

Keywords: polymer melt, forming tool, polyethylene foam, a mathematical model, the annular gap.

References

1. Dvoinos, Ya.H., Nazarchuk, V.V. and Khotynetskiy, M.I. (2014), "The formation of products from foam polystyrene", *Enerhotekhnologiyu y resursoberezhnye*, vol. 5–6, pp. 79–83.
2. Kaplun, Ya.B. and Kym, V.S. (1969), *Formuiushchee oborudovanye ekstruderov* [The forming equipment of extruders], Mashynostroeny, Moscow, Russia.
3. Dvoinos, Ya.H., Nazarchuk, V.V. and Khotynetskiy, M.I. (2014), "Forming tool manufacture foam polystyrene", *Resursozberihaiuchi tekhnologii ta obladnannia* [Resource-saving technologies and equipment. IV International Scientific Conference of Students and Young Scientists], NTUU KPI, Kiev, Ukraine, p. 9.

УДК 532.135, 66.011

ДВОЙНОС Я. Г., к.т.н., ст. викл.; СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.; ІВІЦЬКИЙ І. І., аспірант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

УТОЧНЕНА МЕТОДИКА ОБРОБЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ КАПІЛЯРНОЇ ВІСКОЗИМЕТРІЇ

Проаналізовано течію рідини в циліндричному каналі з урахуванням її неньютонівської поведінки, запропоновано новий алгоритм і програму оброблення даних капілярної віскозиметрії з метою розрахунку параметрів моделі степеневі реологічної залежності.

Ключові слова: капілярна віскозиметрія, розплав полімеру, формувальний інструмент, математична модель.

© Двойнос Я. Г., Сокольський О. Л., Івіцький І. І., 2015.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. Відомі методики [1, 2] оброблення експериментальних даних капілярної віскозиметрії з урахуванням неньютонівської поведінки полімерів, та отримання їхніх реологічних параметрів базуються на рівнянні $Q = \frac{\pi n R^3}{3n+1} \left(\frac{R \Delta P}{2LK} \right)^{1/n}$, де R – радіус капіляра, м; L –

довжина каналу, м; Q – об’ємна витрата розплаву, м³/с; ΔP – перепад тиску за довжиною каналу, Па. Це рівняння має дві невідомі – K і n , тому під час двох експериментів визначають дві пари значень Q і ΔP , записують систему з двох рівнянь і розв’язують її, наприклад за допомогою пакета MathCAD. Невирішеною частиною проблеми є відсутність методики оброблення серії експериментів на капілярному віскозиметрі, що дозволяє одержати окремий розв’язок для кожного експерименту й загальний для їхньої серії.

Метою статті є дослідження течії неньютонівської рідини в циліндричному каналі з розробленням нового алгоритма й програми інженерного розрахунку її реологічних параметрів.

Виклад основного матеріалу. Рівняння рівноваги елементарного об’єму розплаву в перерізі циліндричного каналу (рис. 1): $F_1 - F_2 - F_3 = 0$, де $F_1 = P(z)\pi R$ і $F_2 = \left[P(z) + \frac{dP}{dz} dz \right] \pi R^2$ – сили від нормальних напружень, спричинених гідростатичним тиском, $F_3 = \tau_{zp}|_{\rho=R} 2\pi R dz$ – сила від дотичного напруження на стінках елементарного об’єму.

Припустимо, що: реологічні властивості рідини достатньо точно описуються степеневим законом; рідина є нестисною, а її рух – ламінарним і усталеним; втрати тиску на ефектах входу/виходу з канал відсутні; форма перерізу каналу та його розміри є сталими; течія є ізотермічною; відсутній теплообмін крізь стінку каналу та саморозігрів розплаву дисипацією; відсутнє проковзування полімеру на стінках каналу.

