

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУХУ ПОЛІМЕРУ У ПЛОСКОЩІЛИННІЙ ГОЛОВЦІ

Abstract: The mathematical model of polymer's motion in the channels of the flat-die examined in the article. The equations for determination of film's thickness and width changing within the limits of the flat-die and the boss roller during the film's orifice drawing are given. The influence of geometrics of the flat-die's internal channels and technological processing characteristics over the film's parameters is determined.

Key words: mathematical model, flat-die, film's parameters, even thickness, technological parameters.

Аномація: Розглядається математична модель процесу руху полімеру в каналах плоскощільної головки. Наведені рівняння для визначення зміни товщини та ширини плівки при її витягуванні на ділянці між головкою та витяжним валком. Визначено вплив геометричних розмірів внутрішніх каналів головки і технологічних параметрів проведення процесу на параметри плівки.

Ключові слова: математична модель, плоскощільна головка, параметри плівки, рівномірна товщина, технологічні параметри.

Аннотация: Рассматривается математическая модель процесса движения полимера в каналах плоскощелевой головки. Приведены уравнения для определения изменения толщины и ширины пленки при ее вытягивании на участке между головкой и вытяжным валиком. Определено влияние геометрических размеров внутренних каналов головки и технологических параметров проведения процесса на параметры пленки.

Ключевые слова: математическая модель, плоскощелевая головка, параметры пленки, равномерная толщина, технологические параметры.

1. Вступ

Постановка проблеми

Головною вимогою до конструкції плоскощільної головки є її здатність рівномірно розподіляти розплав полімеру по всій довжині, що визначається коефіцієнтом рівнотовщинності. Відомо, що коефіцієнт рівнотовщинності плівки або ламінованого матеріалу залежить від конструкції головки та технологічних параметрів процесу. Тобто одна і та ж плоскощільна головка за різними технологічними параметрами процесу буде виробляти продукт з різними коефіцієнтами рівнотовщинності та різною товщиною плівки при сталих геометричних параметрах. До технологічних параметрів належить марка полімеру, температура розплаву полімеру, вхідний тиск, швидкість ламінованого матеріалу. Для визначення вказаних важелів можуть проводитися досліді на промисловій установці або можливе математичне моделювання процесу руху полімеру у плоскощільній головці. Слід відмітити, що математичне моделювання має переваги, тому що воно дозволяє дослідити не тільки вплив технологічних параметрів, а й визначити оптимальні геометричні показники головки для забезпечення більш високого значення коефіцієнта рівнотовщинності.

Аналіз публікацій

Аналіз публікацій [1–8] показав, що на даний момент не існує математичних моделей та методів розрахунків, які дозволяють визначити геометричні параметри внутрішніх каналів плоскощільної головки, за яких отримується плівка рівної товщини за її шириною з урахуванням технологічних параметрів (тиску, температури) проведення процесу.

Мета роботи

Змоделювати процес руху полімеру у плоскощільній головці з урахуванням геометричних параметрів її внутрішніх каналів та технологічних параметрів проведення процесу. Провести перевірку адекватності математичної моделі.

2. Математична модель

При розробці математичної моделі течії розплаву полімеру у формуючих каналах плоскощільної головки зроблені такі припущення: розплав є нестисливою рідиною; течія ламінарна; гравітаційні сили настільки малі, що ними можна нехтувати; у місці контакту рідини зі стінками головки немає проковзування.

Для моделювання процесу руху полімеру у плоскощільній головці необхідно поділити головку на ділянки. Так, колектор розбивається на конусні труби різних діаметрів, а щілина, що утворена плитами, на плоскі прямокутні щілини (рис. 1). З цих об'єктів можна одержати практично будь-який профіль каналів плоскощільної головки.

Основні геометричні позначення головки, які використовуються в математичній моделі, представлені на рис. 1. Для кожної ділянки можна записати рівняння об'ємної витрати полімеру через поперечний переріз ділянки, коли відоме значення перепаду тиску або, навпаки, визначити перепад тиску, коли відоме значення об'ємної витрати.

