

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 678.057

СІВЕЦЬКИЙ В. І., МАЛЬЧЕВСЬКИЙ О. Т. *
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІШУВАННЯ ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИЦІЇ В КАНАЛІ СТАТИЧНОГО ЗМІШУВАЧА

Наведено порівняльні результати чисельного моделювання процесу перемішування двофазної полімерної композиції у пропорції 50/50 в каналах базового статичного змішувача типу Kenics та розробленого лопатевого статичного змішувача в різних його конфігураціях, які дають уявлення щодо ефективності запропонованого змішувача в порівнянні із базовим. Для опису реологічних властивостей полімерного розплаву використано модель в'язкості Берда-Карро, яка найбільш адекватно відображає неньютонівську поведінку полімерів. Система рівнянь, що включає рівняння імпульсу, енергії, нерозривності та об'ємної частки вторинної фази, була реалізована у програмному середовищі ANSYS Fluent із застосуванням методу скінченних елементів. Базовим об'єктом порівняння виступав статичний змішувач Kenics із традиційними геометричними параметрами, а саме: кут повороту елементів 120° , розташування сусідніх елементів під кутом 90° . Для лопатевого статичного змішувача розглядався більш широкий різновид конфігурації геометрії: товщина елементів (10, 15 та 20 мм) та кути їх взаємного повороту (45° і 90°).

Ключові слова: екструзія, перемішування, статичний змішувач, полімерна композиція, моделювання

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2025.348807

* Corresponding author: hardmetal1876@gmail.com
Received 25 July 2025; Accepted 04 September 2025

Постановка проблеми. Вироби на основі багатокомпонентних полімерних сумішей з роками відіграють все більшу роль в різноманітних галузях, а отже, збільшуються вимоги щодо якості цих виробів, що в свою чергу, актуалізує питання щодо якості перемішування полімерної композиції. Адже саме якість перемішування дає гарантію того, що дисперсна фаза рівномірно розподілиться по всьому об'єму композиції, що дозволить забезпечити кращу функціональність кінцевого продукту. Метою роботи було проведення порівняльних досліджень щодо якості перемішування полімерної композиції в каналах запропонованого лопатевого статичного змішувача в порівнянні зі статичним змішувачем типу Kenics [1].

Аналіз попередніх досліджень. В результаті аналізу попередніх робіт щодо дослідження якості перемішування композицій на основі полімерних матеріалів [2-14] можна зробити висновок, що основні показники якості перемішування визначаються системами диференціальних рівнянь, що представлені основними співвідношеннями механіки суцільних середовищ (МСС). В лабораторних та промислових умовах змішування полімерних композицій відбувається при використанні матеріалів з однаковими фізико-механічними властивостями [2-5]. Критерієм однорідності полімерної суміші може слугувати перепад концентрації одного із компонентів в різних поперечних перерізах по довжині каналу статичного змішувача [5-8].

Метою дослідження є визначення ефективності запропонованої конструкції лопатевого статичного змішувача та залежності того, як геометричні і технологічні параметри впливають на динаміку перемішування і результуючу однорідність вихідної полімерної композиції, і порівняння її з рівнем однорідності аналогічних композицій отримуваних на статичному змішувачі типу Kenics.

Виклад основного матеріалу. В даній роботі представлено порівняльні результати процесу перемішування полімерної композиції, що складається з двох полімерних розплавів у співвідношенні 50/50, які відрізняються параметрами, що не впливають на фізико-технічні властивості, наприклад кольором, в каналах статичних змішувачів типу Kenics та запропонованої нової конструкції лопатевого змішувача. Показником однорідності під час моделювання слугувала концентрація однієї із фаз полімерної суміші в різних поперечних перерізах по довжині каналу статичного змішувача. Моделювання потоку у каналі статичного змішувача типу Kenics проводились при різній об'ємній продуктивності полімерної композиції. При моделюванні потоку у запропонованому лопатевому статичному змішувачі, окрім об'ємної

продуктивності, було досліджено ряд додаткових геометричних параметрів (товщина змішувального елемента, кут розміщення елементів відносно один одного), та їхній вплив на процес перемішування і загальну гомогенізацію. Це дало можливість виділити найбільш оптимальну геометрію конструктивних елементів та технологічних режимів процесів змішування у запропонованому лопатевому змішувачі, при якому досягається найкращий рівень гомогенізації полімерної композиції. Результуючий рівень однорідності суміші визначається лише механічним перемішуванням фаз полімерної композиції.

Математична модель, яка описує ізотермічний процес перемішування двофазного ламінарного потоку неньютонівської рідини, розглядається у вигляді системи диференціальних рівнянь імпульсу, енергії, нерозривності та рівняння об'ємної частки вторинної фази [2-4, 9, 10-12]. Так як змодельований матеріал являється розплавом полімеру (неньютонівською рідиною), а його в'язкість і швидкість зсуву не є лінійними і продуктивність течії розплаву в статичному змішувачі описується рівнянням безперервності та основним рівнянням розплаву, а модель в'язкості описується моделлю Берда-Карро [2].

Рівняння імпульсу для композиції являється сумою рівнянь імпульсу індивідуально для кожної із фаз:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (1)$$

де n – кількість фаз, $\vec{F}$ – об'ємна сила, μ_m – в'язкість композиції:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (2)$$

$\vec{v}_{dr,k}$ – швидкість зсуву для вторинної фази k :

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (3)$$

Рівняння енергії для композиції:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (4)$$

де k_{eff} – ефективна провідність; $\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T)$ – передача енергії внаслідок провідності; S_E включає будь-які інші об'ємні джерела тепла.

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (5)$$

для фази, що стискається, і $E_k = h_k$ для фази, що не стискається, де h_k – чутлива ентальпія для фази k .

Рівняння нерозривності для композиції:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (6)$$

де $\vec{v}_m$ – усереднена за масою швидкість:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (7)$$

ρ_m – густина композиції:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (8)$$

α_k – об'ємна частка фази k .

З рівняння нерозривності для вторинної фази можна отримати рівняння об'ємної частки вторинної фази:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (9)$$

Рівняння безперервності та основне рівняння розплаву:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (10)$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \tau = 0 \quad (11)$$

$$\tau = 2\eta_0 D \quad (12)$$

де v – вектор швидкості, p – тиск, τ – тензор напружень, D – тензор швидкості деформацій, η_0 – в'язкість при нульовій швидкості зсуву (уявна в'язкість). В даній моделі робимо наступні припущення:

- вся система знаходиться в стаціонарному стані течії, а розплав нестисливий;
- потік розплаву заповнює всю порожнину, а сам розплав суцільний, тобто немає бульбашок;
- сила в'язкості набагато більша за сили інерції та гравітацію, тому силами інерції та гравітації знехтуємо.

Модель в'язкості описується законом Берда-Карро:

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \cdot (1 + (\lambda\gamma)^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (13)$$

де η_∞ – в'язкість при нескінченній швидкості зсуву, λ – час релаксації, γ – швидкість зсуву, n – індекс течії.

Процес змішування двофазної полімерної композиції проводився при застосування двох статичних змішувачів: базовий статичний змішувач типу Kenics та запропонований лопатевий статичний змішувач.

Згідно попередніх досліджень [1-6], найбільш оптимальний рівень змішування та продуктивності статичний змішувач типу Kenics (рис. 1) демонструє тоді, коли кут повороту гребня одного статичного елемента становить 120° , кожен наступний статичний елемент розташований з поворотом в 90° відносно попереднього і співвідношення між довжиною одного елемента та його зовнішнім діаметром дорівнює 1. Саме такі геометричні параметри використовувались в даній роботі для базового змішувача типу Kenics. Більш детальна інформація щодо геометрії статичного змішувача типу Kenics наведено в (табл. 1).

