УДК 678.023.5

М.Є. СКИБА, О.М. СИНЮК, А.Ю. МИХАЙЛОВСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ ШНЕКА ТА КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО РУХУ НА ПЕРЕМІЩЕННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПОЛІМЕРУ В ПРОЦЕСІ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ

Отримані залежності, що визначають вплив геометричних параметрів шнека, чистоти обробки поверхонь матеріального циліндру та стінок гвинтового каналу, частоти обертання та швидкості зворотно-поступального руху шнека на об'ємну та масову продуктивність транспортування полімерного матеріалу до зони плавлення.

Ключові слова: лиття під тиском, полімер, шнек, матеріальний циліндр, еластичний корок, швидкість, продуктивність.

M.E. SKYBA, O.M. SYNYUK, A.Y. MYKHAILOVSKYI
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

MATHEMATICAL MODELLING OF THE SCREW GEOMETRY'S INFLUENCES AND MOTION'S KINEMATIC PARAMETERS FOR MOVING GRANULATED POLYMER IN THE CASTING PROCESS INJECTION MOLDING

There were obtained dependences that determine the influence of geometrical parameters of screw, purity of surface treatment of material cylinder and the walls of helical channel, the rotational speed of the screw and speed reciprocation of the screw on the volume and mass transport productivity of polymer material to the fusion zone.

Keywords: injection molding, polymer, screw, material cylinder, elastic cork, speed, productivity.

Вступ

Величезна кількість вчених [1-18] спостерігала та аналізувала явища, що відбуваються в процесі екструзії полімерів, а саме досліджувала вплив геометричних розмірів шнека і матеріального циліндра, їхньої конструкції та форми, чистоти обробки їхніх поверхонь, форми та розмірів полімерного матеріалу, який поступає через бункер в циліндр, технологічних параметрів процесу екструзії тощо на продуктивність роботи обладнання і якість отриманих виробів. В свою чергу, не достатньо глибоко досліджені процеси, що пов'язанні з рухом полімерного матеріалу в матеріальному циліндрі під час лиття під тиском. У більшості роботах, в яких досліджується процес лиття під тиском, або приводиться описи принципу дії литтєвого обладнання [1-3, 11], або наводять результати експериментальних досліджень [19], або досліджують окремо процеси плавлення матеріалу в циліндрі [20, 21] та процеси заповнення прес-форм і формування виробів [3, 4, 22-24]. І тим більше майже ні ким не досліджувалась комплексна переробка полімерного матеріалу у виріб, тобто від моменту завантаження вихідної сировини через бункер до отримання готового виробу. На наш погляд аналіз процесів, що відбуваються протягом усього періоду переробки, є важливим при дослідженні повторної переробки попередньо подрібненого полімерного матеріалу.

В даній роботі спробуємо дослідити процес лиття під тиском полімерних матеріалів, що значно відрізняється від процесу екструзії. Так, при литті під тиском полімер не видавлюється, а впорскується, що вимагає створювати більший тиск і сильніше нагрівати стінки матеріального циліндру. Крім того, при заповненні прес-форми в циліндрі виникає значно більший зворотний хід полімеру, ніж при екструзії, що змушує збільшувати тиск і витримку під ним поки розплав не охолоне.

Основна частина.

Припустимо, що полімерний матеріал буде поступати на переробку у вигляді гранул, порошку (первинний матеріал) та шматків різних за формою і розміром (вторинний подрібнений матеріал). Полімерний матеріал у вигляді гранул (порошку) або шматків завантажується з бункеру і через отвір для завантаження поступає до черв'яка (рис. 1).

В різних типах литтєвих машин використовують різні методи пластикації полімерного матеріалу. Так, в поршневих литтєвих машинах передача тепла здійснюється від зовнішніх джерел за рахунок теплопровідності полімеру, а ущільнення і гомогенізація – за рахунок ходу поршня при стисканні розм'якшеного матеріалу; в литтєвих машинах з черв'ячним шнеком – частина тепла передається від зовнішніх джерел за рахунок теплопровідності, решта частина утворюється за рахунок роботи сил тертя (зусиль зсуву), ущільнення забезпечується стисканням (осьове переміщення шнека), а гомогенізація – змішуванням (обертання шнека).

В даній роботі будемо моделювати процес пластикації та руху полімерного матеріалу в нагрівальному циліндрі з черв'ячним пластикатором.

Черв'як, обертаючись забирає вихідний матеріал від отвору для завантаження та переміщає його по каналу черв'яка, в зону плавлення, де він пластикується і рівномірно подається у вигляді гомогенного розплаву (рис. 1). Просуваючись вздовж черв'яка, полімерний матеріал розігрівається як за рахунок тепла, що виділяється внаслідок в'язкого тертя, так й тепла, яке передається від нагрівачів, що розташовані на корпусі матеріального циліндру. В результаті ущільнення із матеріалу видаляється, захоплене разом з гранулами (порошком) або шматками, повітря, і питомий об'єм короку гранул або шматків зменшується.

