – 2002. – № 17. – P. 11-29. – doi:10.3139/217.1670.
- 8 **Mikulionok, I. O.** Screw Extrusion of Thermoplastics: II. Simulation of Feeding Zone of the Single Screw Extruder / **I. O. Mikulionok, L. B. Radchenko** // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2012. – Vol. 85, № 3. – P. 505-514. – doi:10.1134/S1070427211030317
- 9 **Hogan, T. A.** Performance analysis of a variable barrier energy transfer screw / **T. A. Hogan, M. A. Spalsing, E. K. Kim, R. Barr, J. Meyers** // SPE ANTEC Tech. Papers. – 2003. – P. 92-97.
- 10 **Rauwendaal, C.** Screw design for cooling extruders / **C. Rauwendaal** // SPE ANTEC Tech. Papers. – 2004. – P. 278-282.
- 11 **Пахаренко, В. А.** Теплофизические и реологические характеристики и коэффициенты трения наполненных термопластов : справочник / **В. А. Пахаренко, В. Г. Зверлин, В. П. Привалко** и др. // К. : Наук. Думка. – 1983. – 290 с.
- 12 **Мікульонок, І. О.** Основи проектування одночерв'ячних екструдерів: навч. посіб. / **І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко.** – К.: НТУУ "КПІ". – 2015. – 200 с.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Tadmor, Z., Gogos, C.** Principles of Polymer Processing. A John Wiley & Sons, Inc., 2006, 984 p.
- 2 **Rauwendaal, C.** Understanding extrusion. Munich: Hanser Publishers, 2010, 231 p.
- 3 **Rauwendaal, C.** Polymer extrusion. Munich: Hanser Publishers, 2014, 934 p.
- 4 **Noriega, P., Rauwendaal, C.** Troubleshooting the extrusion process: a systematic approach to solving plastic extrusion problems. Munich: Hanser Publishers, 2010, 208 p.



- 5 **Bausner, M., Sauer, C., Siebert, K.** Extrusion: Second Edition. *Ohio: ASM International*, 2006, 592 p.
- 6 **White, J. L., Potente, H., Berghaus, U.** Screw Extrusion: Science and Technology. *Munich: Hanser Publishers*, 2003, 444 p.
- 7 **Potente, H., Pohl, T. C.** Polymer pellet flow out of the hopper into the first section of a single screw. *International polymer processing*, 2002, **17**, 11-29, doi: 10.3139/217.1670
- 8 **Mikulionok, I. O., Radchenko, L. B.** Screw Extrusion of Thermoplastics: II. Simulation of Feeding Zone of the Single Screw Extruder. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2012, **3(15)**, 505-514, doi:10.1134/S1070427211030317.
- 9 **Hogan, T. A., Spalings, M. A., Kim, E. K., Barr, R., Meyers, J.** Performance analysis of a variable barrier energy transfer screw. *SPE ANTEC Tech. Papers*, 2003, 92-97.
- 10 **Rauwendaal, C.** Screw design for cooling extruders. *SPE ANTEC Tech. Papers*, 2004, 278-282.
- 11 **Paharenko, V. A., Zverlin V. G., Privalko V. P.** and others. Thermal and rheological characteristics and the coefficients of friction of filled thermoplastics: A Handbook. K.: Nauk. dumka, 1983, 290 p.
- 12 **Mikulionok, I. O., Sokolskyi, O. L., Sivetskyi, V. I., Radchenko, L. B.** Fundamentals of design single worm extruders: Tutorial. Kijiv: NTUU KPI, 2015, 200 p.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Витвицький Віктор Миронович** – магістрант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», магістрант кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; м. Київ, Україна; e-mail: vitek5knaz@rambler.ru

**Yutvytskyi Viktor** – master student, Chair of Chemical, polymer and silica engineering, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: vitek5knaz@rambler.ru

**Сокольський Олександр Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; м. Київ, Україна; e-mail: sokolkiev@ukr.net

**Sokolskyi Oleksandr** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Chair of Chemical, polymer and silica engineering, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: sokolkiev@ukr.net

**Мікульонок Ігор Олегович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; м. Київ, Україна; e-mail: i.mikulionok@kpi.ua

**Mikulionok Ihor** – Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor, Chair of Chemical, polymer and silica engineering, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: i.mikulionok@kpi.ua

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Витвицький В. М.** Вплив тиску та температури на коефіцієнт тертя гранульованих полімерних матеріалів по металевій поверхні / **В. М. Витвицький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 12-16. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.02.

*Please cite this article as:*

**Yutvytskyi, V., Sokolskyi, O., Mikulionok, I.** Influence of pressure and temperature on the friction granular polymeric materials to the metal surfaces. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **12** (1184), 12-16, doi:10.20998/2413-4295.2016.12.02.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Витвицкий В. М.** Влияние давления и температуры на коэффициент трения гранулированных полимерных материалов по металлической поверхности / **В. М. Витвицкий, О. Л. Сокольский, И. О. Микулёнок** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 12-16. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.02.

**АННОТАЦИЯ** Приведены результаты проведенных исследований движения полимерного материала в зоне питания червячного экструдера, а именно исследования фрикционного режима движения некоторых типов полимерных гранул по поверхности рабочих органов машины. Получены зависимости и проанализировано влияние давления на коэффициент трения гранулированного полимерного материала по металлической поверхности при разных температурах, а также изменение определенных зависимостей в зависимости от геометрических размеров (высоты слоя гранул) рабочих органов экструдера, значения получены при использовании плоскопараллельной модели экструзии

**Ключевые слова:** полимер, гранулы, экструдер, металлическая поверхность, трение, нагрузка, температура, зависимость.

Надійшла (received) 15.03.2016