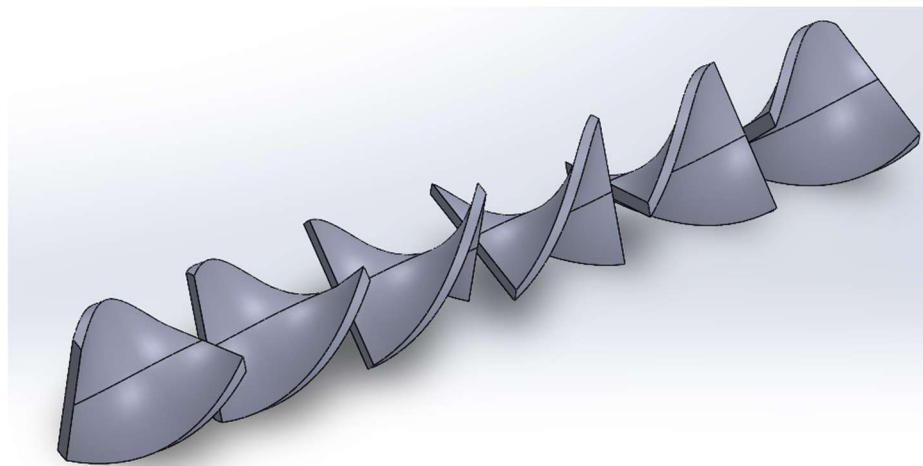


Рис. 1 – Геометрична модель статичного змішувача типу Kenics

Таблиця 1 – Геометричні параметри статичного змішувача типу Kenics

Параметр	Значення
Діаметр статичного змішувача	0,04 м
Діаметр каналу	0,04 м
Довжина одного змішувального елемента	0,04 м
Кут повороту одного статичного елемента	120°
Ширина леза статичного елемента	0,004 м
Кількість змішувальних елементів	6
Загальна довжина статичного змішувача	0,24 м
Загальна довжина каналу	0,32 м

Рух кожної із фаз полімерної композиції в базовому статичному змішувачі задавався через швидкість потоку матеріалу на вході в робочу зону каналу, яка є еквівалентом об'ємній продуктивності полімерного розплаву (рис. 2). Розрахунки проводились із застосуванням методу скінченних елементів в програмному середовищі ANSYS Fluent.

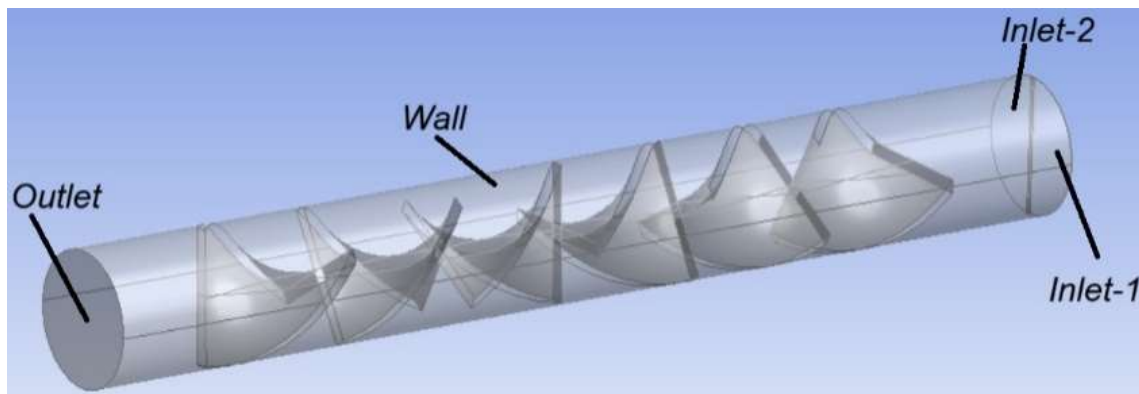


Рис. 2 – Схема задання граничних умов (Inlet-1 – вхідний переріз каналу для подачі першої фази полімерного розплаву; Inlet-2 – вхідний переріз каналу для подачі другої фази полімерного розплаву; Outlet – вихідний переріз; Wall – поверхня стінки каналу)

Моделювання процесу змішування полімерної композиції в статичному змішувачі типу Kenics проводилась за наступних значеннях об'ємної продуктивності: $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$. До уваги брались результати перепаду однорідності в різних поперечних перерізах по довжині каналу, починаючи з відстані 150 мм і закінчуючи на виході каналу. Після проведення моделювань, видно що результуючий перепад однорідності полімерної композиції при різних значеннях продуктивності змінюється незначно (рис. 3).

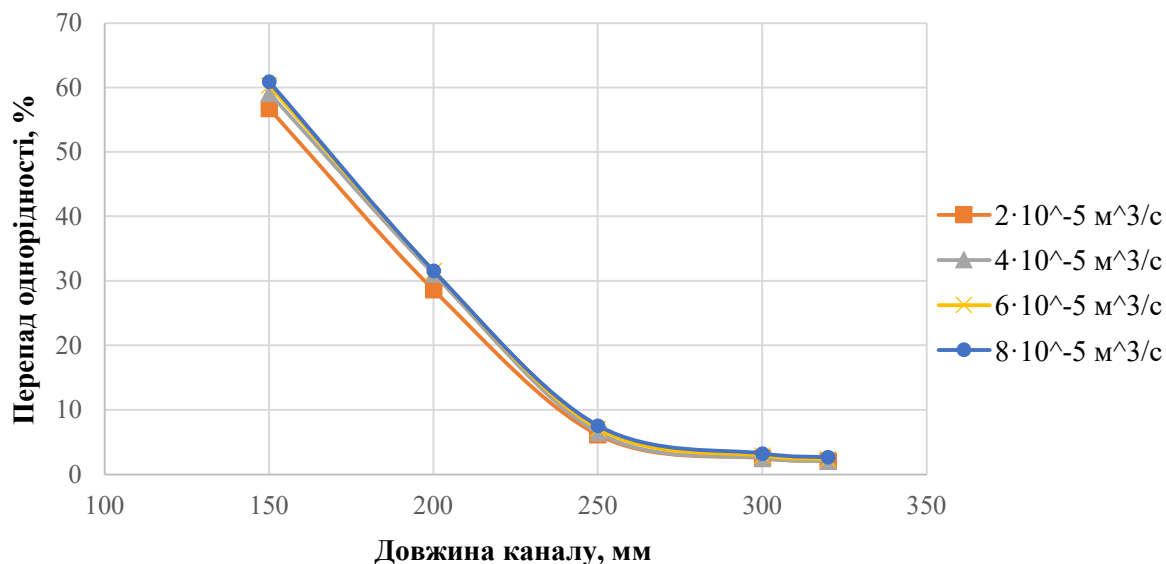


Рис. 3 – Графік перепаду однорідності полімерної композиції по довжині каналу при різних продуктивності

Значення перепаду однорідності при об'ємній продуктивності суміші $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ становить 2,08 %, а при продуктивності $8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ – 2,67 %. Тобто за кожного із вище зазначеного рівня продуктивності, радіальний розподіл (рис. 4) кожної із фаз полімерної композиції досяг гарного ступеня гомогенізації (рис. 5).

