

УДК 678.027

*Дискові машини використовуються в каскадних схемах екструзії, де необхідно забезпечити швидке плавлення полімеру. У статті обговорюється дослідження процесу плавлення в дисковому екструдері. Створено та вирішено фізичну і математичну моделі зони плавлення в дисковому екструдері при нових граничних умовах. Наведено методичку розрахунку потужності в дисковому екструдері, що витрачається на плавлення полімеру на ділянці певної довжини*

*Ключові слова: екструзія, полімер, дисковий екструдер, плавлення, завантажувально-пластикуюча зона, потужність, розплав, тиск*

*Дисковые машины используются в каскадных схемах экструзии, где необходимо обеспечить быстрое плавление полимера. В статье обсуждается исследование процесса плавления в дисковом экструдере. Создано и развязано физическую и математическую модели зоны плавления в дисковом экструдере при новых граничных условиях. Приведена методика расчета мощности дискового экструдера, которая используется при плавлении полимера на участке определенной длины*

*Ключевые слова: экструзия, полимер, дисковый экструдер, плавление, загрузочно-пластицирующая зона, мощность, расплав, давление*

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ В ЗАВАНТАЖУВАЛЬНО- ПЛАСТИКУЮЧІЙ ЗОНІ ДИСКОВОГО ЕКСТРУДЕРА

**М. П. Швед**

Кандидат технічних наук, доцент\*

**Д. М. Швед**

Провідний інженер\*

**Р. Ю. Резнік\***

E-mail: rus\_23@i.ua

\*Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

### 1. Вступ

На сьогоднішній день в процесах екструзії полімерів найпоширенішим обладнанням є одночерв'ячні екструдери [1-3], на яких базується більшість технологічних ліній. Однак у випадку, коли необхідно забезпечити підвищену пластикацію та змішування, введення добавок, наповнення, фарбування, переробку композиційних матеріалів, вакуумування чи гнучкість в управлінні процесом переробки, ці екструдери не завжди можуть забезпечити достатньо високий рівень переробки. Саме тому широкого поширення набули каскадні схеми екструзії, в яких процес екструзії розділений на окремі операції з автономним управлінням, а саме: завантаження, плавлення, вакуумування, введення компонентів (твердих, рідких чи пастоподібних), дозування. Такий підхід дозволяє інтенсифікувати та оптимізувати одну або декілька операцій процесу екструзії. Апаратне оформлення каскадів залежить від конкретного призначення екструдера, але, як правило, на першій стадії встановлюється екструдер, який має високі змішувальні характеристики (двочерв'ячний чи дисковий), а на другій - в основному одночерв'ячний дозуючий екструдер або шестеренний насос [4-7].

### 2. Постановка проблеми

Необхідно зазначити, що досить ефективно проводити процес екструзії полімерів, якщо на першій

стадії встановити дисковий екструдер (ДЕ). Він має високу змішувальну здатність, гомогенність розплаву, короткий час переробки (10-12 с), просту конструкцію та низькі питомі показники. Але такі екструдери не створюють достатнього тиску полімеру і використовуються як розплавлювачі-гомогенізатори в каскадних схемах екструзії. Дискові екструдери в більшості випадків працюють без теплообміну з навколишнім середовищем і майже вся енергія дисипації споживається в завантажувально-пластикуючій зоні ДЕ. Проблемою даної статті є створення та вирішення фізичної і математичної моделей зони плавлення в ДЕ при нових граничних умовах.

### 3. Аналіз літературних джерел за темою дослідження

У роботі [8] розглянуто фізичну модель процесу плавлення полімеру в завантажувально-пластикуючій зоні (ЗПЗ) дискового екструдера (ДЕ). При досягненні полімером температури плавлення біля стінки циліндра утворюється плівка розплаву. При цьому, потрібно зазначити, що утворення такої плівки найбільш вірогідне біля стінки циліндра, так як швидкість руху циліндра відносно полімеру набагато більша, ніж швидкість полімеру відносно черв'яка [9]. Плівка розплаву біля стінки циліндра суттєво нагрівається за рахунок значних швидкостей зсуву. Через це будемо вважати, що зовнішні нагрівачі вимкнені. Якщо не враховувати тепловіддачу в повітря, то процес плавлення можна вважати адіабатичним (циліндр теплоізолюваний, а

оохолодження циліндра рідиною в зоні плавлення відсутнє). Для вирішення задачі можна за основу взяти відому модель Тадмора-Маддока [10], але замість граничних умов першого роду використовувати граничні умови другого роду, які більше відповідають умовам, в яких працює ЗПЗ ДЕ.

#### 4. Мета роботи

Метою роботи є визначення потужності необхідної для плавлення полімеру в ЗПЗ ДЕ.