Для компенсації зменшення питомого об'єму матеріалу канал черв'яка виконується таким чином, щоб об'єм витка поступово зменшувався (рис. 1). Тому глибина гвинтового каналу черв'яка на виході завжди менша, ніж на вході.

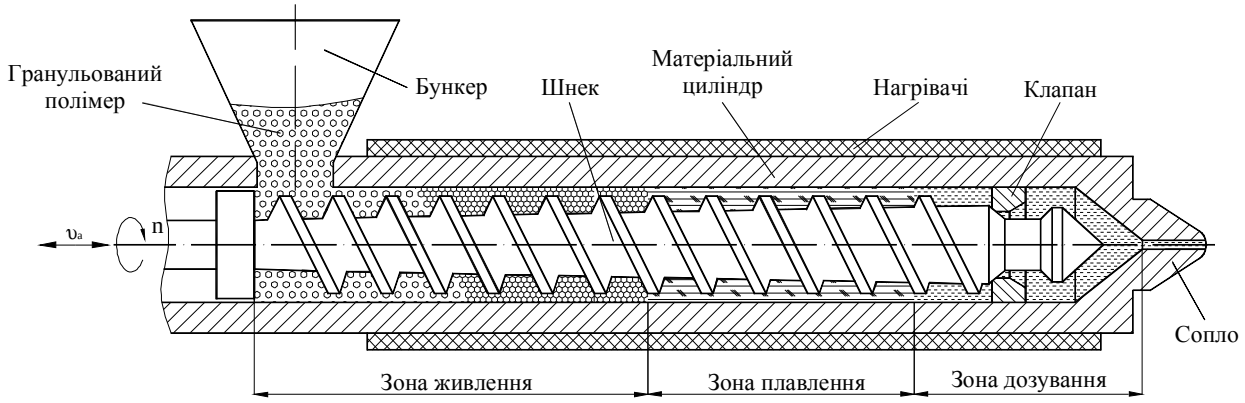


Рис. 1. Схема одношнекового екструдера

За характером процесів, що протікають на кожній дільниці черв'яка, його можна розділити на три основні зони – живлення, плавлення та дозування (див. рис. 1).

Велика кількість робіт [1-7, 11-13, 17, 18], що присвячені моделюванню процесів, які відбуваються під час пластикації полімерного матеріалу в матеріальному циліндрі при екструзії, розглядає переміщення матеріалу тільки за рахунок обертання шнека. В даній роботі будемо намагатися змоделювати процес руху полімеру за рахунок обертального та зворотно-поступального переміщення шнека, що має місце в реальних машинах для лиття під тиском.

Сьогодні в світі існує велика кількість різноманітних машин для лиття під тиском, які можуть відрізнятися технологічним циклом лиття, конструкцією, технологічним процесом формування виробів в прес-формі тощо, однак процес пластикації в них відбувається подібно, а саме під час зворотного руху шнека, що обертається.

Змоделюємо процеси, що протікають у вказаних вище зонах, враховуючи осьове переміщення шнека. Почнемо із зони живлення, тобто дільниці, на якій матеріал, що переробляється, знаходиться в твердому стані – у вигляді гранул, порошків або шматків різних за формою та розмірами (рис. 2).

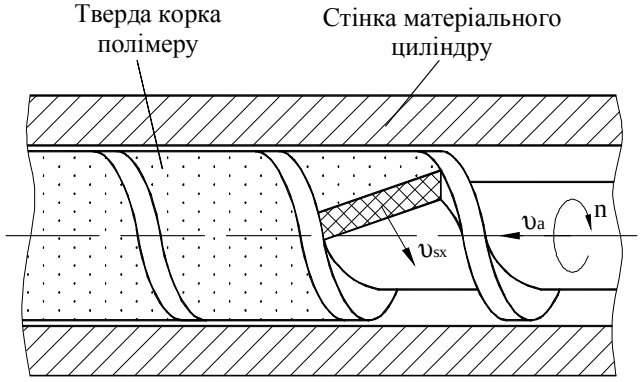


Рис. 2. Рух твердого короку по каналу черв'яка

Для моделювання процесів, що відбуваються у зоні живлення, перед усім почнемо з кінематичного аналізу руху елемента твердого короку.

Призначення цієї зони – переміщати тверді частки полімерного матеріалу від воронки для завантаження до зони плавлення. Транспортування добре сипучих полімерних матеріалів, що мають достатньо велику насипну вагу, не є досить серйозною проблемою. Але транспортування шматків полімеру різних за формою та розмірами (подрібнені відходи) або порошків з поганою сипучістю та низькою насипною вагою в зоні живлення становить досить складну задачу.