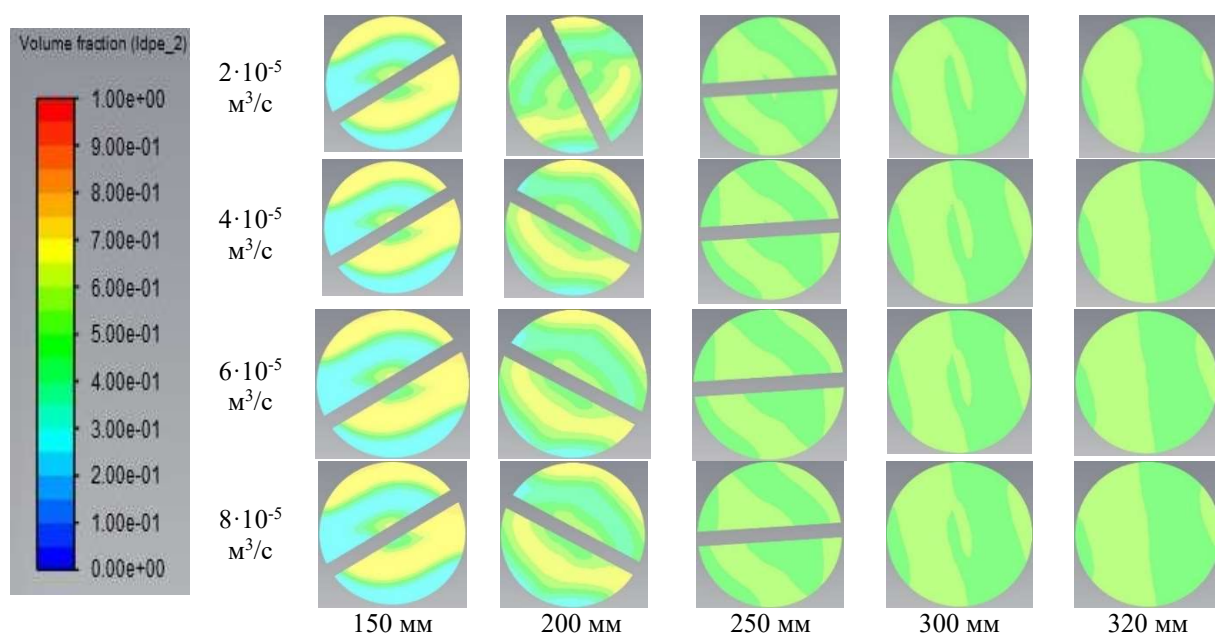


Рис. 4 – Кольорові муари розподілу однієї із фракцій полімерної композиції в поперечних перерізах по довжині каналу статичного змішувача типу Kenics при різних об'ємній продуктивності

Це свідчить про те, що осьова складова швидкості в досліджуваному діапазоні продуктивності несуттєво впливає на радіальну, а тому, вплив продуктивності на рівень радіального перемішування мінімальний.

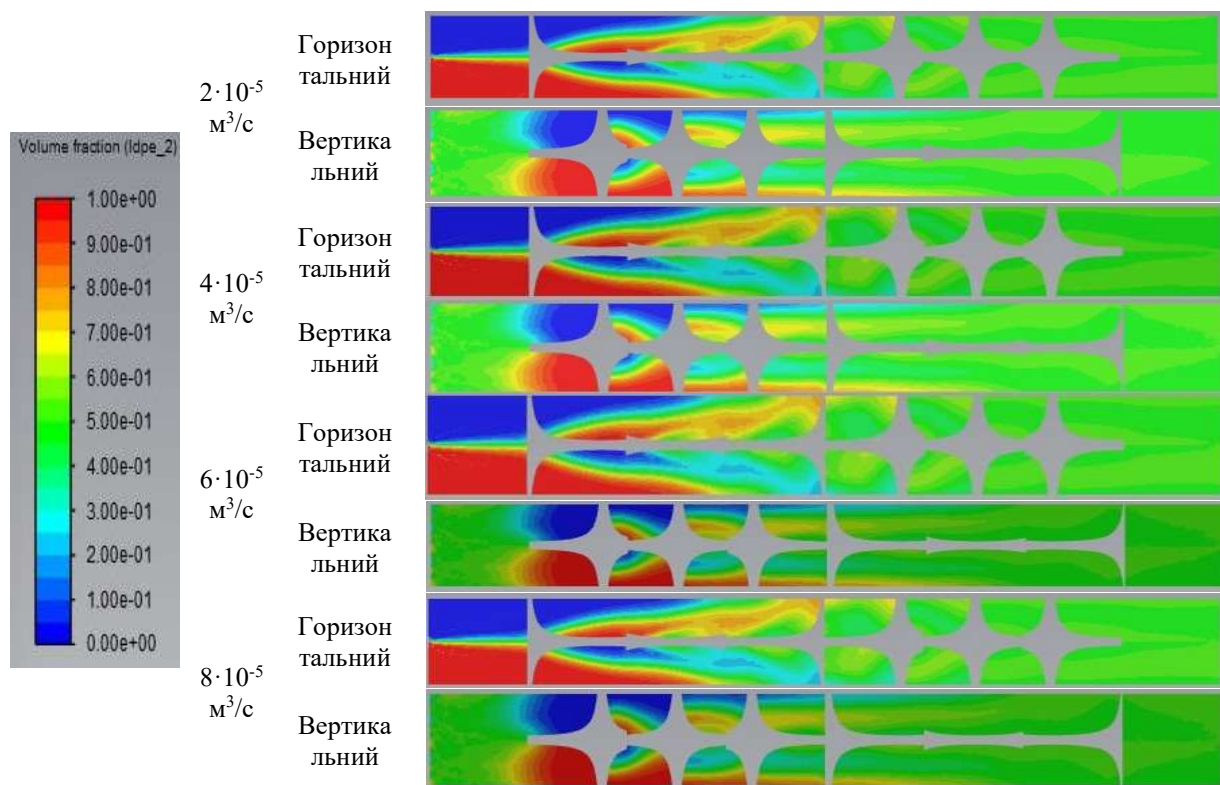


Рис. 5 – Кольорові муари розподілу однієї із фракцій полімерної композиції в повздовжніх перерізах по довжині каналу статичного змішувача типу Kenics при різних об'ємній продуктивності

Перепад тиску (рис. 6) по довжині каналу статичного змішувача типу Kenics при зменшенні значення об'ємної продуктивності демонструє ступінчасте зниження. Це зумовлено наявністю розсікання потоку полімерної композиції, а також втратою енергії потоку при проходженні через статичні змішувальні елементи. Чим більша об'ємна продуктивність, тим інтенсивніше відбувається падіння тиску.

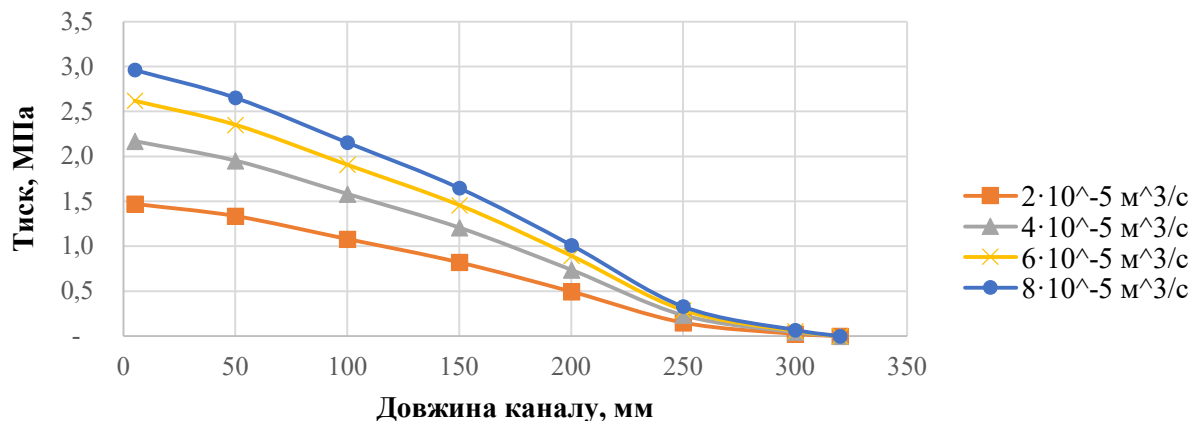
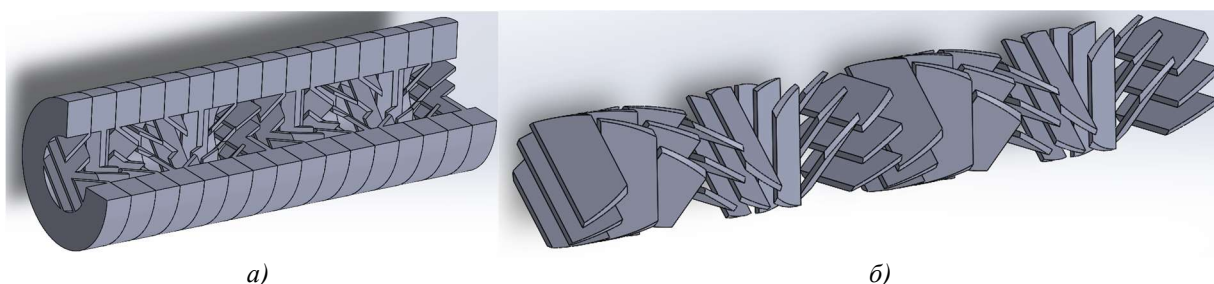