Визначимо дотичні сили на елементарному об’ємі, який виокремимо з попереднього довільним радіусом r (рис. 2). Рівняння рівноваги для цього об’єму: $F_{1new} - F_{2new} - F_3 + F_4 = 0$, де $F_{1new} = P(z)\pi(R^2 - r^2)$ і $F_{2new} = \left[P(z) + \frac{dP}{dz} dz \right] \pi(R^2 - r^2)$ – сили від нормальних напружень, спричинених гідростатичним тиском; $F_4 = \tau_{zp}|_{\rho=r} 2\pi R dz$ – сила від дотичних напружень між шарами рідини на відстані r від центра.

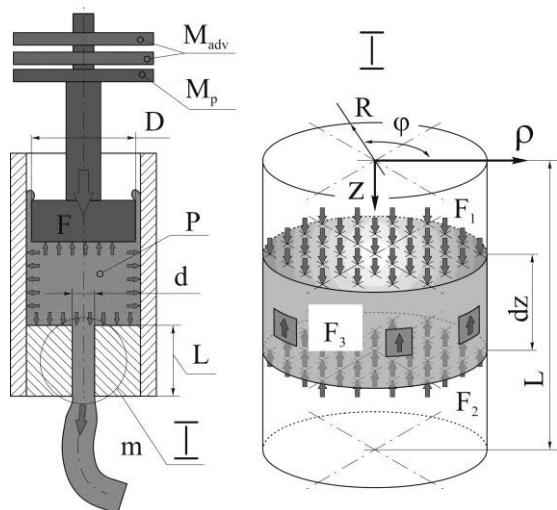


Рис. 1 – Модель течії неньютонівської рідини в циліндричному каналі капілярного віскозиметра

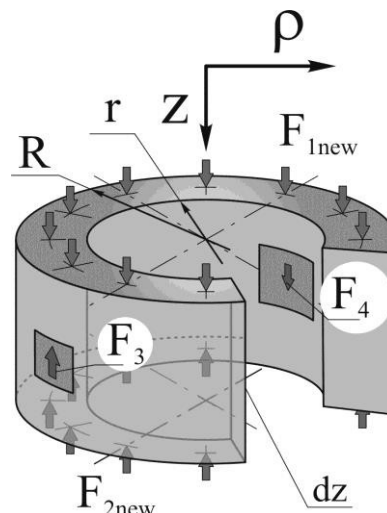


Рис. 2 – Сили, що діють на елементарний об'єм на відстані r від центра

Якщо позначити $A = \frac{dP}{dz} = \frac{\Delta P}{L}$, дотичне напруження на внутрішній поверхні нового елементарного

об'єму $\tau_{zp}|_{\rho=r} = \frac{Ar}{2}$, а зворотна реологічна залежність $\gamma_{zp}(\rho) = \frac{dW_z(\rho)}{d\rho} = \sqrt[n]{\frac{\tau_{zp}(\rho)}{K}} = \sqrt[n]{\frac{Ar}{2K}}$, де τ – дотичне напруження у розплаві, Па; K – коефіцієнт консистентності, сталий за заданої температури, Па · с⁻ⁿ; γ – швидкість зсуву розплаву, с⁻¹; n – показник степеня неньютонівської поведінки.

Проінтегрувавши цю залежність, визначимо швидкість потоку в циліндричному каналі на довільній відстані від його центра

$$W_z(\rho) = \int_{\rho=R}^{\rho=r} \sqrt[n]{\frac{A\rho}{2K}} d\rho = |W_z|_{\rho=R} = 0 = \frac{1}{\frac{1}{n}+1} \sqrt[n]{\frac{A\rho}{2K}} \left(R^{\frac{1}{n}+1} - \rho^{\frac{1}{n}+1} \right) = D \cdot B \cdot \rho^{\frac{1}{n}+1}, \text{ де } B = \frac{1}{\frac{1}{n}+1} \sqrt[n]{\frac{A\rho}{2K}} \text{ і } D = \frac{1}{\frac{1}{n}+1} \sqrt[n]{\frac{A\rho}{2K}} R^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}.$$