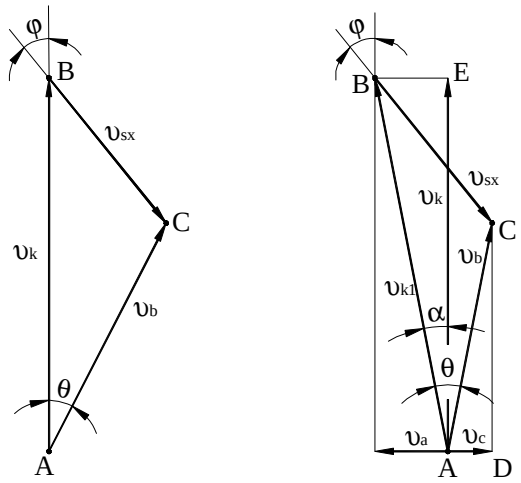
Вперше повний аналіз переміщення твердих речовин в одношнековому екструдері, шнек якого не мав осьового руху, був виконаний в роботі [5], пізніше в роботах [1-3]. В роботі [25] представлений аналіз, який є трохи ширшим, тому що він враховує осьовий рух шнека, який окремо був розглянутий в роботі [6].

При моделюванні переміщення твердого короку в матеріальному циліндрі основне припущення полягає в тому, що тверді частки, ущільнюючись, утворюють еластичний корок, в якій відсутні деформації зсуву. На корок діють сили тертя, які виникають між поверхнею короку та поверхнями черв'яка та матеріального циліндра [11]. До вказаного припущення добавимо ще такі: твердий корок веде себе як неперервний потік; суцільний шар твердого корку контактує зі всією поверхнею каналу; можна знехтувати зазором над гребенем, гравітаційними силами та кривизною каналу.

Для проведення кінематичного аналізу руху твердого короку полімерного матеріалу в зоні живлення перед усім побудуємо плани швидкостей для таких випадків: шнек тільки обертається і шнек обертається і переміщається вздовж осі (рис. 3).

Розглянемо механізм руху твердого короку у гвинтовому каналі черв'яка (шнека), що обертається в середині матеріального циліндру (рис. 3 а). Виберемо точку *A* (деяку точку твердої корки), яка в початковий

момент часу співпадає з відповідною точкою гвинтового каналу. Приймемо, що шнек обертається за годинниковою стрілкою, якщо дивитися з кінця матеріального циліндру. Тоді точка каналу шнека буде рухатися знизу до гори зі швидкістю u_k і за час t_{ab} переміститься на відстань *AB*. Одночасно під дією сили тертя між коркою матеріалу і внутрішньою стінкою матеріального циліндра корок переміщається з точки *A* в точку *C* зі швидкістю u_b. Відповідно, вздовж каналу корок просунеться вниз по каналу на відстань *BC* зі швидкістю u_{sx} (x – вісь, що спрямована вздовж осі розгортки гвинтового каналу), яка визначається кутом нахилу гвинтової лінії гребеня j. Таким чином, кут переміщення твердого короку q є кутом між швидкістю руху шнека і швидкістю корки u_b відносно стінки матеріального циліндра.



а б

а – шнек тільки обертається; б – шнек обертається і переміщається вздовж осі

Рис. 3. План швидкостей

У випадку коли шнек крім обертання має ще осьове переміщення план швидкостей будується таким чином (рис. 3 б). Як видно з рисунка 3 б точка *A* перемістилася у точку *B* за час t_{ab}, але рухалась зі швидкістю u_{k1}, яка складається з тангенціальної (колової) u_k і аксіальної (вздовж осі шнека) u_a швидкостей. Кут a між u_k і u_{k1} визначається з такого рівняння

$$tga = \frac{u_a}{u_k}, \tag{1}$$

де $u_k = pDn$ – колова швидкість шнека; n – частота обертання шнека; D – діаметр шнека.

Зрозуміло, що на швидкість u_{sx}, з якою корок переміщається вздовж каналу, швидкість осьового переміщення шнека не впливає, тому визначити її можна з трикутника *ABC* (рис. 3 а):

$$u_{sx} = u_k \cdot \frac{sinq}{sin(q+j)} = pDn \cdot \frac{sinq}{sin(q+j)}. \tag{2}$$

