

УДК 532.135

ГРЕБЕЛЮК І. В., студент; ПОДИМАН Г. С., аспірант PhD; ДВОЙНОС Я. Г., к.т.н.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ РОЗПЛАВУ НА ЕКСТРУЗІЮ ТРУБ З ПЕТ

Проведено теоретичний аналіз впливу температурної неоднорідності розплаву поліетилентерефталату на процес течії у кільцевому каналі з урахуванням неньютонівської поведінки, запропоновано новий критерій оцінки впливу температурної неоднорідності та доцільність встановлення статичного змішувача. Проведено чисельний експеримент та імітаційне моделювання. Для практичного використання отриманих результатів запропонована модернізація трубної головки для переробки PVC шляхом встановлення статичного змішувача у вигляді пластини з перфорованими пазами. Форма отворів значно зменшує гідравлічний опір з незначним зменшенням поверхні теплообміну. Пропонується використання даної модернізованої трубної головки для виготовлення труб з відходів ПЕТ пляшок. Надано рекомендацію для конструювання нового та модернізації існуючого формуючого інструменту переробки полімерів з жорсткою залежністю реологічних параметрів від температури.

**Ключові слова:** поліетилентерефталат, розплав полімеру, формуючий інструмент, статичний змішувач.

**DOI:** 10.20535/2306-1626.1.2018.143370

© Гребелюк І. В., Подиман Г. С., Двойнос Я. Г., 2018.

**Постановка проблеми.** Екструзія труб з ПЕТ (поліетилентерефталату) відноситься до галузі переробки побутових відходів, – таких, як пляшка, матеріал стійкий до сонячного випромінювання і тривалий час шкодить довкіллю, а труби з ПЕТ використовуються як технічні і мають тривалий термін експлуатації, тому оцінка впливу температурної неоднорідності на умови течії у робочих каналах формуючого інструменту, та різновтовщинність виробу актуальна, а робота важлива.

**Аналіз попередніх досліджень.** Відомі методики розрахунку [1, 2, 3] гідравлічного опору трубних головок, та дослідження реологічних властивостей ПЕТ [6]. Основні конструкції статичних змішувачів розплаву [5] пристосовані для машин литва під тиском, екструдерів виробництва труб, кабелів та інше. Виробник статичних змішувачів [5] пропонує два типи "комерційно перевірених" змішувачів, – решітка та спіраль, які мають значно (в 6 разів) зменшити концентраційний та температурний градієнти.

Технологія переробки ПЕТ [4] передбачає якісну сушку матеріалу та надзвичайно точне температурне регулювання. В'язкість розплаву ПЕТ чутлива до температури, що може викликати утворення теплових струмків, – локальних зон з перегрівом головки на 2...3 °С за рахунок біль інтенсивного руху розплаву в цих локаціях.

**Невирішеною частиною наукової проблеми** є оцінка впливу температурної неоднорідності на різновтовщинність труб з ПЕТ, вплив технологічних параметрів та конструктивних елементів на процес екструзії.

**Метою цієї статті** є дослідження впливу температурної неоднорідності на різновтовщинність труб з ПЕТ, вплив технологічних параметрів та конструктивних елементів на процес екструзії, сформулювати рекомендації що до використання статичного змішувача.

**Виклад основного матеріалу.** Традиційна конструкція трубної головки для переробки ПЕТ – прямоточна, при цьому сучасний дорнотримач – спіральний (рис. 5). Для досліджень обрано полімер – Eastman 9921 PET 0.8 IV, в'язкість якого задано таблично (рис. 1).

Залежність вязкості від швидкості зсуву апроксимується ступеневою залежністю з достатньою точністю (коефіцієнт кореляції 0,9), після перетворень отримано коефіцієнт консистентності, та показник неньютонівської поведінки:

$$K(575,15) = 794,33 \quad n = 0,8765$$

$$K(558,15) = 1127 \quad n = 0,8765$$

Відповідно до закону Арреніуса:

$$K(T) = K_0 \exp\left(-\beta \frac{T-T_0}{T_0}\right) \Rightarrow \begin{cases} 1127 = K_0 & T_0 = 558,15K \\ 794,33 = 1127 \exp\left(-\beta \frac{575,15 - 558,15}{558,15}\right) \Rightarrow \beta = 11,485 \end{cases}$$