Рис. 6 – Графік залежності перепаду тиску по довжині каналу при різних продуктивності

Також було проведено моделювання із використанням розробленої конструкції лопатевого статичного змішувача (рис. 7). Оскільки це новий статичний змішувач, серед параметрів, які розглядалися як змінні під час моделювання, окрім об'ємної продуктивності також були довжина одного змішувального елемента, а також при різних кутах повороту конструктивних елементів. Це було зроблено з метою більш глибокого дослідження впливу геометричних параметрів статичного змішувача на рівень перемішування полімерної композиції в робочому каналі.



**Рис. 7 – Геометрична модель запропонованого лопатевого статичного змішувача:
а – вигляд в розрізі ззовні; б – змішувальні елементи**

Більш детальна інформація щодо запропонованого лопатевого статичного змішувача наведено в (табл. 2).

Таблиця 2 – Геометричні параметри лопатевого статичного змішувача

Параметр	Значення
Внутрішній діаметр змішувального елемента	0,04 м
Діаметр каналу	0,04 м
Довжина одного змішувального елемента	0,015 м
Кут нахилу ламелей одного статичного елемента	30°
Ширина леза статичного елемента	0,002 м
Кількість змішувальних елементів	16
Загальна довжина статичного змішувача	0,24 м
Загальна довжина каналу	0,32 м

Граничні умови для даного змішувача (рис. 8) були такими самими як і для статичного змішувача типу Kenics.

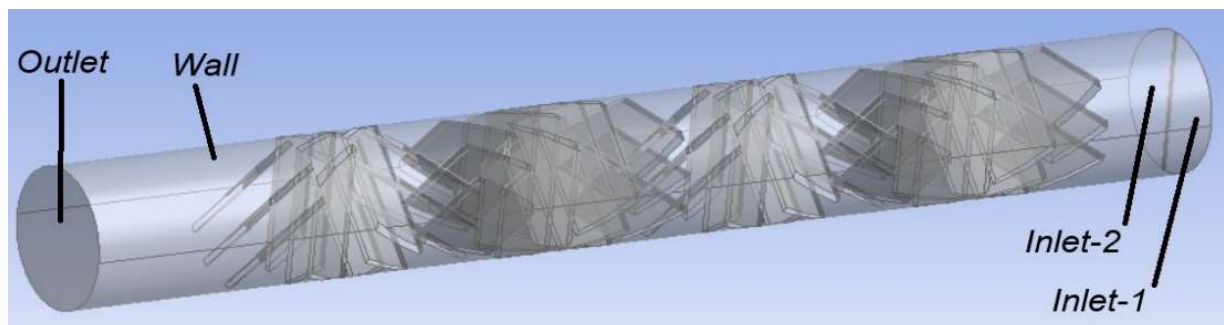


Рис. 8 – Схема задання граничних умов лопатевого статичного змішувача (Inlet-1 – вхідний переріз каналу для подачі першої фази полімерного розплаву; Inlet-2 – вхідний переріз каналу для подачі другої фази полімерного розплаву; Outlet – вихідний переріз; Wall – поверхня стінки каналу)

Під час моделювання потоку полімерної композиції у каналі лопатевого статичного змішувача, було проведено розрахунки при різних геометричних параметрах змішувача та змішувальних елементів, а саме: при різних товщині статичного змішувального елемента (10 мм; 15 мм та 20 мм), а також при різному куті повороту статичних змішувачів відносно один одного (45° та 90°). З отриманих результатів видно, що геометрія лопатевого змішувача дуже суттєво впливає на однорідність вихідної полімерної композиції (рис.9). Найгірший рівень гомогенізації було отримано коли кут повороту змішувальних елементів становив 90°, а товщина елемента – 10 мм, за даних геометричних параметрах змішування двох фаз полімерної композиції на протязі всієї довжини каналу було не суттєвим. Загалом, при даному куті повороту змішувальних елементів результати гомогенізації композиції були незадовільні.

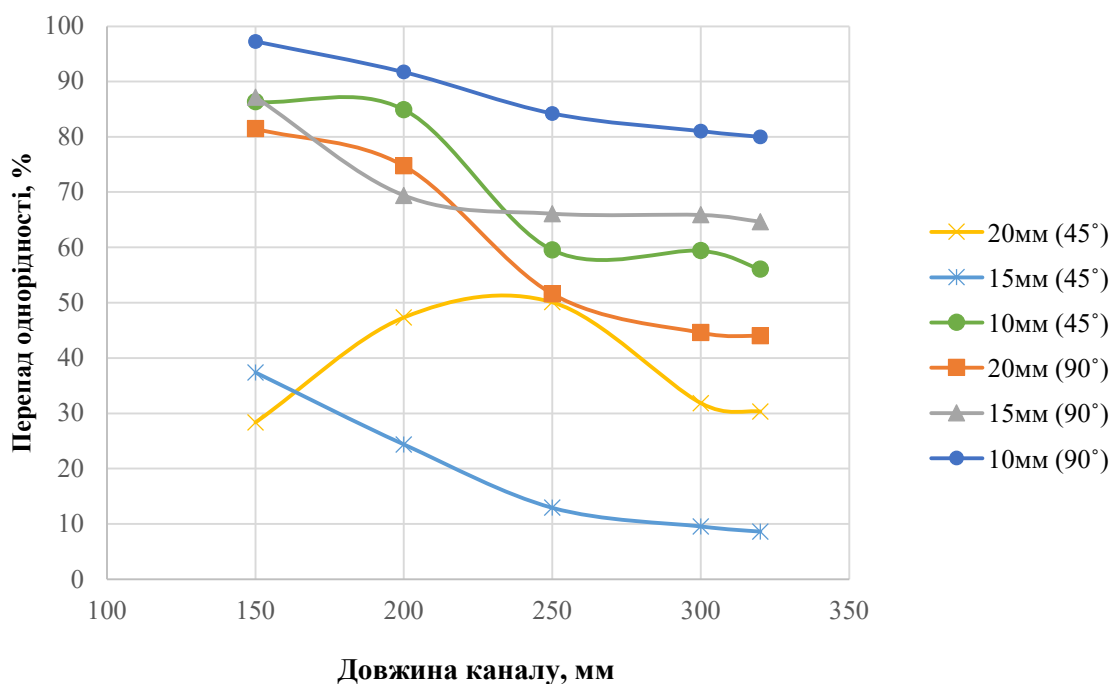


Рис. 9 – Графік перепаду однорідності полімерної композиції по довжині каналу лопатевого змішувача при різних товщині змішувального елемента та при різному куті повороту статичних елементів

Змішувач із товщиною змішувальних елементів 20 мм та кутом повороту 45° демонстрував дуже хаотичні результати по всій довжині каналу (рис. 10). Це дуже ускладнило процес оцінки однорідності вихідної композиції, яка складала приблизно 30 %, що є незадовільним результатом, особливо в порівнянні зі змішувачем типу Kenics.