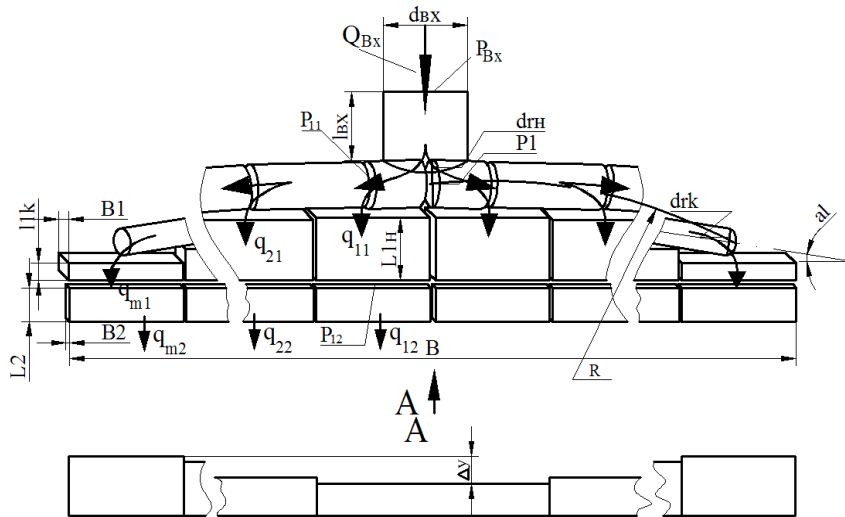


Рис. 1. Розрахункова схема плоскощільної головки:

d_{BX} – діаметр вхідного патрубку; Q_{BX} – вхідна об'ємна витрата; P_{BX} – вхідний тиск; l_{BX} – довжина вхідного патрубку; $P1$ – тиск на вході у колектори; d_{rH} – діаметр колектора на вході; d_{rk} – діаметр колектора на виході; P_{11} – тиск у кінці першої ділянки колектора; P_{12} – тиск у кінці першої широкої призми; αl – кут нахилу колектора до горизонту; $B1$ – ширина широкої щілини; $B2$ – ширина вузької щілини; $L1_H$ – початкова висота широкої призми; $l1k$ – кінцева висота широкої призми; $L2$ – висота вузької призми; B – довжина головки; R – радіус кривизни колектора; Δy – прогин губки

Слід відмітити, що для створення рівномірності витікання полімеру із головки кінцева губка (щілина $B2$) має всередині прогин величиною Δy . В цьому випадку математична модель розрахунку буде мати вид системи рівнянь (1–13).

Перші три рівняння – це об'ємні витрати через поперечний переріз труби (1), через плоску щілину (2) і через конічну трубу (3). Слід зауважити, що ці рівняння отримані для випадку степеневі залежності напруги зсуву від швидкості зсуву (рівняння 14), яка має місце для поліетиленів [3–7].

Рівняння (7–8) описують залежність в'язкості та індексу течії від температури. Рівняння (10–11) дозволяють визначити, які параметри отримує плівка (ширина b , товщина δ_1) в результаті її витяжки. Початкові та граничні умови наведені в рівняннях (12–13).

У процесі розрахунку плоскощільної головки її геометричні та технологічні параметри процесу формування (тиск перед головкою P_{BX} , тиск на виході із головки $P_{ВИХ}$, розподіл температур полімеру в середині головки по її довжині $T = fT(l_i)$) розглядаються як відомі. В основу розрахунку покладений баланс тисків і баланс витрат при отриманих тисках по всіх ділянках і по всій головці. Сутність такого балансу полягає в тому, що задається значення тиску $P1$ (в межах від 0 до P_{BX}) після першої ділянки циліндричної труби. Після цього розраховуються витрати полімеру Q_{BX} на вході циліндричної труби довжиною l_{BX} за першим рівнянням системи (1). Отримані витрати полімеру Q_{BX} розподіляються рівними частками на два нахилених конічних канали, тому що головка вважається симетричною. Витрати $Q_{BX}/2$ та вхідний тиск $P1$ відомі й за третім рівнянням системи (3), розраховуємо тиск у кінці конічного каналу P_{11} . Для визначення витрат полімеру q_{11} на першій ділянці широкої щілини задаємо тиск P_{12} у межах від 0 до $P1$. Використовуючи рівняння друге (2) системи, розраховуємо q_{11} . Аналогічно розраховуємо витрати на вузькій щілині q_{12} за рівнянням системи (2), з урахуванням того, що тиск на вході цієї щілини є P_{12} , а на виході із головки надлишковий тиск $P_{ВИХ}$ дорівнює нулю. Враховуючи, що витрати на широкій щілині та витрати на вузькій щілині будуть різними, методом дихотомії необхідно змінювати тиск P_{12} таким чином, щоб виконувалось рівняння (7) $q_{11} = q_{12}$ із заданою точністю (похибка не повинна перевищувати значення $\Delta q = 1,0 \cdot 10^{-11}$). Слід зауважити, що ця точність дає похибку на виході менше 0,0001% за витратами полімеру.