Представляє інтерес швидкість короку відносно стінки циліндра u_b, так як завдяки її осьовій складовій можна визначати масову витрату твердої корки, що переміщається вздовж осі l, відносно матеріального циліндра. Визначимо u_b з трикутника *ABC* (рис. 3 б):

$$u_b = u_{k1} \cdot \frac{sin\, j}{sin(q+j)}. \tag{3}$$

Швидкість u_{k1} можна визначити з трикутника *ABE* (рис. 3 б)

$$u_{k1} = \frac{u_k}{cos\, a}. \tag{4}$$

Підставивши вираз (4) у рівняння (3) отримаємо

$$u_b = \frac{u_k}{cos\, a} \cdot \frac{sin\, j}{sin(q+j)}. \tag{5}$$

Підставивши значення кута a з виразу (1) та значення u_k у рівняння (5) отримаємо

$$u_b = \frac{pDn}{cos\left(arctg\left(\frac{u_a}{pDn}\right)\right)} \cdot \frac{sin\, j}{sin(q+j)}. \tag{6}$$

З трикутника *ACD* (рис. 3 б) визначаємо осьову складову швидкості переміщення короку відносно стінки циліндра

$$u_c = \frac{pDn}{cos\left(arctg\left(\frac{u_a}{pDn}\right)\right)} \cdot \frac{sin\, j}{sin(q+j)} \cdot sin\left(q - arctg\left(\frac{u_a}{pDn}\right)\right). \tag{7}$$

При усталеному русі сили тертя, що діють на корок з боку стінок гвинтового каналу, і сили тертя, що діють з боку внутрішньої поверхні матеріального циліндру, зв'язані таким співвідношенням [2, 11]

$$F_s = F_b\, cos(q+j), \tag{8}$$

де F_s – сили тертя, що діють на корку з боку стінок гвинтового каналу; F_b – сили тертя, що діють з боку внутрішньої поверхні матеріального циліндру.

Для попереднього моделювання припустимо, що сили реакції з боку стінок каналу і поверхні матеріального циліндру на елемент твердого корокурівні. Звідси перепишемо рівняння (8) таким чином

$$f_s = f_b \cos(q + j), \tag{9}$$

де f_s – коефіцієнт тертя між полімерним корком і стінками гвинтового каналу; f_b – коефіцієнт тертя між полімерним корком і внутрішньою поверхнею матеріального циліндру.

Для руху твердого короку полімерного матеріалу необхідно, щоб коефіцієнт тертя між полімером і поверхнею матеріального циліндру був більшим за коефіцієнт тертя між полімером і стінками каналу.

Виразивши з рівняння (9) кут переміщення твердого короку q і підставивши отриманий вираз в рівняння (2) і (7) маємо

$$u_{sx} = pDn \cdot \frac{\sin\left(\arccos\left(\frac{f_s}{f_b}\right) - j\right)}{\sin\left(\arccos\left(\frac{f_s}{f_b}\right)\right)}. \tag{10}$$

$$u_c = \frac{pDn}{\cos\left(arctg\left(\frac{u_a}{pDn}\right)\right)} \cdot \frac{\sin j \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{f_s}{f_b}\right) - j - arctg\left(\frac{u_a}{pDn}\right)\right)}{\sin\left(\arccos\left(\frac{f_s}{f_b}\right)\right)}. \tag{11}$$

Таким чином, рівняння (10) дозволяє визначати швидкість руху твердого короку полімеру вздовж розгорнутого гвинтового каналу шнека, а отже й час, за який ця корок дійде до границі між зонами живлення і плавлення. Це дозволяє, підбираючи правильні геометричні розміри черв'яка та забезпечуючи необхідну чистоту обробки поверхні стінок гвинтового каналу та внутрішньої поверхні матеріального циліндра на дільниці зони живлення, забезпечувати потрібну об'ємну витрату полімеру, а отже й незалежну об'ємну продуктивність зони живлення. Як відомо з [1, 2] не забезпечення потрібної об'ємної продуктивності в зоні живлення може призвести до нестабільності всього процесу лиття, а отже й до зниження продуктивності роботи литтєвого обладнання та до погіршення якості виробів.

Рівняння (11) дозволяє визначати осьову складову швидкості руху твердого короку полімеру відносно матеріального циліндра, а отже, як зазначалося раніше, й масову витрату твердого короку відносно циліндра. Це дозволить балансуючи між продуктивністю обладнання і якістю виробів визначати оптимальні конструкційні і технологічні параметри процесу лиття під тиском.

Для визначення об'ємної витрати твердого корокуполімеру відносно гвинтового каналу скористаємося формулою [11]

$$Q_k = u_{sx} Hh, \tag{12}$$

де H – ширина гвинтового каналу, що перпендикулярна осі x; h – глибина гвинтового каналу.