Об'ємна витрата крізь циліндричний канал:

$$V_z(K) = 2\pi \int_{\rho=R}^{\rho=R} \rho W_z(\rho) d\rho = 2\pi \int_{\rho=R}^{\rho=R} \rho \left(D \cdot B \cdot \rho^{\frac{1}{n}+1} \right) d\rho = 2\pi \left[D \frac{R^2}{2} - \frac{B}{\left(\frac{1}{n}+3\right)} R^{\frac{1}{n}+3} \right] = \frac{\pi n R^3}{3n+1} \left(\frac{R A}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Розв'язком рівняння є функція $V_{\text{theor}} = f(n, K)$ (рис. 3).

Знайдемо K як функцію від n для кожного експерименту: $K = f_{\text{отт}}(n) = \min |f(K, n) - V_{\text{екс}}|$. На рис. 4 зображено чотири такі функції для чотирьох експериментів, взятих для прикладу. Точка їхнього перетину є дозволяє визначити реологічні параметри n і K для серії експериментів.

Нижче наведено програму оброблення даних капілярної віскозиметрії в пакеті MathCAD і приклад розрахунку для розплаву полістиролу загального призначення.

Експериментальні дані:

Густина розплаву, кг/м³

Діаметр поршня, м

Довжина сопла, м

Кількість вимірювань, шт.

Маса вантажів, кг

Час вимірювань, с

Діаметр отвора сопла, м

Маса продавненого розплаву, кг

$\rho_0 := 870$

$D := 0.00948$

$L := 0.008$

$\text{Dosl} := 4 \quad i := 1 \dots \text{Dosl}$

$M_1 := 2.87 \quad M_2 := 4.49 \quad M_3 := 5.69 \quad M_4 := 6.69$

$\tau_1 := 600 \quad \tau_2 := 600 \quad \tau_3 := 600 \quad \tau_4 := 600$

$d := 0.0012$

$m_1 := 0.000052 \quad m_2 := 0.000136$

$m_3 := 0.000211 \quad m_4 := 0.00028$

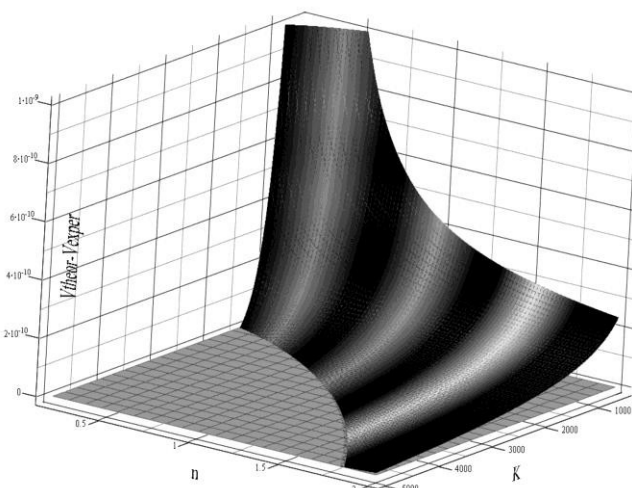


Рис. 3 – Графічне зображення функції
 $|V(n, K) - V_{\text{екс}}|$

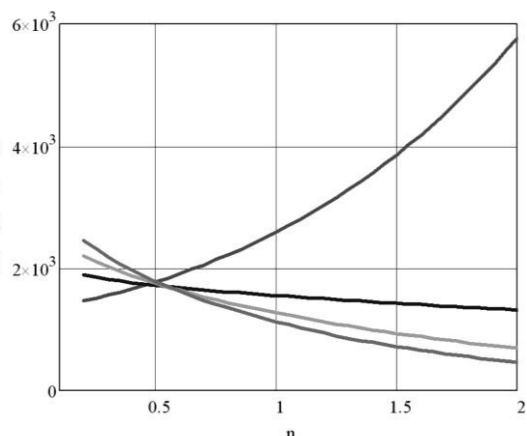


Рис. 4 – Графічне зображення функції
 $K = f_{\text{опт}}(n)$

Тиск перед соплом, Па $P_i = \frac{4M_i}{\pi D^2}$ Витрата розплаву крізь сопло, м³/с $V_i = \frac{M_i}{\rho \tau_i}$
Радіус отвору сопла, м $R = \frac{D}{2}$ Для чотирьох експериментів $i = 1..4$