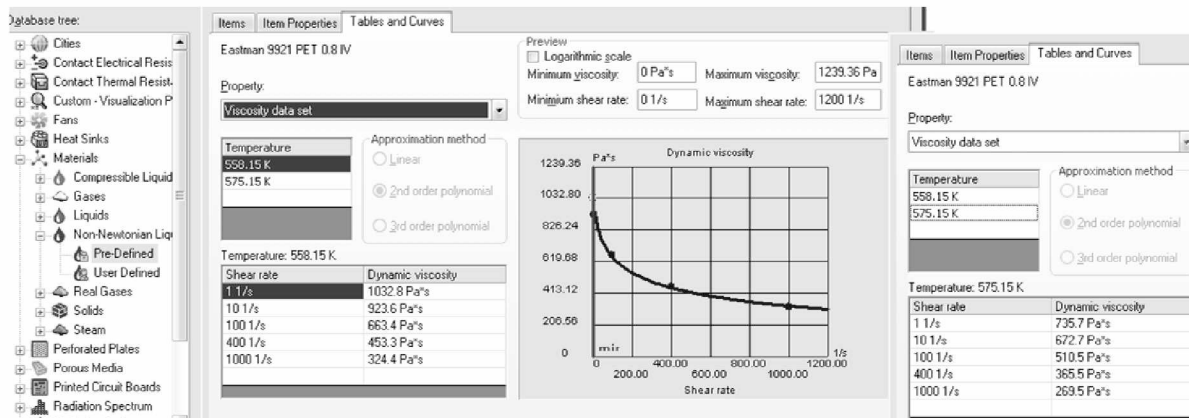


Рис. 1 – Табличне представлення в'язкості, Па·с PET Eastman 9921 від швидкості зсуву, с<sup>-1</sup> для двох температур розплаву (575,15К, та 558,15К)

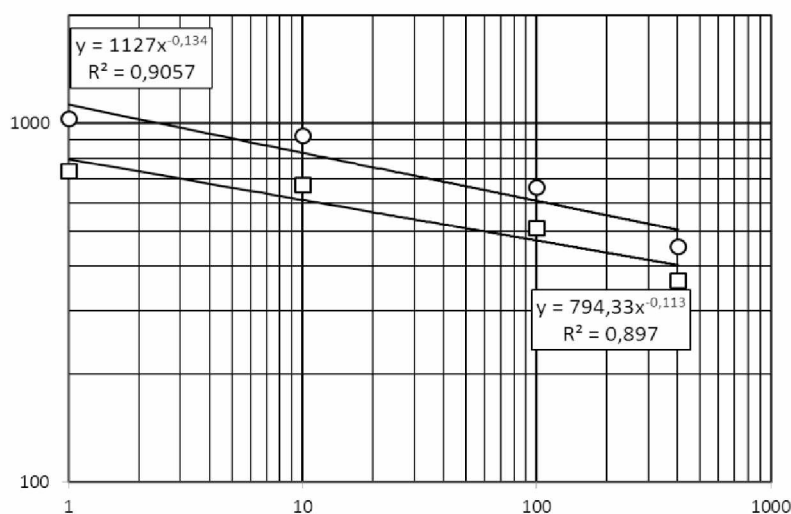


Рис. 2 – Апроксимація таблично заданих значень в'язкості, Па·с PET Eastman 9921 від швидкості зсуву, с<sup>-1</sup> для двох температур розплаву (575,15К, та 558,15К)

Для оцінки впливу температурної неоднорідності на різновтовщинність труби, яка екструдується використано залежність [2]:

$$\dot{V} = K' \phi \Delta p^m = \frac{\pi D H^{m+2}}{2^{m+1} (m+2)} \left(\frac{1}{L}\right)^m \phi \Delta p^m \Rightarrow \left| \tau^m = \frac{1}{\phi} \gamma \Rightarrow m = \frac{1}{n} = const \quad \phi = \frac{1}{K^n} = f(T) \right| \Rightarrow$$

$$d\dot{V} = \frac{\pi D H^{m+2}}{2^{m+1} (m+2)} \left(\frac{1}{L}\right)^m \Delta p^m \frac{1}{[1127 \exp(-0,02058(T-558,15))]^{\frac{1}{n}}}$$

$$\frac{d\dot{V}}{\dot{V} dT} \approx \frac{\frac{1}{[1127 \exp(-0,02058(T+\Delta T-558,15))]^{\frac{1}{n}}} - \frac{1}{[1127 \exp(-0,02058(T-558,15))]^{\frac{1}{n}}}}{1} \frac{1}{\Delta T} = \left| \frac{T+\Delta T=590}{T=558,15} \right| = 0,065 \frac{1}{K}$$