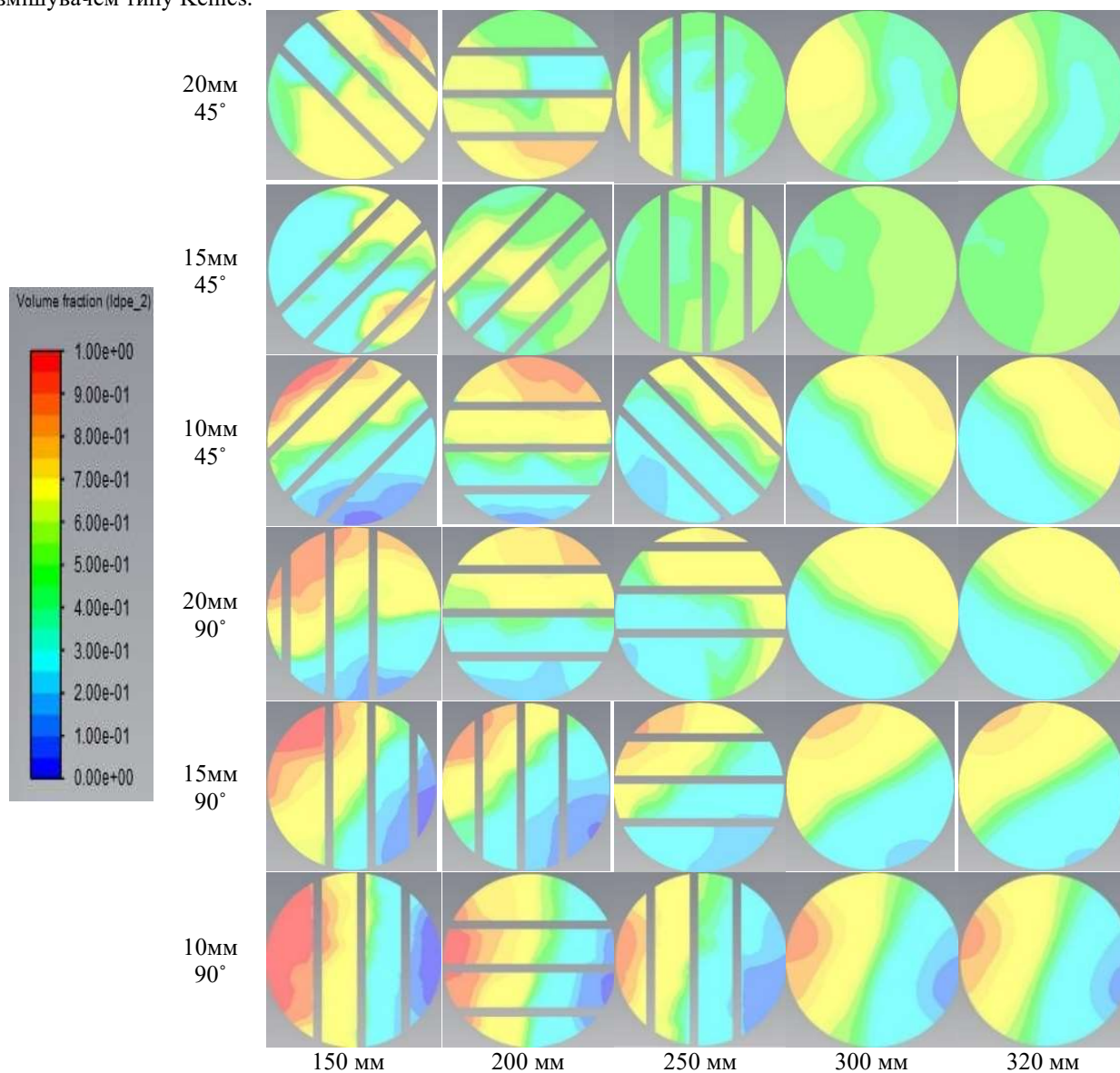


Рис. 10 – Кольорові муари розподілу однієї із фракцій полімерної композиції в поперечних перерізах по довжині каналу лопатевого статичного змішувача при різних об'ємній продуктивності

Найкращі результати, щодо якості перемішування, показав лопатевий статичний змішувач при товщині статичного елемента 15 мм і кутом повороту між елементами 45° (рис. 11), а саме 8,6 %.

Результати перепаду тиску по довжині каналу лопатевого статичного змішувача, що наведені на (рис. 12), демонструють ступінчасте зниження тиску в будь-якому випадку, причому пікове значення тиску на вході в канал зменшує своє значення в залежності від геометрії, а саме: максимальне значення тиску на вході спостерігається при товщині елемента 20 мм з поворотом в 45° один відносно одного, а мінімальне значення тиску – при товщині елемента 15 мм з поворотом в 90°. Це можна пояснити тим, що при куту повороту 45°, в місці з'єднання статичних елементів гідравлічний переріз для протікання розплаву полімерної композиції менший ніж в тому випадку, коли кут повороту між елементами становить 90°.

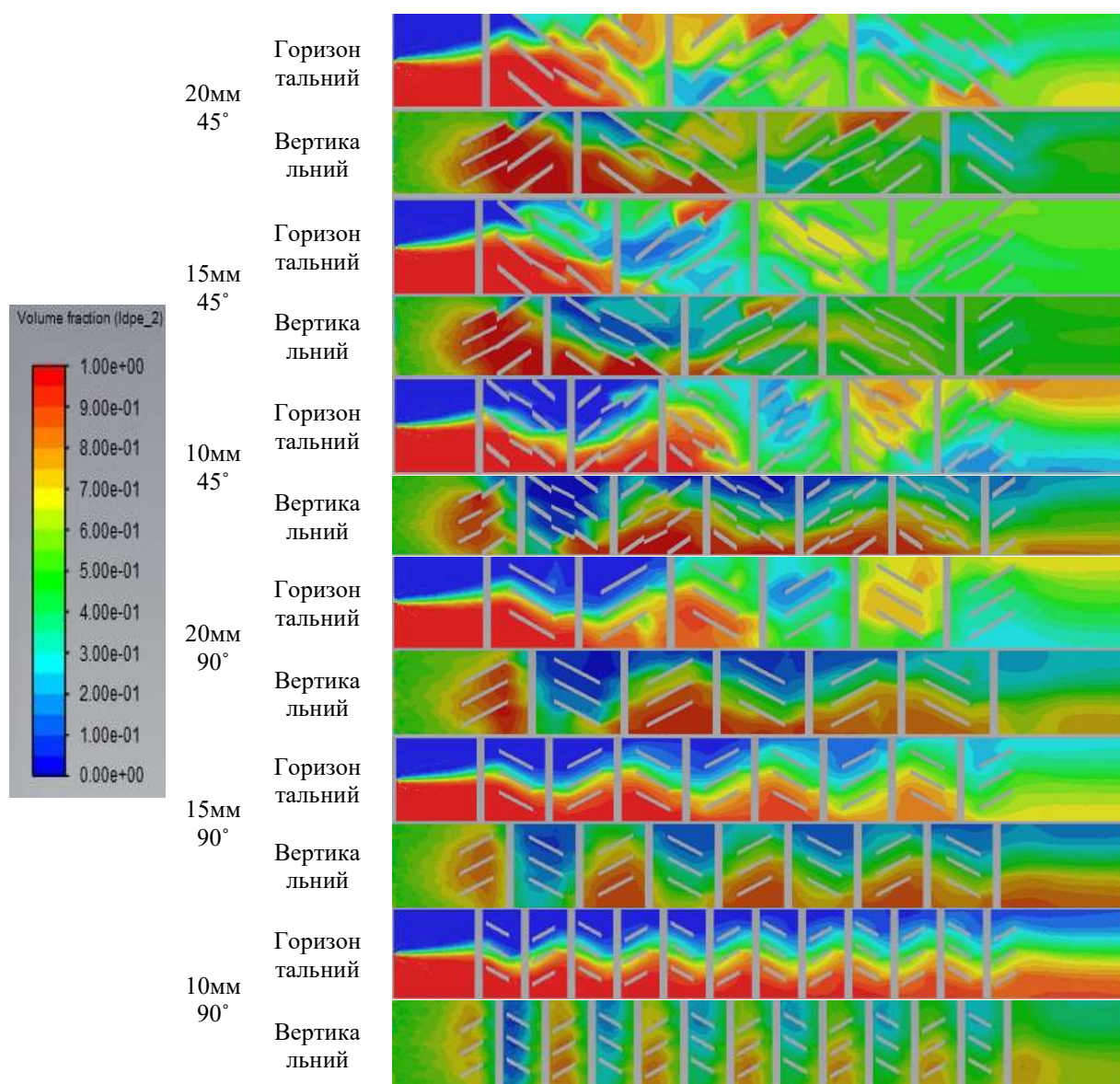


Рис. 11 – Кольорові муари розподілу однієї із фракцій полімерної композиції в повздовжніх перерізах по довжині каналу лопатевого статичного змішувача при різних об’ємній продуктивності