Після визначення витрат на перших ділянках щілин q_{11} визначаємо витрати на другий конічний канал як різницю $Q_{BX}/2 - q_{11}$. Після цього можна розрахувати тиск у кінці другої ділянки конічного каналу P_{21} , процес розрахунку повторити для другої ділянки щілин і так далі до останньої ділянки. Після проведених розрахунків маємо значення витрат на всіх ділянках на виході із головки. Наступним кроком є перевірка, чи виконується рівняння балансу витрат на вході й виході із головки (5). Нами прийнята точність балансу витрат на вході та виході із головки ($\Delta q = 1,0 \cdot 10^{-6}$), яка дає похибку по загальних витратах менш, ніж 0,01%. Коли витрати на вході перевищують витрати на виході, то величину тиску $P1$ необхідно збільшувати, якщо навпаки, витрати на вході менші, ніж витрати на виході, то тиск $P1$ необхідно зменшувати. Для знаходження значення тиску, при якому буде зберігатися із заданою точністю баланс витрат входу і виходу, застосуємо метод дихотомії [5].

Отримані витрати на виході головки дозволяють розрахувати товщину плівки на виході (11) та її ширину (10) при відомому значенні швидкості (v_0) матеріалу, який ламінується.

Таким чином, в цілому, для всієї головки на кожній ділянці буде зберігатися баланс тисків та витрат полімеру.

На основі наведеного алгоритму розроблено програму (рис. 2) для знаходження тисків та витрат для всієї головки при відомих геометричних та технологічних параметрах головки.

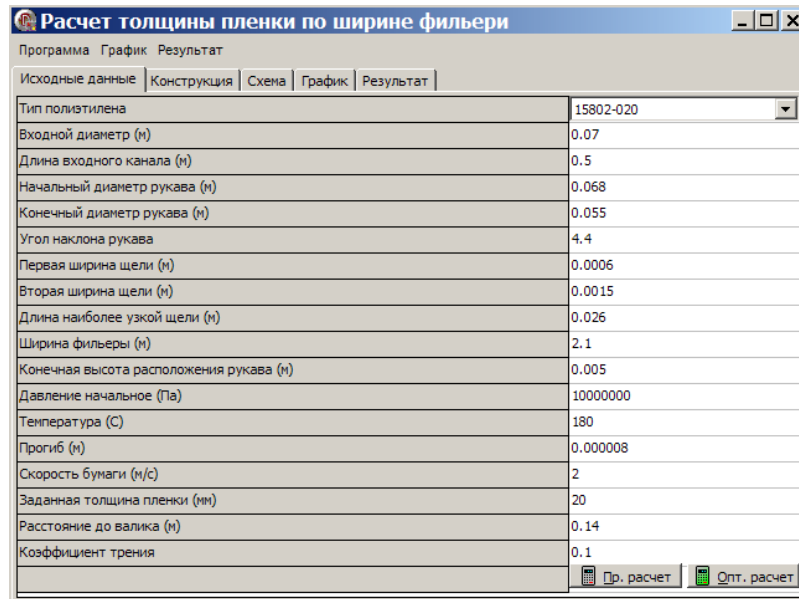


Рис. 2. Програма для розрахунку товщини плівки по ширині головки

Необхідно відмітити, що для оцінки рівномірності розподілу розплаву полімеру на виході головки нами використовувався коефіцієнт рівнотовщинності (k), який розраховувався за рівнянням

$$k = \frac{q_{i2\min} b_0 v_0}{q_{i2\max} b v_1}, \quad (15)$$

де $q_{i2\min}$, $q_{i2\max}$ – витрати мінімальні і максимальні відповідно на виході головки, b_0 , b – ширина плівкового матеріалу на виході з головки та на охолоджуючому пристрої, v_0 , v_1 – швидкість полімеру на виході з головки та на охолоджуючому пристрої.