Для визначення масової витрати твердого матеріалу відносно матеріального циліндру скористаємося формулою [11] з врахуванням [11, 18]

$$M_c = u_c Hhr, \tag{13}$$

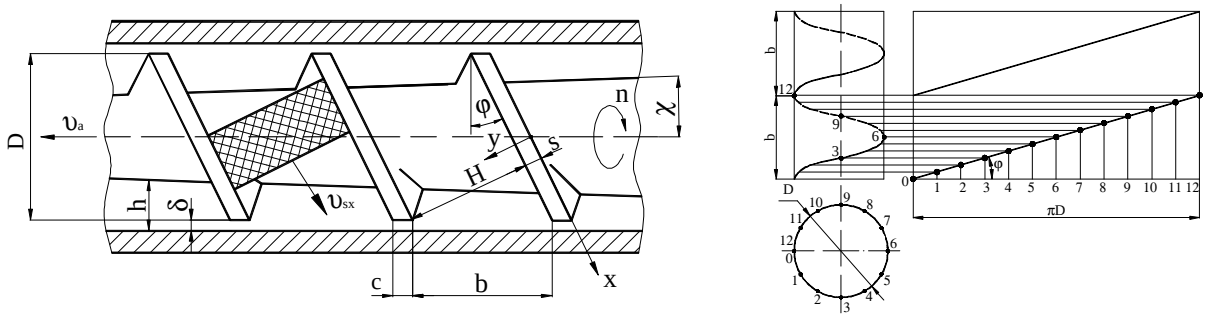
де ρ – середня густина твердого корокуполімеру (в попередніх розрахунках приймається незмінною в межах всього об'єму твердого короку).

Розгорнувши гвинтову лінію черв'яка (рис. 4) можна легко визначити осьову ширину гвинтового каналу (або крок гвинтової лінії)

$$b = pD \cdot tg\, j. \tag{14}$$

В свою чергу осьову ширину гвинтового каналу можна виразити через нормальну ширину гвинтового каналу (див. рис. 4)

$$b = \frac{H}{\cos j}. \tag{15}$$



а) **б)**

а) – геометричні параметри шнека; б) – розгортка гвинтової лінії шнека

Рис. 4. Схема для кінематичного розрахунку

Підставивши рівняння (15) в рівняння (14) можна отримати формулу визначення нормальної ширини каналу черв'яка через його діаметр і кут нахилу гвинтового каналу

$$H = pD \cdot \sin j \ . \tag{16}$$

Підставивши рівняння (10) і (16) в формулу (12), отримаємо

$$Q_k = p^2 D^2 nh \cdot \sin j \cdot \frac{\sin\left(\arccos\left(\frac{f_s}{f_b}\right) - j\right)}{\sin\left(\arccos\left(\frac{f_s}{f_b}\right)\right)}. \tag{17}$$

Підставивши рівняння (11) і (16) в формулу (13), отримаємо

$$M_c = \frac{p^2 D^2 nhr}{\cos\left(arctg\left(\frac{u_a}{pDn}\right)\right)} \cdot \frac{\sin^2 j \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{f_s}{f_b}\right) - arctg\left(\frac{u_a}{pDn}\right) - j\right)}{\sin\left(\arccos\left(\frac{f_s}{f_b}\right)\right)}. \tag{18}$$

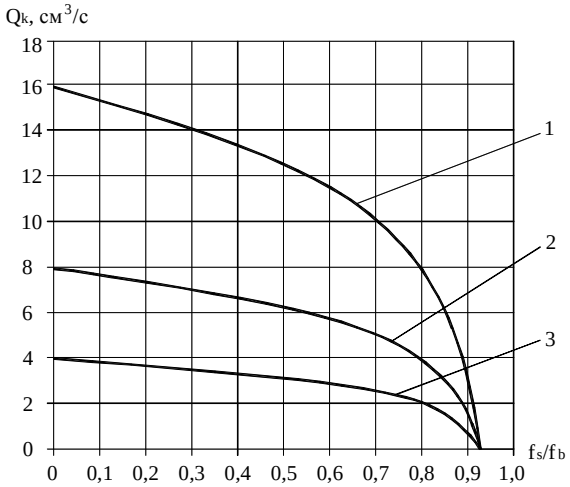
Рівняння (17) дозволяє визначати незалежну об'ємну витрату твердого корокуполімеру відносно гвинтового каналу у зоні живлення, а рівняння (18) дозволяє визначати масову витрату твердого корокуполімеру відносно матеріального циліндру.

Отримані вище рівняння дозволяють визначати продуктивність зони живлення, якщо має місце усталений рівномірний рух твердого корокуполімеру. Це є важливим для отримання вихідних даних для динамічного розрахунку.

Якщо транспортування твердого корокурозглядати як ізотермічний процес, то на об'ємну продуктивність зони живлення будуть впливати такі параметри: відношення коефіцієнтів тертя між коркою і стінкою циліндру та між короком та стінками каналу (f_s/f_b), частота його обертання (n), кут підйому (j) і глибина гвинтового каналу (h) та діаметр шнеку (D), а на масову продуктивність відносно матеріального циліндру крім вказаних вище параметрів буде ще впливати швидкість осьового переміщення шнеку (u_a).