Із отриманих порівняльних результатів щодо якості перемішування полімерної композиції в лопатевому статичному змішувачі, найкращі результати показав статичний змішувач із товщиною елемента 15 мм та поворотом між елементами в 45°.

Після виявлення найбільш оптимальних геометричних параметрів лопатевого статичного змішувача, було проведено моделювання із даним змішувачем при різних об’ємній продуктивності (рис. 13), аналогічну до тих, що проводились із застосуванням статичного змішувача типу Kenics.

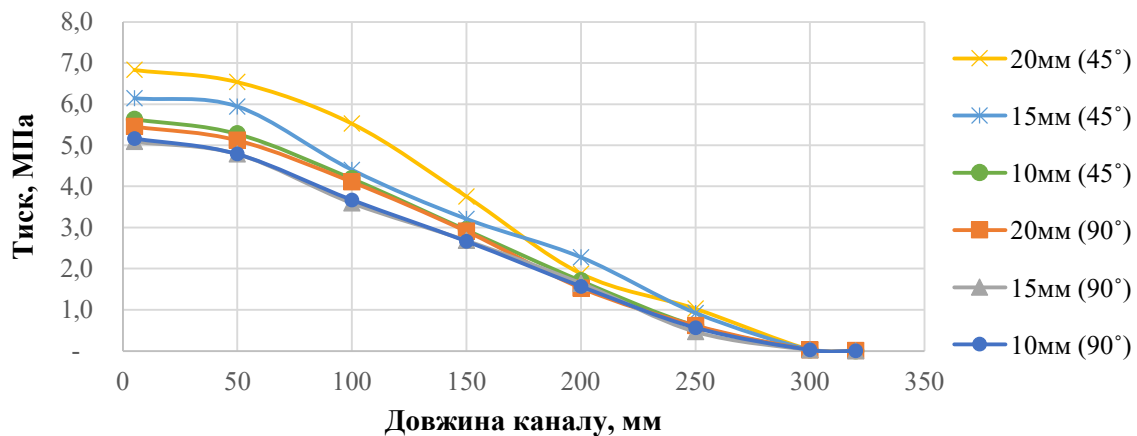


Рис. 12 – Графік залежності перепаду тиску по довжині каналу при різних геометричних параметрах

З отриманих результатів видно, що динаміка перемішування полімерної композиції та перепад тиску при різних об'ємній продуктивності в лопатевому статичному змішувачі, дуже подібні результатам із застосуванням змішувача типу Kenics, тобто результуюча однорідність композиції при різних об'ємній продуктивності змінюється дуже не суттєво, а тиск демонструє ступінчасто зниження по довжині каналу.

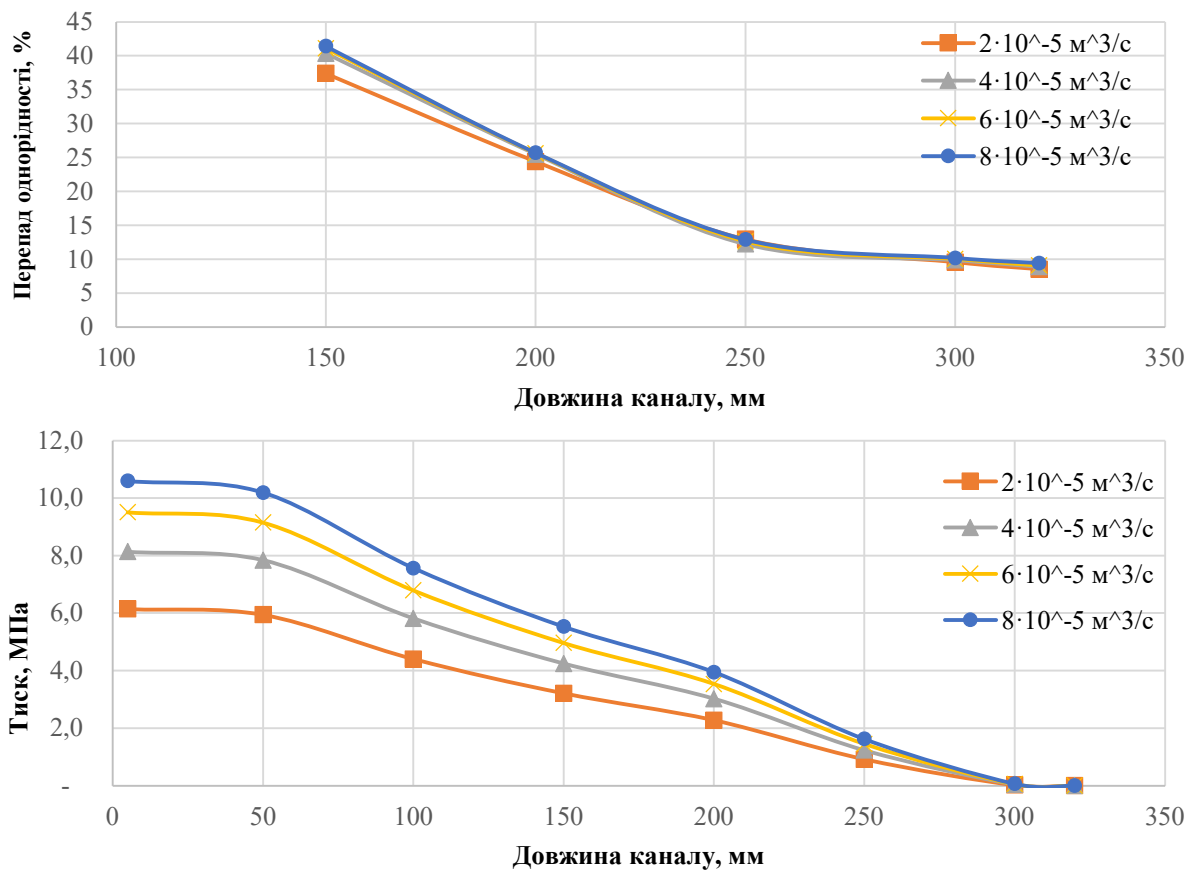


Рис. 13 – Графіки залежності перепаду однорідності полімерної композиції та тиску по довжині каналу лопатевого статичного змішувача при різних об'ємній продуктивності

Представимо порівняльні результати моделювань базового статичного змішувача типу Kenics та лопатевого статичного змішувача (рис. 14).