#### 5. Основна частина дослідження

Оскільки ДЕ працює в адиабатичному режимі, то густина теплового потоку на поверхні циліндра дорівнює нулю.

Для вирішення задачі використаємо декартову систему координат (рис. 1), що зв'язана з рухомою з певною швидкістю  $V_T$  твердою пробкою, причому, початок координат розмістимо на поверхні плавлення.

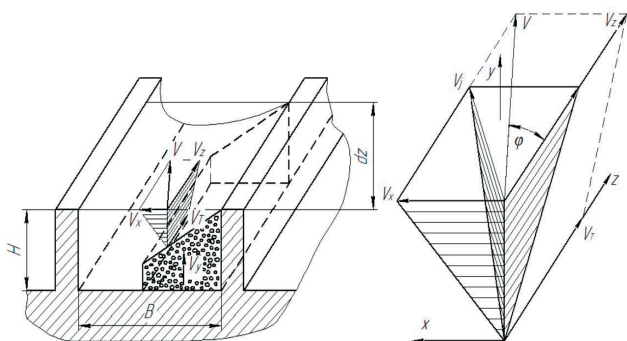


Рис. 1. Розрахункова схема процесу плавлення полімеру

Вважаємо, що ширина каналу нарізки набагато більше його висоти ( $b \gg H$ ). Вісь  $j$  направлена в напрямку швидкості  $V_j$ , яка біля поверхні стінки визначається із залежності:

$$V_j = \sqrt{(V_z - V_T)^2 + V_x^2}, \quad (1)$$

де складові швидкості дорівнюють:

$$V_z = \pi D n \cos \phi, \quad (2)$$

$$V_x = \pi D n \sin \phi, \quad (3)$$

$$V_T = \frac{G}{I \rho_n b H}, \quad (4)$$

де  $I$  - кількість заходів гвинтової нарізки,  $G$  - продуктивність,  $b$  і  $H$  - ширина та висота каналу гвинтової нарізки відповідно.

Якщо розглядати рух півки розплаву як потік між двома пластинами, одна з яких нерухома, а інша рухається зі швидкістю (рис. 1), то рівняння руху приймає вигляд:

$$\mu \frac{d^2 V_j}{dy^2} = 0, \quad (5)$$

де  $j$  - ефективна в'язкість розплаву полімеру.

Вирішуючи це рівняння при граничних умовах  $V_j = 0$  при  $y = 0$  та  $V_j = V_j$  при  $y = \delta$  отримуємо наступний профіль швидкостей у півці розплаву:

$$V = V_j \frac{y}{\delta}, \quad (6)$$

де  $\delta$  - товщина півки розплаву.

Далі, якщо вважати, що тепло передається лише теплопровідністю в напрямку вісі  $y$ , то рівняння енергії із врахуванням дисипації приймає вигляд:

$$\lambda_p \frac{d^2 t}{dy^2} + \mu \left( \frac{dV_j}{dy} \right)^2 = 0, \quad (7)$$

де  $\lambda_p$  - теплопровідність розплаву полімеру.

На відміну від моделі Тадмора, рівняння (7) будемо вирішувати при граничних умовах другого роду біля стінки циліндра, тобто:

$$\text{при } y = 0 \quad t = t_{пл}, \quad (8)$$

$$\text{при } y = \delta \quad \frac{dt}{dy} = 0, \quad (9)$$

де  $t_{пл}$  - температура плавлення полімеру.

Інтегрування рівняння (7) при граничних умовах (8) та (9) дає наступний профіль температур у півці розплаву:

$$t = t_{пл} \frac{j}{\lambda_p} \left( \frac{V_j}{\delta} \right)^2 \left[ y \delta - \frac{y^2}{2} \right]. \quad (10)$$

Середня температура півки розплаву визначиться наступним чином:

$$t_{ср} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} t dy = t_{пл} + \mu \frac{V_j^2}{3\lambda_p}. \quad (11)$$

Відповідно температура полімеру біля стінки циліндра ( $y = \delta$ ) дорівнює:

$$t_{ст} = t_{пл} + j \frac{V_j^2}{2\lambda_p}. \quad (12)$$

Як видно з рівнянь (11), (12) температури  $t_{ст}$  та  $t_{пл}$  явно не залежать від товщини півки розплаву. Ця залежність відображає, що в'язкість розплаву залежить від швидкості зсуву, яка, в свою чергу, є функцією товщини півки  $\delta$ .