При проведенні розрахунків як базові параметри прийняті геометричні величини внутрішніх каналів промислової плоскощілинної головки, які наведені в табл.1, а також вказано діапазони їх змін.

Таблица 1. Геометричні параметри внутрішніх каналів плоскощілинної головки

№ п/п	Найменування показника	Позначення	Розмірність	Базове значення	Діапазон змін параметра
1	Вхідний діаметр підвідної труби	dvx	м	0,07	–
2	Довжина підвідної труби	Lvx	м	0,3	–
3	Діаметр рукава початковий	dgn	м	0,068	0,03–0,08
4	Діаметр рукава кінцевий	drk	м	0,055	0,03–0,06
5	Кут нахилу рукавів	a/	град.	6	4–10
6	Перша ширина щілини	B2	м	0,0004	0,0002–0,0007
7	Друга ширина щілини	B1	м	0,0015	0,001–0,008
8	Довжина вузької частини губок головки	L2	м	0,058	0,02–0,08
9	Ширина головки	B	м	2,1	–
10	Кінцева висота розташування рукава	l1k	м	0,005	0,002–0,01
11	Прогин губок головки	Δy	м	0,00000	0,000002–0,00001

Враховуючи, що при ламінуванні переважно використовується поліетилен марки 15802-020, всі подальші розрахунки проведені для марки цього поліетилену. Технологічні параметри, такі як вхідний тиск, температура, швидкість паперу, змінювались в діапазонах, наведених в табл. 2.

Таблиця 2. Діапазон змін технологічних параметрів

№ п/п	Найменування показника	Позначення	Розмірність	Базове значення	Діапазон змін параметра
1	Вхідний тиск у головці	P	МПа	12	10–14
2	Вхідна температура	T	°C	250	230–260
3	Швидкість ламінованого матеріалу	v	м/с	1,8	1,6–2,0

Змінюючи геометричні розміри головки, можна дослідити, як ці параметри впливають на товщину плівки при ламінуванні та на її рівнотовщинність.

Обробка результатів розрахунків дозволила провести аналіз впливу геометричних розмірів внутрішніх каналів плоскощільної головки на рівнотовщинність плівки полімеру на виході із головки, а також дослідити, як змінюється товщина плівки по центру та по краях головки.

На рис. 3 показано, що зі зростанням кута нахилу колектора товщина плівки на краю головки не змінюється, а в центрі головки різко зменшується.

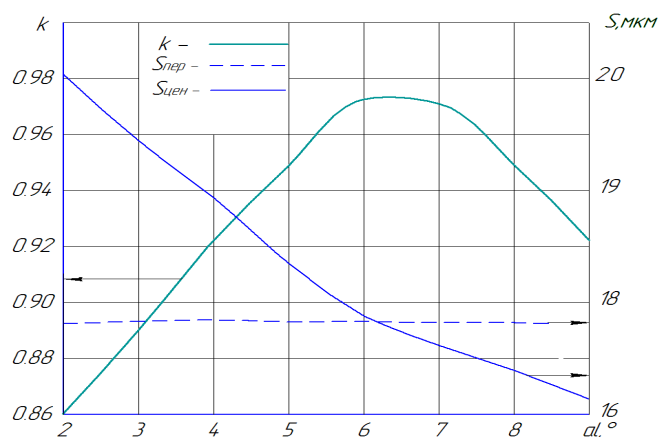


Рис. 3. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності (k) та товщини плівки полімеру в центрі ($S_{\text{цен}}$) та з краю ($S_{\text{пер}}$) головки від кута нахилу колектора (α)

Видно, що існує оптимальне значення кута нахилу рукавів ($\alpha=6,4^\circ$), при якому коефіцієнт рівнотовщинності витрат полімеру із головки буде найкращим (близьким до 1).

Вплив вузької ширини щілини ($B2$) показано на рис. 4. Збільшення вузької ширини щілини приводить до збільшення товщини плівки і в центрі головки, і на її периферії. При цьому існує оптимальне значення ($B2$), при якому значення коефіцієнта рівнотовщинності (k) буде найкращим.