$$A_i := \frac{P_i}{L_i} \quad fB(K, n, i) := \frac{1}{\frac{1}{n} + 1} \left(\frac{A_i}{2K} \right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad fD(K, n, i) := \frac{1}{\frac{1}{n} + 1} \left[R^{\left(\frac{1}{n} + 1\right)} \right] \left(\frac{A_i}{2K} \right)^{\left(\frac{1}{n}\right)}$$

$$fWz := fD(K, n, i) - fB(K, n, i) \cdot \rho^{\left(\frac{1}{n} + 1\right)} \quad fV(K, n, i) := \frac{\pi n R^3}{3n + 1} \left(\frac{R A_i}{2K} \right)^{\left(\frac{1}{n}\right)}$$

Коефіцієнт консистентності $K := 10$ $K0(n, i) := \text{root}(fV(K, n, i) - V_i)$
Відстань між кривими (відшукати перетин кривих)

$$\begin{aligned} \text{KOS1}(n) &:= \sqrt{|K0(n, 1)^2 - K0(n, 2)^2|} & \text{KOS2}(n) &:= \sqrt{|K0(n, 1)^2 - K0(n, 4)^2|} & \text{KOS3}(n) &:= \sqrt{|K0(n, 1)^2 - K0(n, 3)^2|} \\ \text{KOS4}(n) &:= \sqrt{|K0(n, 2)^2 - K0(n, 3)^2|} & \text{KOS5}(n) &:= \sqrt{|K0(n, 2)^2 - K0(n, 4)^2|} & \text{KOS6}(n) &:= \sqrt{|K0(n, 4)^2 - K0(n, 3)^2|} \\ \text{KOS7}(n) &:= \sqrt{|K0(n, 1)^2 - K0(n, 2)^2|} \end{aligned}$$

$$fKOS(n) := \text{KOS1}(n)^2 + \text{KOS2}(n)^2 + \text{KOS3}(n)^2 + \text{KOS4}(n)^2 + \text{KOS5}(n)^2 + \text{KOS6}(n)^2 + \text{KOS7}(n)^2$$

Пошук мінімуму (найближчого розташування кривих K - n кожного експерименту)

$$n := 1 \quad P := 0.503 \quad P := \text{Minimize}(fKOS, n) \quad n := P \quad i := 1..Dosl \quad K := 10$$

$$K0(n, i) := \text{root}(fV(K, n, i) - V_{\text{експер}, i}, K) \quad \text{KOST} := \frac{1}{Dosl} \sum_{i=1}^{i=Dosl} K0(n, i)$$

Визначені коефіцієнт консистентності та показник ступеня нен'ютонівської поведінки:

$$\text{KOST} = 1.759 \times 10^3 \quad n = 0.503$$

Епюра швидкостей у каналі сопла за визначеними реологічними параметрами:

$$fWzn(\rho) = \begin{cases} fWz(\rho, K, \text{ST}, n, 1) & \text{if } \rho > 0 \\ fWz(-\rho, K, \text{ST}, n, 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Епюра швидкостей у каналі, коли $n = 1$ (ньютонівська рідина) – для порівняння епюр