де  $D$  – діаметр матриці, м;  $H$  – ширина кільцевого зазору між матрицею та дорном, м;  $L$  – довжина кільцевого зазору, м;  $\Delta p$  – перепад тиску у кільцевому зазорі, Па.

Висновок: в результаті чисельного експерименту встановлено, при збільшенні температури розплаву Eastman 9921 з 558,15 К до 590 К, та сталому перепаді тиску об'ємна продуктивність збільшується на 6,5 % на кожен градус і не залежить від геометричних розмірів кільцевого зазору, загалом об'ємна продуктивність збільшується в 2,07 рази за рахунок зменшення в'язкості розплаву. Прийняті припущення, – стінка кільцевого зазору адиабатична, та має ту саму температуру, що і розплав. А течія процес ізотермічний. На рис. 3, 4 наведено результати імітаційного моделювання.

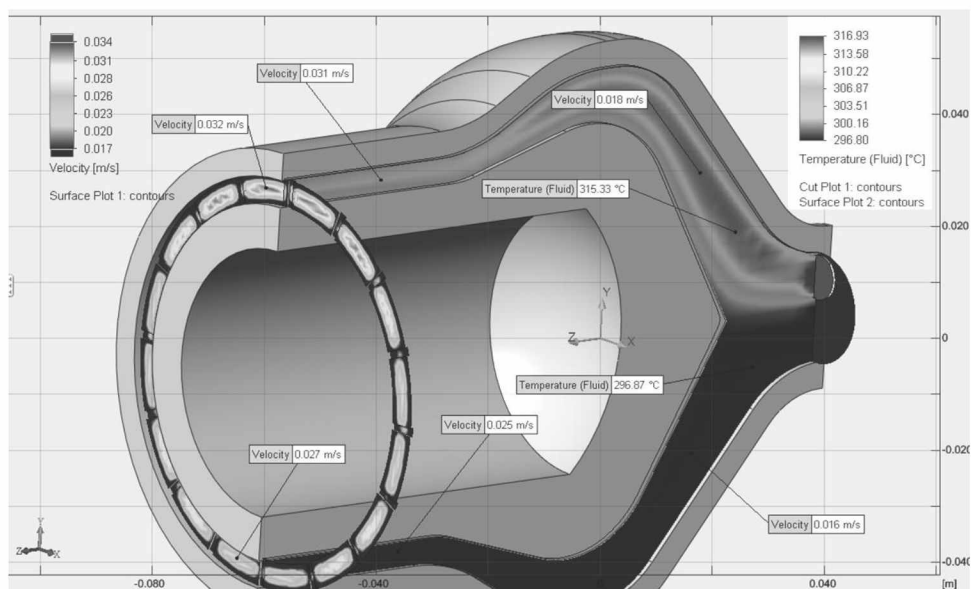


Рис. 3 – Результати імітаційного моделювання, граничні умови

Отриманий результат враховує зменшення в'язкості розплаву при збільшенні об'ємної продуктивності розплаву (збільшується швидкість зсуву).

Недоліком даного чисельного експерименту є припущення адиабатичності процесу теплообміну розплаву з стінкою кільцевого каналу та відсутність явного розрахунку отриманої різновтовщинності, – проведено розрахунок за умови однорідного температурного поля в розплаві.