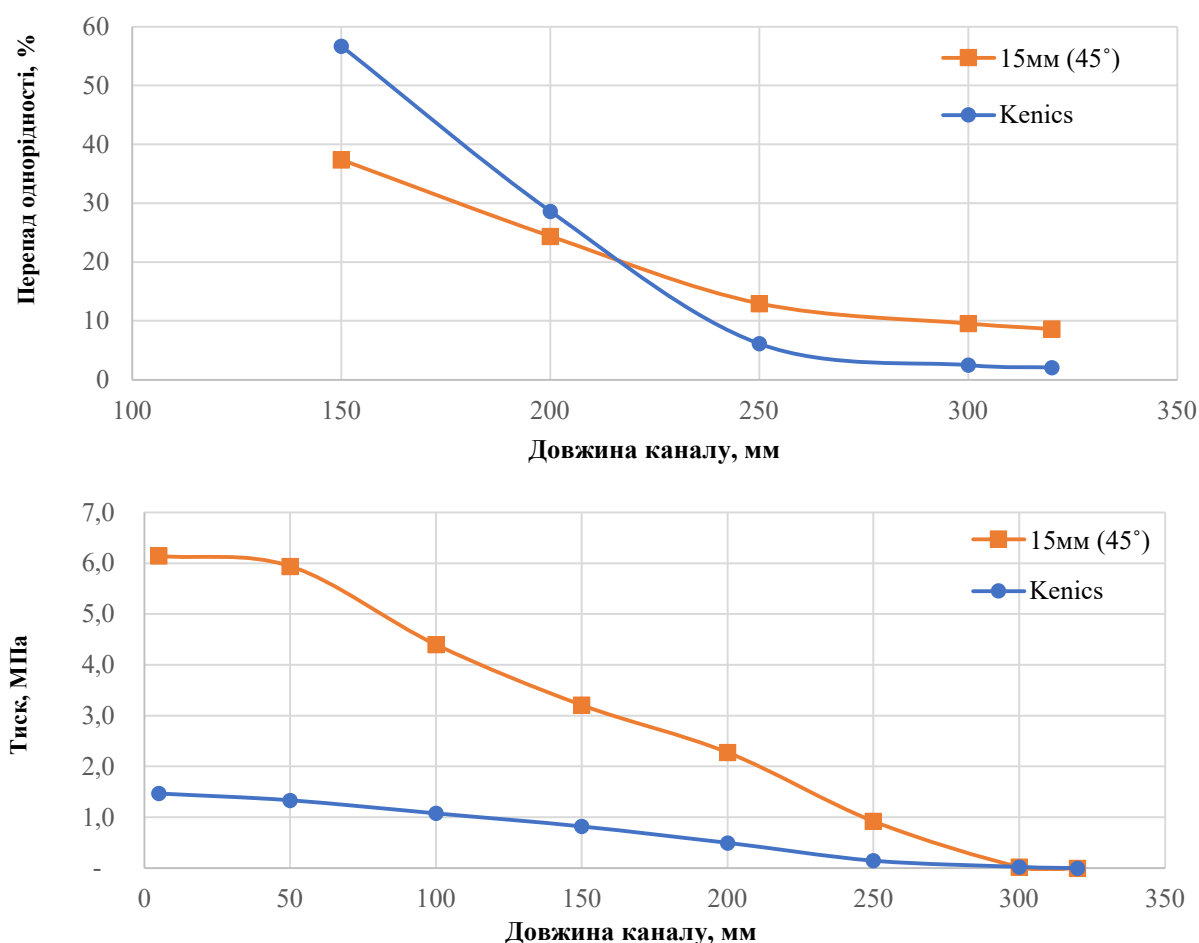


Рис. 14 – Порівняльний графік перепаду однорідності композиції та тиску по довжині каналу лопатевого змішувача та змішувача типу Kenics

Отже, із застосуванням запропонованого лопатевого статичного змішувача, перепад однорідності на виході з каналу становить 8,64 %, в той час як із застосуванням існуючого статичного змішувача типу Kenics, даний показник досягається при меншій довжині каналу (≈ 240 мм), а на виході з каналу перепад однорідності становить 2,08 %.

Висновки. Підбиваючи результати моделювання процесу перемішування двофазної полімерної композиції при різній об'ємній продуктивності потоку матеріалу із застосуванням статичних змішувачів, було визначено, що перепад однорідності полімерної композиції на виході з каналу був майже однаковий в досліджуваному діапазоні продуктивностей, при застосуванні будь-якого статичного змішувача. Тобто об'ємна продуктивність потоку матеріалу особливо не впливає на кінцевий рівень гомогенізації полімерної композиції.

Найкращий рівень гомогенізації, який було досягнуто із застосуванням змішувача типу Kenics, становить 2,08 %. Під час моделювання процесу перемішування із використанням запропонованої конструкції лопатевого статичного змішувача, найкращий рівень однорідності який було досягнуто становить 8,6 %.

Незважаючи на те, що базовий змішувач типу Kenics при простоті своєї геометрії характеризується дуже високим(2,08 %) показником однорідності на виході з каналу з досить невеликим перепадом тиску,

запропонований в даній роботі лопатевий статичний змішувач також має гарні перспективи на майбутнє, оскільки характеризується наступними перевагами: забезпечує нормальний рівень гомогенізації, що становить 8,6 %; складається зі змішувальних «кілець», кількість яких можна коригувати в залежності від вимог щодо кінцевого продукту; геометрію змішувальних елементів можна модернізувати і комбінувати.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому буде доцільно розглянути більше комбінацій геометрії лопатевого змішувача для реальних експериментів з промисловими полімерними композиціями.

Список використаної літератури

1. Static mixing device : pat. US4538920A USA / G. E. Drake; заявл. 03.03.1983; опубл. 03.09.1985. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/023873166/publication/US4538920A?q=US4538920A>
2. ZHU Xin, L Wangyang, WANG Gangqiang. Numerical simulation of mixing performance of dispersed phase in a static mixer[J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31(2): 63-. URL: <http://journal.zjtextile.com.cn/EN/abstract/abstract1321.shtml>
3. Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (Eds.). (2004). Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. Wiley-Interscience. URL: <https://www.stxip.org/books/9.pdf>
4. Кушнір М.С., Сокольський О.Л., Борщик С.О., Соловей О.В. Порівняльне дослідження рівнянь стану для поліетилену марки 20806-010 // Збірник доповідей науково-практичної конференції студентів, аспірантів та науковців. К.: Січкап, 2011. – С. 94 – 96. URL: https://cpsm.kpi.ua/Doc/Konf_2011.pdf
5. Ouda M, Al-Ketan O, Sreedhar N, Hasan Ali MI, Abu Al-Rub RK, Hong S, Arafat HA, Novel static mixers based on triply periodic minimal surface (TPMS) architectures, Journal of Environmental Chemical Engineering (2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104289>
6. Дослідження процесу змішування модельних неньютонівських рідин / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, Н. М. Нікітенко, М. С. Кушнір, А. А. Лизогубенко // Машинобудування. – 2013. - №59. – С. 142-146. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e0194d27-f512-4d1e-bc48-e955b4d7a257/content>
7. Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (2008). Non-Newtonian Flow and Applied Rheology. Butterworth-Heinemann. URL: [https://fenix.isa.ulisboa.pt/downloadFile/563022967881571/Non-Newtonian%20flow%20and%20applied%20rheology%20\(%20PDFDrive%20\).pdf](https://fenix.isa.ulisboa.pt/downloadFile/563022967881571/Non-Newtonian%20flow%20and%20applied%20rheology%20(%20PDFDrive%20).pdf)
8. Villiermaux, J. (1996). Mixing in the Process Industries. CRC Press. URL: [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20INDUSTRIAL%20ENGINEERING/Process%20Engineering%20and%20Industrial%20Management%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20INDUSTRIAL%20ENGINEERING/Process%20Engineering%20and%20Industrial%20Management%20(z-lib.org).pdf)
9. ANSYS FLUENT 12.0 : Theory Guide. Canonsburg : ANSYS, Inc., – 2009. – 816 с. URL: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm
10. Мікульонюк І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія. – Київ : ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. – 265 с. URL: https://cpsm.kpi.ua/Doc/Mono_MIO-2009.pdf
11. Han E.H. Meijer, Mrityunjay K. Singh, Patrick D. Anderson, On the performance of static mixers: A quantitative comparison. Materials Technology, Eindhoven University of Technology, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.12.004>
12. M. Sc. Thesis, Water and Environmental Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Khalifa University of Science and Technology, United Arab Emirates, July 2019. URL: <https://khazna.ku.ac.ae/ws/portalfiles/portal/16940104/20241.pdf>
13. S. Bettermann, F. Kandelhard, H.U. Moritz, W. Pauer, Digital and lean development method for 3D-printed reactors based on CAD modeling and CFD simulation, Institute for Technical and Macromolecular Chemistry, University of Hamburg, Bundesstraße 45, Hamburg, 20146, Germany, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.09.024>
14. Chang Dae Han, Young Woo Kim, Department of Chemical Engineering, Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, New York 11201, and S. J. Chen, Kenics Corporation, Danvers, Massachusetts 01923, The effect of mixing on the modes of dispersion and rheological properties of two-phase polymer blends in extrusion, October 1975. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.1975.070191019>