Визначимо абсолютне значення питомого теплового потоку на поверхні плавлення ( $y = 0$ ):

$$q_y |_{\text{при } y = 0} = \lambda_p \left( \frac{dt}{dy} \right) |_{\text{при } y = 0} = \mu \frac{V_j^2}{\delta}. \quad (13)$$

Цей тепловий потік використовується для нагрівання та плавлення твердого полімеру, що потрапляє зі швидкістю  $V_y$  до поверхні плавлення (рис. 1). Приймаючи, що твердий полімер має температуру  $t_{вх}$  гранул, що потрапляють в завантажувальну воронку,

запишемо із врахуванням вище сказаного наступну рівність:

$$\mu \frac{V_j^2}{\delta} = V_y \rho_T (i_{пл} - i_{вк}), \quad (14)$$

де  $i_{пл}$  та  $i_{вк}$  - ентальпія розплаву полімеру при  $t_{пл}$  та твердого полімеру при  $t_{вк}$ ,  $\rho_T$  - густина твердого полімеру.

З іншого боку, кількість полімеру, що розплавився, на довжині  $dz$  дорівнює кількості розплаву, що знімається витком з поверхні циліндра (рис. 1):

$$V_y \rho_T x dz = \frac{V_x}{2} \rho_p \delta dz, \quad (15)$$

де  $x$  - ширина полімеру, що не розплавився. З (15) знаходимо:

$$V_y = \frac{V_x \rho_p \delta}{2 \rho_T x}. \quad (16)$$

Підставляючи (16) в (14) і вирішуючи отримане рівняння відносно  $\delta$ , знайдемо:

$$\delta = \left[ \frac{2 \mu V_j^2 x}{V_x \rho_p (i_{пл} - i_{вк})} \right]^{1/2}. \quad (17)$$

Швидкість плавлення полімеру  $W$  до одиниці довжини в напрямку осі каналу дорівнює:

$$W = \frac{V_x}{2} \rho_p \delta = \left[ \frac{V_x \rho_p \mu V_j^2 x}{2 (i_{пл} - i_{вк})} \right]^{1/2} = \Phi x^{1/2}, \quad (18)$$

де

$$\Phi = \left[ \frac{V_x \rho_p \mu V_j^2}{2 (i_{пл} - i_{вк})} \right]^{1/2}. \quad (19)$$

Використовуючи отриманий Тадмором вираз для визначення ширини твердої пробки  $x$  для випадку  $H = \text{const}$ , приймає вигляд:

$$x = x_1 \left[ 1 - \frac{(z_2 - z_1)}{2 \rho_T V_T H x_1^{1/2}} \right]^2, \quad (20)$$

де  $x_1$  - ширина твердої пробки при  $z = z_1$ .

Потужність, що витрачається на плавлення полімеру, на ділянці  $(z_2 - z_1)$  знайдемо з наступного рівняння:

$$\Delta Q_{пл} = \frac{\delta V_x}{2} \rho_p \left[ (i_{пл} - i_{вк}) + C_p (t_{ср} - t_{пл}) \right] (z_2 - z_1), \quad (21)$$

де  $C_p$  - теплоємність розплаву полімеру при температурі  $t_{ср}$ .

Тиск в області плавлення знайдемо із рівняння для масової продуктивності, вирішуючи яке відносно тиску, можна отримати:

$$P_2 = P_1 + \frac{12 \mu' (z_2 - z_1)}{(b-x) H^3 F_p} \left[ \rho_{пл} x H V_T - \frac{V_z (b-x) H F_d}{2} - \frac{G}{\rho_p} \right], \quad (22)$$

де  $F_d$  та  $F_p$  - коефіцієнти, що враховують зупиняючий вплив бокових стінок каналу, які знайдемо за запропонованими наближеними залежностями:

$$F_p = 0,13 \left( \frac{H}{b-x} \right)^2 - 0,71 \frac{H}{b-x} + 1, \quad (23)$$

$$F_d = 0,125 \left( \frac{H}{b-x} \right)^2 - 0,625 \frac{H}{b-x} + 1, \quad (24)$$

де  $\mu'$  - в'язкість розплаву, що визначається за середньою температурою, яка знімається витком півки  $t_{ср}$  та середньою швидкістю зсуву  $\dot{\gamma}$  в області розплаву, що знаходиться за наступним виразом:

$$\dot{\gamma}_p = \frac{\pi^2 (D-H)(D-2H)n}{H \sqrt{\pi^2 (D-2H)^2 - D^2}}. \quad (25)$$

Потужність, що витрачається в зоні розплаву, дорівнює:

$$\Delta Q_p = \frac{\mu' (b-x)(z_2 - z_1)}{H} \left[ 4 V_x^2 + V_z^2 (1 + a^2) \right], \quad (26)$$

де  $a$  - дросельне відношення, що являє собою відношення продуктивності протитечії до продуктивності прямої течії за формулою:

$$a = \frac{(P_2 - P_1) H^2}{6 \mu' V_z (z_2 - z_1)}. \quad (27)$$

Відповідно потужність, що використовується на подолання сил тертя твердого полімеру при основі черв'яка, знайдемо за наступною залежністю:

$$\Delta Q_{ч} = P_f V_T x (z_2 - z_1), \quad (28)$$

де  $P$  - середній тиск на ділянці. Тоді сумарна потужність, що витрачається на ділянці довжиною  $z_2 - z_1$ , дорівнює:

$$\Delta Q = I (\Delta Q_{ч} + \Delta Q_{пл} + \Delta Q_p) = \left\{ \frac{\delta V_x}{2} \rho_p \left[ (i_{пл} - i_{вк}) + C_p (t_{ср} - t_{пл}) \right] + \left[ \frac{\mu' (b-x)(z_2 - z_1)}{H} \left[ 4 V_x^2 + V_z^2 (1 + a^2) \right] + P_f V_T x \right] \right\} I (z_2 - z_1). \quad (29)$$

## 6. Висновки

Таким чином, рівняння (29) може бути використане для визначення потужності, що витрачається на процес плавлення полімеру в завантажувально-пластикуючій зоні дискового екструдера.

Література

1. Tadmor, Z. Melting in Plasticating Extruders – Theory and Experiments [Текст] / Z. Tadmor, I. Duvdevani, I. Klein // Polym. Eng. Sci. – 1967. - Т. 80(7). - с. 198-199.
2. Tadmor, Z. Solids Conveying in Screw Extruders. Part I. A Modified Isothermal Model [Текст] / Z. Tadmor, E. Broyer // Polym. Eng. Sci. – 1972 – Т. 117(12). – с. 12-24.
3. Tadmor, Z. Solids Conveying in Screw Extruders. Part II. Non Isothermal Model [Текст] / Z. Tadmor, E. Broyer // Polym. Eng. Sci. – 1972 – Т. 117(12). – с. 378-386.
4. Kacir, L. Solids Conveying in Screw Extruders. Part I. The Delay Zone. [Текст] / L. Kacir, Z. Tadmor // Polym. Eng. Sci. – 1972 – Т. 117(12). – с. 387-395
5. Donovan, R. A Theoretical Melting Model for Plasticating Extruders [Текст] / R. Donovan // Polym. Eng. Sci. – 1971 – Т. 100-(11). – с. 247-257.
6. Edelist, I. Velocity Profiles in Corotating Disk Processors [Текст] / I. Edelist, Z. Tadmor // Polym. Process. Eng. – 1983 – Т. 1(1). – с. 1.
7. David, B. Extensive Mixing in Corotating Processors [Текст] / B. David, Z. Tadmor // Int. Polym. Process. – 1988 – Т. 25(3). – с. 38-47.
8. Резнік, Р.Ю. Особливості і фізична модель процесів у завантажувально-пласткуючій зоні дискового екструдера [Текст] / Р.Ю. Резнік, М.П. Швед, Д.М. Швед // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2012. – Випуск 41. Т. 1. – с. 176 – 178.
9. Раувендааль, К. Экструзия полимеров [Текст] : пер. с англ. – А. Я. Малкина – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
10. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров [Текст] / З. Тадмор, К. Тогос. – М.: Химия, – 1984. – 632 с.

*Розглядаються недоліки сучасної теорії повітряно-реактивних двигунів, які призводять до помилкового опису дії турбореактивних двигунів на підставі помилкового термодинамічного циклу*

*Ключові слова: термодинамічний цикл, зона загальмованого потоку*

*Рассматриваются недостатки современной теории воздушно-реактивных двигателей, приводящие к ошибочному описанию принципа работы турбореактивных двигателей на основе ошибочного термодинамического цикла*

*Ключевые слова: термодинамический цикл, зона заторможенного потока*

УДК 629.7.036.001

# ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ. РАЗРАБОТКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В КООРДИНАТАХ P-V, T-S

**Б. Ш. Мамедов**

Кандидат технических наук, доцент  
Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063  
E-mail: www.zntu.edu.ua

## 1. Введение. Постановка проблемы

Кризис современной теории воздушно-реактивных двигателей (ее полный крах) основывается не только на неправильном понимании и применении уравнения Эйлера, [1], этот кризис основывается еще и на полном отсутствии фундаментальных формул тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля. Ошибочные фундаментальные формулы тяги, полетного (тягового) КПД академика

Б. С. Стечкина и такая же ошибочная фундаментальная теорема о подъемной силе продуваемого профиля профессора Н.Е.Жуковского, [2], [3], повлекли за собой ошибочное описание принципа работы турбореактивного двигателя (ТРД) на основе ошибочной разработки термодинамического цикла [4], в результате чего любой выпускник авиационных Вузов не имеет ни малейшего представления о таком стратегическом, теоретическом и физическом понятии, как реальный процесс генерирования тяги ТРД, что привело к пол-