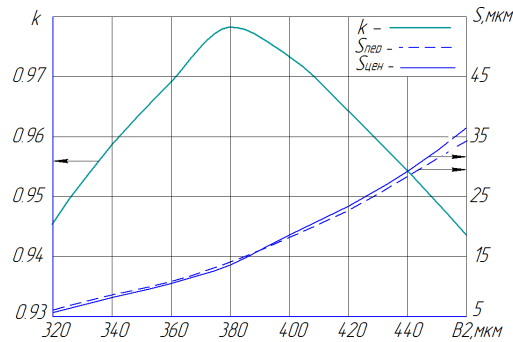


Рис. 4. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності (k) та товщини плівки полімеру в центрі ($S_{цен}$) та з краю ($S_{пер}$) головки від першої ширини щілини (B_2)

При зміні широкій ширини щілини (B_1) товщина плівки на периферії зростає не значно, на відміну від центру, де вона зростає значніше. З цього випливає, що існує оптимальне значення $B_1 = 1,35$ мм, при якому отримується плівка з незначними відхиленнями товщини по ширині плівки (рис. 5).

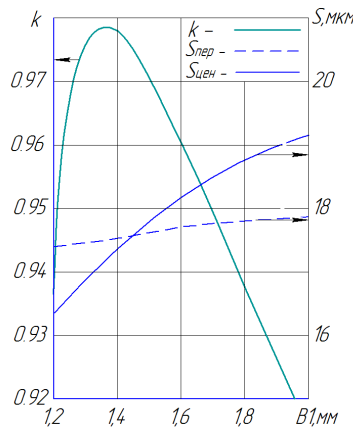


Рис. 5. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності (k) та товщини плівки полімеру в центрі ($S_{цен}$) та з краю ($S_{пер}$) головки від другої ширини щілини (B_1)

Розрахунки показують, що із зростанням довжини вузької щілини (L_2) незначно змінюється значення коефіцієнта рівнотовщинності (k), а товщина плівки в центрі та на периферії головки значно зменшується (рис. 6).

Прогин губки (Δy), як видно з рис. 7, значно впливає на товщину плівки в центрі головки. Чим більшим є прогин, тим меншою є товщина плівки по центру головки.

Таким чином, програма дозволяє дослідити вплив геометричних параметрів головки на її товщину та рівнотовщинність. Розрахунки показують, що такі геометричні параметри, як кут нахилу колекторів (α), кінцевий діаметр рукава (d_{rk}), перша (B_2) та друга (B_1) ширина щілини значно впливають на рівномірність товщини плівки по її ширині. Тому їх розрахунок при проектуванні головки є особливо важливим. Компенсувати неправильно розраховані геометричні розміри внутрішніх каналів головки прогином губки не завжди можливо.

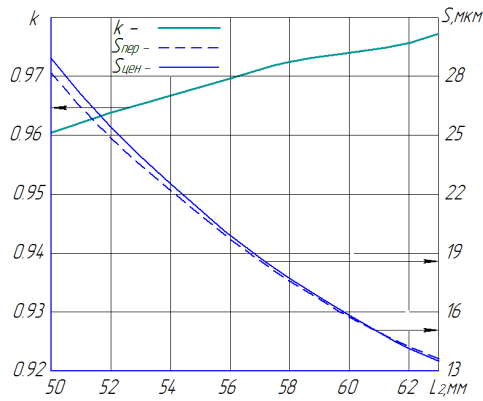


Рис. 6. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності (k) та товщини плівки полімеру в центрі ($S_{цен}$) та з краю ($S_{пер}$) головки від довжини вузької щілини (L_2)