$$\text{KOST02} := K0(1, 1)$$

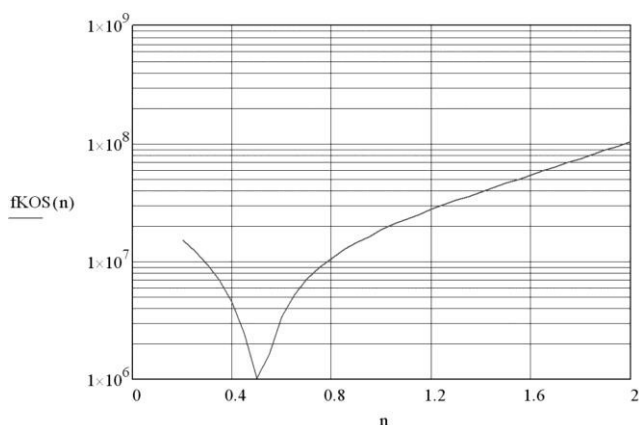


Рис. 5 – Графік відстані між кривими на рис. 4 у квадратах

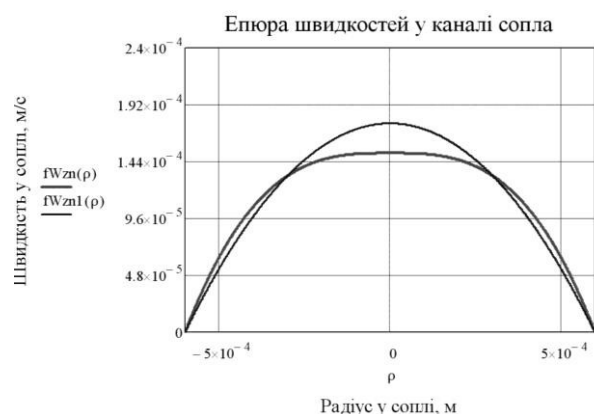


Рис. 6 – Епюра швидкостей: дійсна і з припущенням ньютонівської поведінки

Висновки. Нова методика оброблення даних капілярної віскозиметрії дозволяє опрацювати декілька експериментів одночасно, є адекватною і дозволяє відокремити експерименти, які зроблені з похибками, оскільки результати для кожного експерименту відображається окремою кривою.

Перспективи подальших досліджень. Створення методики розрахунку співвідношення пружних і в'язких деформацій на основі моделі Генкі з метою моделювання формувальних інструментів для екструзування спіненого полістиролу.

Список використаної літератури

1. Michaeli, W. (2003), *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, Hancer/Gardner Publications, Inc., Cincinnati.
2. Han, C. D. (1976), *Rheology in polymer Processing*, Academic press, New York, USA.

Надійшла до редакції 14.05.2015

Dvoinos Ya. H., Sokolskyi O. L., Ivitskyi I. I.

REFINED METHODS OF EXPERIMENTAL DATA PROCESSING CAPILLARY VISCOMETRY

A theoretical analysis of the flow in a cylindrical channel with the non-Newtonian behavior, based on a power model, the results of which confirmed the known dependence is considered. A new algorithm, a program and data capillary viscometer are purposed of calculating the parameters of rheological model of power dependence. The program is MathCAD and it differ possibility of simultaneous processing of more than two experiments. Visualization of the results of each experiment and automatic finding of common parameters consistency and degree of non-Newtonian behavior can improve the calculation accuracy, speed it up and to identify technical errors in any single experiment. The article describes the listing of the program and the results of data processing capillary viscometer melt polystyrene.

Each experiment was processed by the program as a result be the dependence of the consistency of the non-Newtonian behavior index for the given experimental conditions. The intersection curves to determine the actual parameters of the power flow model.

The results agreed with the known, moreover revealed melt creep start condition on the channel walls (curve lies at a considerable distance from the joint point of intersection of the results of other experiments). As an example of non-Newtonian fluids used in the program was the melt of polystyrene with known rheological parameters.

Keywords: capillary viscometer, the polymer melt, forming tool, mathematical model, calculation program, XPS.

References

1. Michaeli, W. (2003), *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, Hancer/Gardner Publications, Inc., Cincinnati.
2. Han, C. D. (1976), *Rheology in polymer Processing*, Academic press, New York, USA.