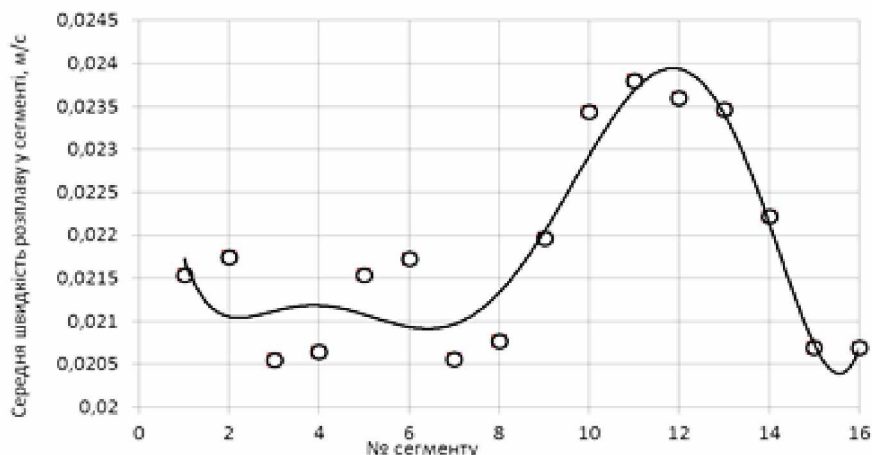
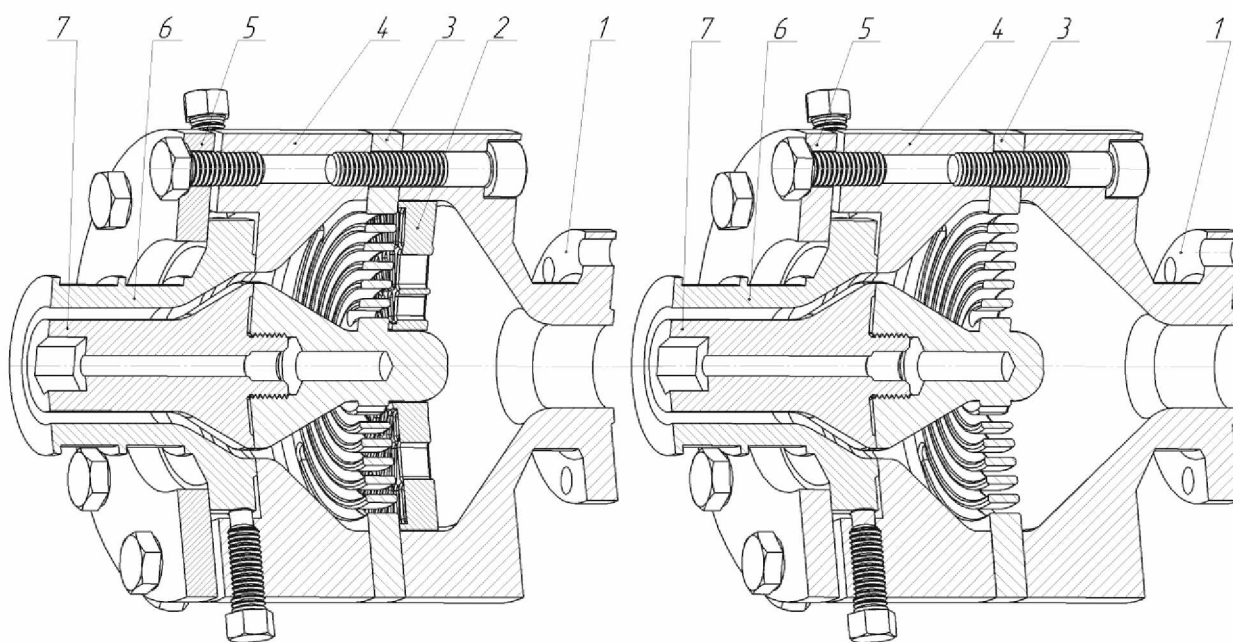


Рис. 4 – Апроксимовані результати імітаційного моделювання

Для практичного використання отриманих результатів запропанована модернізація трубної головки для переробки PVC шляхом встановлення статичного змішувача у вигляді пластини з перфорованими пазами (рис. 5). Форма отворів значно зменшує гідравлічний опір з незначним зменшенням поверхні теплообміну (рис. 6). Пропонується використання даної модернізованої трубної головки для виготовлення труб з відходів ПЕТ пляшок.