Volodymyr Sivetskyi, Oleksiy Malchevskyi

NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS OF MIXING A POLYMER COMPOSITION IN A STATIC MIXER CHANNEL

The work includes numerical modeling of the process of mixing a polymer composition in static mixers of various designs, namely in a classic Kenics mixer and in a new proposed modification of a blade static mixer. The relevance of the topic is due to the growing need for high-quality polymer products, for which a uniform distribution of the dispersed phase is of decisive importance in the formation of the final physical and mechanical characteristics of the material. The purpose of the study was to determine the efficiency of a new design of a static mixer, analyze the influence of its geometric and technological parameters on the dynamics of polymer composition flows and the level of homogenization in comparison with the basic Kenics design.

The work has applied numerical modeling of the process of mixing a two-phase polymer composition (in a ratio of 50/50) under isothermal laminar flow conditions. To describe the rheological properties of the polymer melt, the Bird-Carrot viscosity model was used, which most adequately reflects the non-Newtonian behavior of polymers. The system of equations, including the equations of momentum, energy, continuity and volume fraction of the secondary phase, was implemented in the ANSYS Fluent software environment using the finite element method.

The basic object of comparison was a Kenics static mixer with traditional geometric parameters (element rotation angle 120°, arrangement of adjacent elements at an angle of 90°). The influence of different values of the volumetric flow rate ($2 \cdot 10^{-5} - 8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) on the level of homogeneity and pressure drop was investigated. The results showed that the flow rate only slightly affects the final level of homogenization, and the resulting homogeneity drop was within 2.08–2.67 %.

For the blade static mixer, various geometry configurations were considered: the thickness of the elements (10, 15 and 20 mm) and the angles of their mutual rotation (45° and 90°). It was found that the geometry of the structure has a decisive influence on the quality of mixing. The worst results were obtained when the elements were rotated by 90° regardless of the thickness, while the best level of homogenization (8.6%) was recorded for the variant with a thickness of 15 mm and a rotation angle of 45°. Although these results are inferior to the basic Kenics mixer, they confirmed the promising design, which, thanks to its modular structure, allows you to vary the number and configuration of elements, adapting the device to specific technological tasks. A comparative analysis of the pressure drop showed similar patterns in the two types of mixers - for both, a stepwise decrease in pressure along the channel is observed. However, the peak pressure values in the blade mixer significantly depended on the geometric parameters of the elements, which opens up opportunities for optimizing the design for specific requirements.

In general, the study demonstrated that the classic Kenics mixer provides a significantly higher quality of homogenization of polymer compositions. At the same time, the new blade mixer has the potential for further modernization and application, given its flexibility in geometric variations and the possibility of improvement. The prospects for future work are to expand the range of geometries studied and conduct experimental tests on industrial samples of polymer materials.

Keywords: extrusion, mixing, static mixer, polymer composition, modeling

References

1. Static mixing device : pat. US4538920A USA / G. E. Drake; applic. 03.03.1983; public. 03.09.1985. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/023873166/publication/US4538920A?q=US4538920A>
2. ZHU Xin, L Wangyang, WANG Gangqiang. Numerical simulation of mixing performance of dispersed phase in a static mixer[J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31(2): 63-. URL: <http://journal.zjtextile.com.cn/EN/abstract/abstract1321.shtml>

3. Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (Eds.). (2004). Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. Wiley-Interscience. URL: <https://www.stxip.org/books/9.pdf>
4. Kushnir M.S., Sokolsky O.L., Borshchuk S.O., Solovey O.V. (2011) Porivnyalne doslidzhennya rivnyan' stanu dlya polietylenu marky 20806-010 [Comparative study of equations of state for polyethylene grade 20806-010]. *Collection of reports of the scientific and practical conference of students, postgraduates and scientists. K.: Sichkar*, pp. 94–96. URL: https://cpsm.kpi.ua/Doc/Konf_2011.pdf
5. Ouda M, Al-Ketan O, Sreedhar N, Hasan Ali MI, Abu Al-Rub RK, Hong S, Arafat HA, Novel static mixers based on triply periodic minimal surface (TPMS) architectures, *Journal of Environmental Chemical Engineering* (2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104289>
6. Sakharov O. S., Sivetskyi V. I., Sokolskyi O.L., Nikitenko N. M., Kushnir M. S., Lyzogubenko A. A. (2013). Doslidzhennya protsesu zmishuvannya modelnykh nenyutonivskykh ridyn [Study of the mixing process of model non-Newtonian fluids]. *Machine building*, No. 59. – pp. 142-146. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e0194d27-f512-4d1e-bc48-e955b4d7a257/content>
7. Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (2008). Non-Newtonian Flow and Applied Rheology. Butterworth-Heinemann. URL: [https://fenix.isa.ulisboa.pt/downloadFile/563022967881571/Non-Newtonian%20flow%20and%20applied%20rheology%20\(%20PDFDrive%20\).pdf](https://fenix.isa.ulisboa.pt/downloadFile/563022967881571/Non-Newtonian%20flow%20and%20applied%20rheology%20(%20PDFDrive%20).pdf)
8. Villiermaux, J. (1996). Mixing in the Process Industries. CRC Press. URL: [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20INDUSTRIAL%20ENGINEERING/Process%20Engineering%20and%20Industrial%20Management%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20INDUSTRIAL%20ENGINEERING/Process%20Engineering%20and%20Industrial%20Management%20(z-lib.org).pdf)
9. ANSYS FLUENT 12.0 : Theory Guide. Canonsburg : ANSYS, Inc., – 2009. – 816 p. URL: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm
10. Mikulyonok I. O. (2009). Obladnannya i protsesy pererobky termoplastychnykh materialiv z vykorystannyam vtorynnoyi syrovyny [Equipment and processes of processing thermoplastic materials using secondary raw materials]. *Publishing House “Polytehnika”*: monograph. – Kyiv: IVC, 265 p. URL: https://cpsm.kpi.ua/Doc/Mono_MIO-2009.pdf
11. Han E.H. Meijer, Mrityunjay K. Singh, Patrick D. Anderson, On the performance of static mixers: A quantitative comparison. *Materials Technology*, Eindhoven University of Technology, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.12.004>
12. M. Sc. Thesis, Water and Environmental Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Khalifa University of Science and Technology, United Arab Emirates, July 2019. URL: <https://khazna.ku.ac.ae/ws/portalfiles/portal/16940104/20241.pdf>
13. S. Bettermann, F. Kandelhard, H.U. Moritz, W. Pauer, Digital and lean development method for 3D-printed reactors based on CAD modeling and CFD simulation, *Institute for Technical and Macromolecular Chemistry, University of Hamburg, Bundesstraße 45, Hamburg, 20146, Germany, 2019.* URL: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.09.024>
14. Chang Dae Han, Young Woo Kim, Department of Chemical Engineering, Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, New York 11201, and S. J. Chen, Kenics Corporation, Danvers, Massachusetts 01923, The effect of mixing on the modes of dispersion and rheological properties of two-phase polymer blends in extrusion, October 1975. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.1975.070191019>