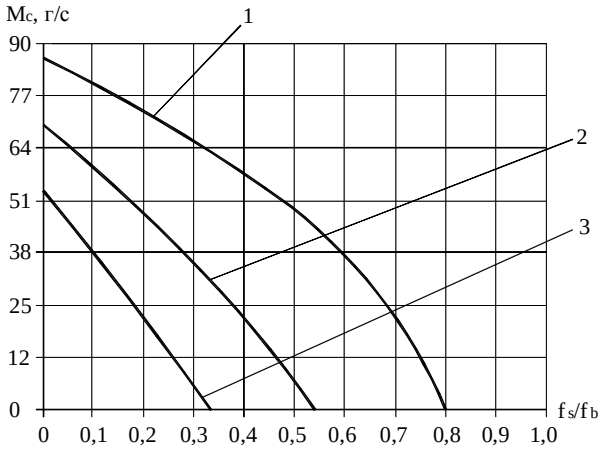
В результаті проведених в роботі теоретичних досліджень, для яких використовувалися дані з робіт [1, 2, 11, 18, 19], встановлено, що вплив співвідношення коефіцієнтів тертя між полімером і циліндром та між полімером і шнеком на об'ємну та масову продуктивність є суттєвим (рис. 5, 6). Отриманні результати добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень, що наведені в [18, 19].

Полімерний матеріал у вигляді еластичної твердого корокуза рахунок різниці сил тертя між полімером і стінкою циліндру та полімером і стінками гвинтового каналу рухається вздовж осі литтєвої головки в напрямку прес-форми. Чим більша різниця між силами тертя, тобто чим менше співвідношення між коефіцієнтами тертя, тим вища швидкість руху короку вздовж каналу, а отже більші об'ємна продуктивність полімеру відносно гвинтового каналу та масова продуктивність полімеру відносно матеріального циліндру. Так, якщо відношення f_s/f_b буде прямувати до нуля, тобто коефіцієнт тертя між полімером і циліндром буде значно перевищувати коефіцієнт тертя між полімером та гвинтовим каналом, то об'ємна продуктивність відносно каналу Q_k та масова продуктивність відносно циліндру M_c, будуть прямувати до максимуму. При цьому, збільшуючи частоту обертання шнека, можна досягнути ще більшої продуктивності (рис. 5).



1 – n = 100 об/хв; 2 – n = 50 об/хв; 3 – n = 25 об/хв

Рис. 5. Графіки залежності продуктивності зони живлення від співвідношення коефіцієнтів тертя між коркою полімеру та поверхнями циліндра і черв'яка



1 –υ = 0,02 м/с; 2 – n = 0,05 м/с; 3 – n = 0,08 м/с

Рис. 6. Графіки залежності масової продуктивності зони живлення від співвідношення коефіцієнтів тертя між короку полімеру та поверхнями циліндра і черв'яка

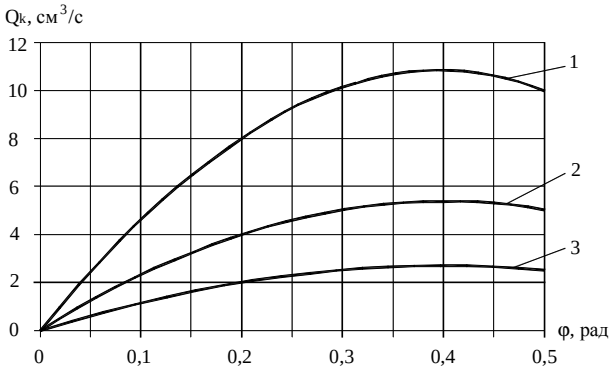
Теоретичні дослідження впливу швидкості осьового руху шнеку на масову продуктивність відносно матеріального циліндра (рис. 6) показали що, чим більша осьова швидкість руху шнека, тим менша масова продуктивність транспортування полімерного короку, тобто для досягнення необхідної продуктивності слід зменшити значення осьової швидкості, а для цього слід виконати динамічний аналіз руху полімерного короку, на основі якого визначити такі конструкційні та технологічні параметри процесу лиття під тиском, які б забезпечили зменшення швидкості осьового руху шнека. Якщо зменшити осьову швидкість не вдасться, тоді слід збільшити різницю між силами тертя, що виникають між полімером і матеріальним циліндром та між полімером і стінками гвинтового каналу, або збільшити насипну вагу матеріалу, що подається через бункер в зону живлення.

Для збільшення різниці між силами тертя з урахуванням досліджень та рекомендацій [1, 2, 11, 18, 25] пропонується:

1. Збільшити тертя між полімером і внутрішньою поверхнею циліндра. Це можна забезпечити в такий спосіб: збільшити шорсткість цієї поверхні; збільшити площу тертя (добавити певні елементи або нарізати канавки); на початку зони живлення зменшити температуру матеріального циліндру.