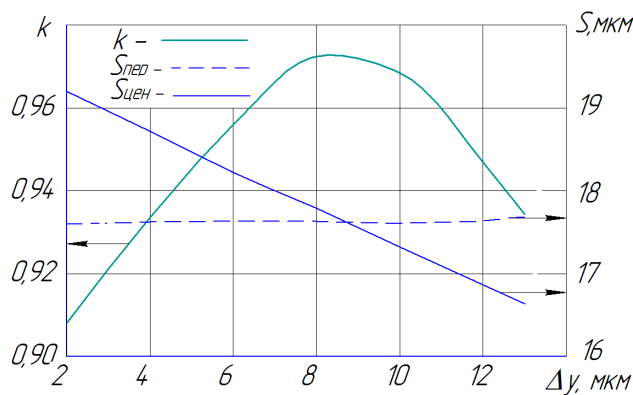


Рис. 7. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності (k) та товщини плівки полімеру в центрі ($S_{цен}$) та з краю ($S_{пер}$) головки від прогину губки (Δy)

Вплив технологічних параметрів (тиск та температура) на товщину плівки та на її рівномірність розподілу по товщині наведено на рис. 8 та 9. Як видно з рисунків, технологічні параметри незначно впливають на коефіцієнт рівнотовщинності (k), а їх вплив на товщину плівки значний.

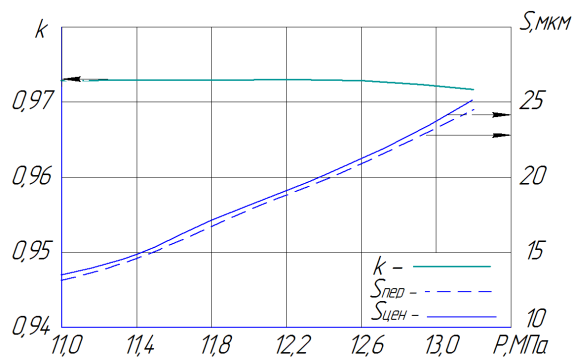


Рис. 8. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності (k) та товщини плівки полімеру в центрі ($S_{цен}$) та з краю ($S_{пер}$) головки від тиску (P)

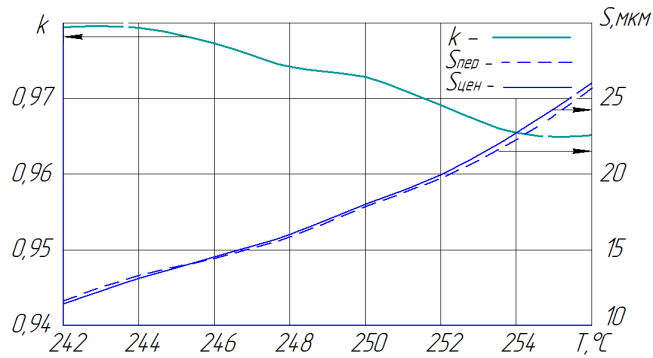


Рис. 9. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності (k) та товщини плівки полімеру в центрі ($S_{цен}$) та з краю ($S_{пер}$) головки від температури (T)

3. Висновки

У статті запропоновано методику та математичну модель процесу руху полімеру в каналах плоскощілинної головки. Наведені рівняння для визначення зміни товщини та ширини плівки при її витягуванні на ділянці між головкою та витяжним валком. Розроблено алгоритм та програму розрахунку параметрів плівки, яка виробляється. Показано вплив геометричних розмірів внутрішніх каналів головки і технологічних параметрів проведення процесу на параметри плівки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. www.dieflow.com.
2. www.plasticflow.com.
3. Рябинин Д.Д. Исследование течения расплавов полимеров в формующих каналах плоскощелевых экструзионных головок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Днепропетровский химико-технологический институт. – Днепропетровск, 1974. – 27 с.
4. Сокольський О.Л. Розроблення плоскощілинних головок для екструзійного формування листових та плівкових виробів із полімерних композицій: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Національний технічний університет України "КПІ". – К., 2005. – 173 с.
5. Бакалов О.В., Чередніченко П.І. Експериментальне дослідження руху полімеру в плоскощілинній головці: Зб. доповідей. – Чернігів: Техника и технология химволокна, 2007.
6. Торнер Р.В. Переработка полимеров. – М.: Химия, 1976. – 404 с.
7. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. – М.: Колос, 2005. – 568 с.
8. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины. Конструкции и технические расчеты. – Спб.: Профессия, 2007. – 472 с.
9. Шаповал В.М. Механика эленгационного течения полимеров. – М.: Физматлит, 2007. – 176 с.

Стаття надійшла до редакції 22.07.2008