1 – адаптер; 2 – статичний змішувач; 3 – дорнотримач; 4 – корпус; 5 – фланець; 6 – матриця; 7 – дорн

Рис. 5 – Конструкція трубної головки після та до модернізації

Після проведеного імітаційного моделювання збудовано графік швидкості розплаву по периметру середньої лінії вихідного кільцевого зазору (рис. 7, 8), фактично максимальна швидкість потоку розплаву.

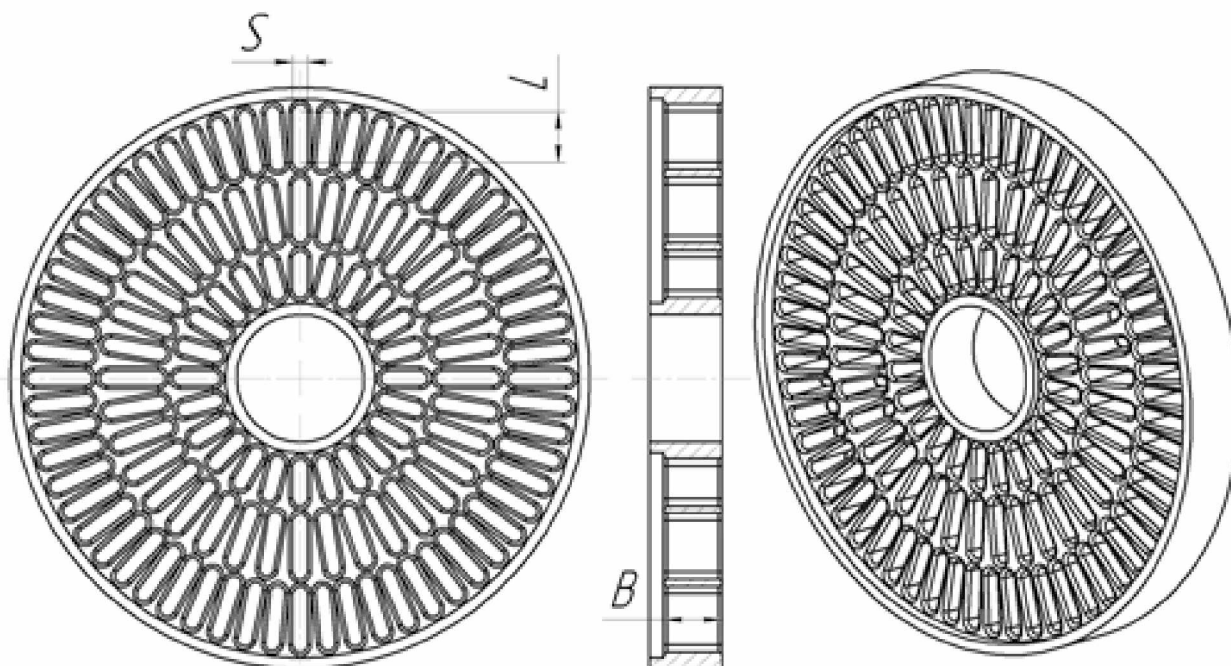
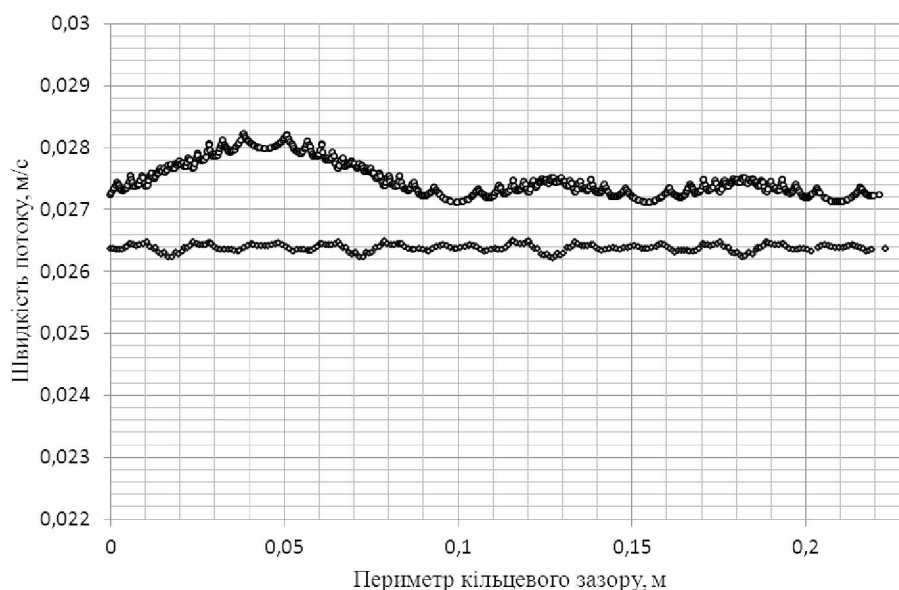


Рис. 6 – Конструкція статичного змішувача трубної головки



**Рис. 7 – Результати імітаційного моделювання до та після модернізації трубної головки (швидкості рознесено шляхом зміни граничних умов моделювання – температури розплаву на вході, температурна неоднорідність на вході однакова)**

З метою якісної оцінки проведено імітаційне моделювання у середовищі SolidWorks (рис. 8), граничні умови задано температурою стінки – 296,85 °C (570K), та тиском на вході в головку – 5 бар (500000 Па), тиском на виході – 1 бар (100000 Па) температурна неоднорідність задана прямою на вході в головку у формі кола, яке займає 16 % перерізу вхідного каналу. Розплав на вході має температуру 296,85 °C (570K), у плямі – 316,85 °C (590K).

Для коректного визначення отриманої різнотовщинності отримано інтегральні параметри об'ємної витрати у 16-ти рівномірно розташованих по периметру сегментах зазору: №1 – 1,33E-06 м<sup>3</sup>/с; №2 – 1,34E-06 м<sup>3</sup>/с; №3 – 1,27E-06 м<sup>3</sup>/с; №4 – 1,27E-06 м<sup>3</sup>/с; №5 – 1,33E-06 м<sup>3</sup>/с; №6 – 1,34E-06 м<sup>3</sup>/с; №7 – 1,27E-06 м<sup>3</sup>/с; №8 – 1,28E-06 м<sup>3</sup>/с; №9 – 1,35E-06 м<sup>3</sup>/с; №10 – 1,44E-06 м<sup>3</sup>/с; №11 – 1,46E-06 м<sup>3</sup>/с; №12 – 1,45E-06 м<sup>3</sup>/с; №13 – 1,44E-06 м<sup>3</sup>/с; №14 – 1,37E-06 м<sup>3</sup>/с; №15 – 1,27E-06 м<sup>3</sup>/с; №16 – 1,27E-06 м<sup>3</sup>/с. Середня швидкість розплаву по сегментам наведена на рис. 4.

Отримане значення різнотовщинності, представлене як нерівномірність об'ємної витрати у 16-ти рівномірно розташованих по периметру сегментах кільцевого зазору становить 11,9 %, що неприпустимо для промислового виробництва.

**Висновки.** Нова методика оцінки впливу температурної неоднорідності на різнотовщинність труб з ПЕТ дозволяє враховувати конструктивні, технологічні параметри, реологічні властивості розплаву та початкові умови (температурну неоднорідність розплаву на виході з екструдера та вході до головки), основною рекомендацією для конструювання нового та модернізації існуючого формуючого інструменту переробки полімерів з жорсткою залежністю реологічних параметрів від температури є необхідність встановлення статичного змішувача.

**Перспективи подальших досліджень.** Спрямування подальших досліджень полягає у проведенні натурального експерименту та практичному впровадженні результатів роботи, створенні математичної моделі процесу та перевірці її адекватності.

#### Список використаної літератури

1. *Переработка термопластичных материалов* / Э. Бернхард. – М. Госхимиздат. 1962. – 747 с.
2. *Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины. Конструкции и технические расчеты* / Пер. с англ. яз.; Под ред. В.П. Володина. – СПб.: Профессия, 2007. – 472 стр., ил.
3. *Лукашова В. В., Мікульонок І. О., Радченко Л. Б. Экструзія пінополімерів: монографія*. НТУУ «КПІ», 2011. – 175 с.: іл. бібл.: с. 163–172. – 300 прим.

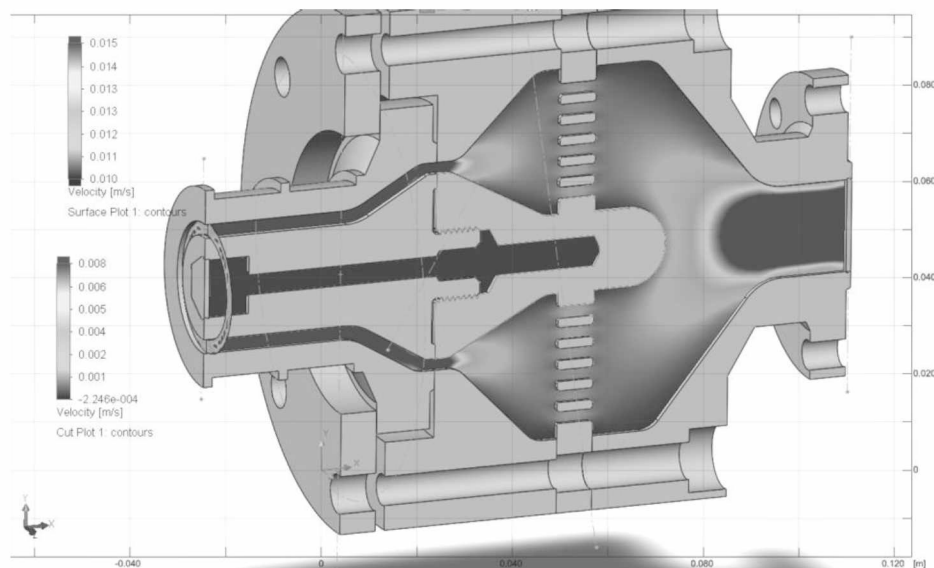


Рис. 8 – Результати імітаційного моделювання

4. Виробник екструзійного обладнання – [Електронний ресурс]. – <https://www.luigibandera.com/products/flat-die/pet-lines/> дата звернення 29.05.2018.
5. Виробник екструзійного обладнання – [Електронний ресурс]. – <http://www.stamixco.com/Extrusion-Melt-Blender-Static-Mixer-high-viscous-melt-flow-mixing-of-polymers-in-extrusion-service> дата звернення 29.05.2018.

Надійшла до редакції 31.05.2018

*Hrebeliuk I. V., Podyman Gh. S., Dvoinos Ya. Gh.*

#### ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE HETEROGENEITY OF THE MELT ON THE EXTRUSION OF PET POLYMER PIPES

*A theoretical analysis of the influence of temperature inhomogeneity of the melt of polyethylene terephthalate on the flow process in the ring channel is considered, taking into account the non-Newtonian behavior, a new criterion for evaluating the influence of temperature heterogeneity and the expediency of installing a static mixer is proposed. Numerical experiment and simulation simulation were conducted. For practical use of the obtained results, the modernization of the pipe head for processing PVC by the installation of a static mixer in the form of a plate with perforated grooves is planned. The shape of the holes significantly reduces the hydraulic resistance with a slight decrease in the heat transfer surface. It is proposed to use this modernized tube head for manufacturing pipes from waste PET bottles. The recommendation for constructing a new and modernizing existing molding tool for polymer processing with a rigid dependence of rheological parameters on temperature is given.*

**Keywords:** polyethylene terephthalate, polymer melt, forming tool, static mixer.

#### References

1. *Pererabotka termoplastychnykh materyalov* / E. Bernkhard. – M. Ghoskhymyzdat. 1962. – 747 p.
2. *Walter Michaeli. Extrusion dies for plastics and rubber design and engineering computations* / 3<sup>rd</sup> revised edition Hanser / Gardner Publications, inc. Cincinnati.
3. *Lukashova V. V., Mikuljonok I. O., Radchenko L. B. Ekstruzija pinopolimeriv: monohrafija. NTUU «KPI», 2011. – 175 p.: p. 163–172.*
4. Виробник екструзійного обладнання – [Електронний ресурс]. – <https://www.luigibandera.com/products/flat-die/pet-lines/> data zvernennja 29.05.2018.
5. Виробник екструзійного обладнання – [Електронний ресурс]. – <http://www.stamixco.com/Extrusion-Melt-Blender-Static-Mixer-high-viscous-melt-flow-mixing-of-polymers-in-extrusion-service> data zvernennja 29.05.2018.