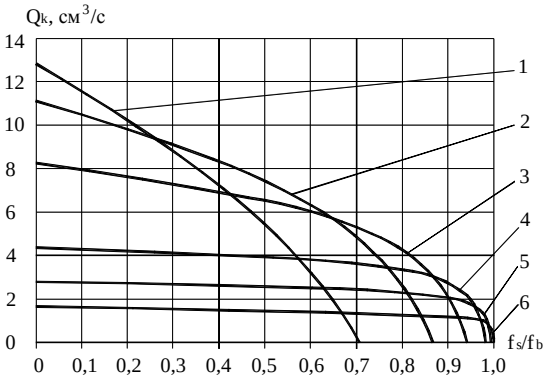
2. Зменшення тертя між полімером і поверхнями гвинтового каналу. Це можна забезпечити в такий спосіб: зменшити шорсткість поверхонь каналу шнека (застосування антифрикційного покриття, використання каталітичної конверсії поверхонь – J-Tex або Dyna-blue); збільшити радіус торця по зовнішньому діаметру гребеня; виключити направляючий короткий гребень на початку зони живлення.

Для збільшення насипної ваги матеріалу, що подається в зону живлення, пропонується збільшити щільність завантаження. Що до конкретних методів ущільнення, то їх будемо аналізувати, розглянувши та змоделювавши процес руху сипучих речовин. Цікаві результати показали дослідження впливу кута підйому гвинтового каналу (кута нарізки) на продуктивність зони живлення (рис. 7, 8).



1 – *n* = 100 об/хв; 2 – *n* = 50 об/хв; 3 – *n* = 25 об/хв

Рис. 7. Графіки залежності продуктивності зони живлення від кута підйому гвинтового каналу



1 – φ = 45^0; 2 – φ = 30^0; 3 – φ = 20^0; 4 – φ = 10^0; 5 – φ = 6^0; 6 – φ = 3^0

Рис. 8. Графіки залежності продуктивності зони живлення від співвідношення коефіцієнтів тертя між короком полімеру та поверхнями циліндра і черв'яка

Так, для руху твердого корокуполімеру при великому куті підйому гвинтового каналу вимагається більш сприятливе співвідношення коефіцієнтів тертя, ніж для малих кутів (рис. 7). Наприклад, якщо кут підйому близький до 90^0, то стійкій процес транспортування полімеру із зони живлення у зону плавлення можна забезпечити тільки з таким шнеком, щоб коефіцієнт тертя між ним і полімерною короком був близьким до нуля. Зрозуміло, що такі умови не реальні. З другого боку, по мірі зменшення кута підйому гвинтового каналу стають прийнятними більші значення співвідношення коефіцієнтів тертя (рис. 8). Наприклад, шнек з кутом підйому гвинтового каналу $j = 10^0$ при співвідношенні коефіцієнтів тертя $f_s/f_b = 0{,}2$ буде забезпечувати вдвічі меншу продуктивність, ніж шнек з кутом нарізки $j = 60^0$, а при співвідношенні коефіцієнтів тертя $f_s/f_b = 0{,}65$ буде забезпечувати навпаки вдвічі більшу продуктивність.

Проведений аналіз показав, що при малих кутах підйому гвинтового каналу створюються кращі умови для транспортування твердого корокуполімерного матеріалу і цей кут має лежати в діапазоні між 19^0 (0,33 рад) та 24^0 (0,42 рад). Отримані результати добре узгоджуються з [1, 2].

Висновки

В результаті проведеного кінематичного аналізу були отримані залежності, що визначають вплив геометричних параметрів шнека, чистоти обробки поверхонь матеріального циліндра та стінок гвинтового каналу, частоти обертання та швидкості зворотно-поступального руху шнека на об'ємну та масову продуктивність транспортування полімерного матеріалу до зони плавлення.

Звичайно для повного аналізу і моделювання процесів, що відбуваються в зоні живлення, необхідно дослідити вплив: всіх сил, що діють на твердий корок полімеру, форми і розмірів гранул або шматків полімерного матеріалу, що завантажується у бункер, температури стінок матеріального циліндру на переміщення твердого корокуполімеру до зони плавлення, але це є темою подальших досліджень.

Література

1. Торнер Р. В. Оборудование заводов по переработке пластмасс / Р. В. Торнер, М. С. Акутин. – М.: Химия, 1986. – 400 с.

2. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р. В. Торнер. – М.: Химия, 1977. – 464 с.

3. Tadmor, Zehev, 1937. Principles of polymer processing / Zehev Tadmor, Costas G. Gogos. – Published by John Wiley&Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 2006. – 920 p.

4. Tadmor, Z. Engineering Principles of Plasticating Extrusion [Text] / Z. Tadmor, T. Klein // Modern Plastics. – 1970 – Vol. 1, Issue 6. – P. 46–54.

5. Darnell W. H. Solids Conveying in Extruders / W. H. Darnell, E. A. Mol. // Soc. Plast. Eng. Journal. – 1956. – № 12. – P. 20-28.

6. Rauwendaal C. Conveying and Melting in Screw Extruders with Axial Screw Movement / C. Rauwendaal // International Polymer Processing. – 1992. – Vol. 7. – № 1. – P. 26–31.

7. Chan D. Dynamic behavior of a single screw plasticating extruder part II: Dynamic modeling / D. Chan, R. W. Nelson, L. James Lee // Polymer Engineering & Science. – 1986. – V. 26. – Issue 2. – P. 152–161.

8. Thibault F. A numerical model for single screw extrusion with poly(vinyl chloride) (PVC) resins / F. Thibault, P. A. Tanguy, D. Blouin // Polymer Engineering & Science. – 1994. – V. 34. – Issue 18. – P. 1377–1386.

9. Covas J. A. An optimization approach to practical problems in plasticating single screw extrusion / J. A. Covas, A. G. Cunha, P. Oliveira // Polymer Engineering & Science. – 1999.– V. 39. – Issue 3. – P. 443–456.

10. Wilczyński Krzysztof. Experimental study for starve-fed single screw extrusion of thermoplastics / Krzysztof Wilczyński, Adrian Lewandowski, Krzysztof J. Wilczyński // Polymer Engineering & Science. – 2012. – V. 52. – Issue 6. – P. 1258–1270.

11. Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров / Д. М. Мак-Келви. – М.: Химия, 1965. – 444 с.

12. Сагиров С. Н. Исследование и моделирование процесса движения полимера в одношнековом экструдере / С. Н. Сагиров // Фундаментальные исследования. Технические науки. – 2011. – № 12. – С. 179 – 183.

13. Воронін Л.Г., Дослідження процесу гомогенізації полімеру при черв'ячній екструзії / Л. Г. Воронін, М. П. Швед, А. С. Богатир // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 7. – С. 40 – 43.

14. Черняев В. В. Математическое моделирование влияния геометрических параметров шнека на процессы тепломассопереноса / В. В. Черняев // Вестник Пермского Национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 6. – С. 85 – 92.

15. Черняев В. В. Исследование влияния реологических характеристик на процесс экструзии / В. В. Черняев // Вестник Пермского Национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2011. – № 5. – С. 29 – 36.

16. Галыгин В. Е. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов : учебное пособие / В. Е. Галыгин, Г. С. Баронин, В. П. Таров, Д. О. Завражин. – Тамбов : ФГБОУ ВПО " Тамбовский государственный технический университет". – 2012. – 180 с.

17. Степанюк Д. А. Черв'ячно-шестеренний екструдер при переробці полімерних матеріалів / Д. А. Степанюк, М. П. Швед, Д. М. Швед // Международный научный журнал "ScienceRise". – 2015. – № 3/2(8). – С. 31 – 34.

18. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров / В.С. Ким. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 568 с.

19. Лапшин В. В. Основы переработки термопластов литьем под давлением / В. В. Лапшин. – М.: Химия, 1974. – 270 с.

20. Donovan R. C. The plasticating process in injection molding / R. C. Donovan // Polymer Engineering & Science. – 1974. – V. 14. – Issue 2. – P. 101–111.

21. Donovan R. C. A theoretical melting model for a reciprocating-screw injection molding machine / R. C. Donovan // Polymer Engineering & Science. – 1971. – V. 11. – Issue 5. – P. 361–368.

22. Злотенко Б. М. Научные основы проектирования технологического процесса литья изделий лёгкой промышленности с прогнозированными свойствами: дис. доктора техн. наук : 05.19.06 / Злотенко Борис Миколайович. – К., 2003. – 405 с.

23. Синюк О. М. Удосконалення прес-форм для лиття деталей взуття: дис. канд. техн. наук : 05.05.10 / Синюк Олег Миколайович. – Хмельницький, 2002. – 157 с.

24. Кулік Т. І. Вдосконалення технологічного процесу лиття комбінованих взуттєвих виробів із полімерних матеріалів : дис. канд. техн. наук : 05.19.06 / Кулік Тетяна Ігорівна. – К., 2006. – 190 с.

25. Оссвальд Т. А. Литье пластмасс под давлением / Т. А. Оссвальд, Л.-Ш. Тунг, П. Дж. Грэманн; под ред. Э.Л. Калинчева. – СПб.: Профессия, 2006. – 712 с.

Рецензія/Peer review : 20.10.2015 р. Надрукована/Printed :1.11.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією