

ПАСИВНИЙ Т-МІКРОМІКСЕР З БАР'ЄРАМИ ДЛЯ ЛАМІНАРНОГО ПОТОКУ

© Матвійків О., Дмитришин Б., 2012

Змішування в пасивних мікроміксерах залежить від їх геометрії. Отже, багато пасивних мікроміксерів ефективні тільки при великих числах Рейнольдса і вимагають складної структури каналів. Наведено можливості вдосконалення структури Т-мікроміксера для змішування двох рідин з введенням бар'єрів у мікроканалі. У дослідженні ми змінюємо 3 параметри: висоту бар'єра, зсув бар'єра від центру каналу та форму бар'єра. Модель демонструє високу ефективність змішування навіть при малих числах Рейнольдса $Re = 0,1$. Модифікований Т-мікроміксер можна легко інтегрувати в різноманітні лабораторії на чипах (ЛНЧ) або мікросистеми повного аналізу (МПА).

Ключові слова: мікропотоки, лабораторія на чипі, мікросистеми повного аналізу, числа Рейнольдса, змішування, Т-мікроміксер, ламінарний потік.

Mixing in the passive micromixers depends on their geometry. Thus many passive micromixers are effective only at high Reynolds numbers and require a complex structure of channels. The article presents the possibility of improving the structure of T-micromixer for mixing two fluids with barriers. In our investigation we change 3 parameters: barrier height, barrier offset from the centre of the channel and barrier shape. The model shows high efficiency of mixing even at low Reynolds numbers $Re = 0,1$. Modified T-micromixer can be easily integrated into various labs-on-chip (LOC) or micro-total-analysis systems (μ TAS).

Key words: Microfluidics, lab-on-chip (LOC), micro-total-analysis systems (μ TAS), Reynolds number, mixing, T-shape micromixer, laminar flow.

Вступ

За допомогою мікрорідинних пристроїв можна виконувати безліч операцій, таких як [1]:

- Передпідготовка зразків;
- Підготовка зразків;
- Змішування;
- Прокачування рідини (помпування);
- Аналіз;
- Секвенування ДНК;
- Виокремлення і виявлення клітин.

Змішування відіграє одну з найбільш важливих ролей в реалізації лабораторій-на-чипі (ЛНЧ) або мікросистем повного аналізу (МПА), тому що мікрорідинна обробка та операції, які здійснюються в цих чипах, вимагають швидкого перемішування реагентів і зразків. Швидке змішування двох або більше компонентів або аналітів важливо для багатьох мікрорідинних систем, що використовуються в біохімічному аналізі або аналізі ДНК або в мікрореакторах зі складним хімічним синтезом. Перемішування в мікромасштабі – дуже складний процес, тому що це відбувається за рахунок дифузії, яка є дуже повільним процесом в мікромасштабі (масовий коефіцієнт дифузії ($D \sim 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$). У більшості мікрорідинних пристроїв потік ламінарний з дуже

низьким числом Рейнольдса і дифузія домінує в процесі змішування. Для потоку в мікроканалі число Рейнольдса, як правило, визначається як [2]:

$$\text{Re} = \frac{uD_h}{\nu}, \quad (1)$$

де D_h – гідравлічний діаметр мікроканалу (с), u – середня швидкість об'єкта відносно рідини (м/с), ν – кінематична в'язкість (м²/с). Ламінарний потік виникає при малих числах Рейнольдса, коли сили в'язкості переважають сили інерції і характеризується сталістю розподілу швидкостей рідини. Турбулентний потік виникає при великих числах Рейнольдса, коли переважають сили інерції – він зазвичай викликається хаотичними вихорами та іншими нестабільностями потоку. Цілковите й повне перемішування рідини при малих числах Рейнольдса займає дуже багато часу і вимагає великої довжини мікроканалу. Наприклад, Т-подібний мікроміксер потребує для повного змішування довжини мікроканалу в десятки сантиметрів. Це робить його дуже непрактичним для використання в мікрорідинних лабораторіях на чипі або мікросистем повного аналізу. Оскільки в пасивних мікроміксерах не застосовують жодних зовнішніх сил і перемішування відбувається лише шляхом дифузії, єдиним рішенням є зміна геометрії мікроканалів так, щоб змішування відбувалось швидше на коротшій відстані.

Геометрія мікроміксера

Проектування і моделювання Т-мікроміксера було зроблено в COMSOL Multiphysics. Структуру мікроміксера зображено на рис. 1.

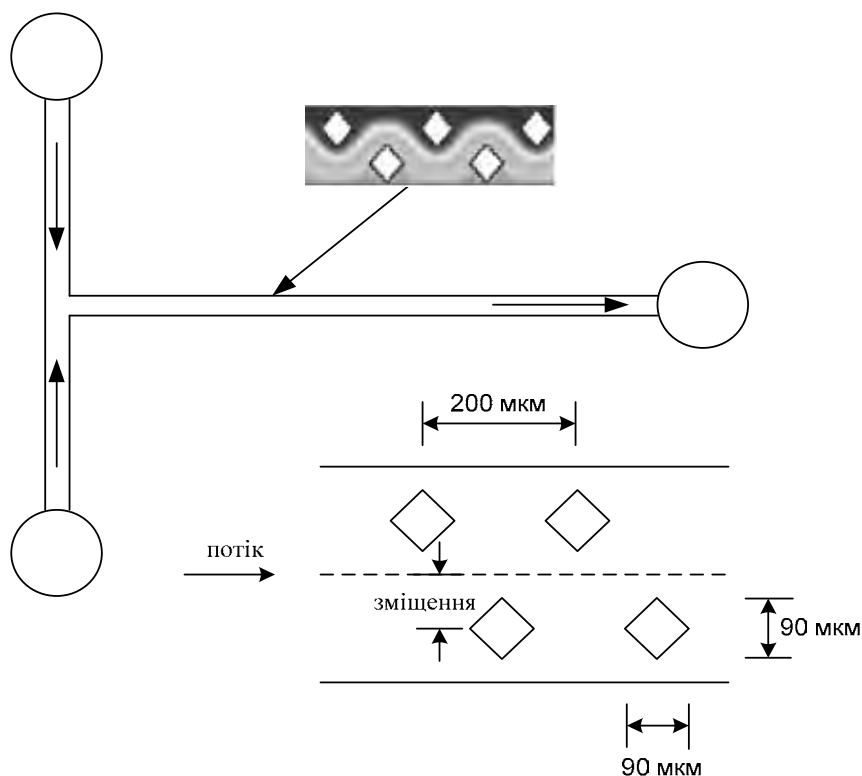


Рис. 1. Структура та розміри Т-мікроміксера з квадратними бар'єрами, поверненими під кутом 45°

Основна ідея цього дослідження полягає в оптимізації і покращенні параметрів змішування шляхом зміни геометрії мікроканалу завдяки введенню бар'єрів і зміни їх розміщення [3]. У нашому дослідженні ми змінюємо 3 параметри: висоту бар'єру, зсув бар'єру від центру мікроканалу та зміну форми бар'єру. Бар'єри у дослідженні квадратної форми розміром 90 x 90 мкм (Ш x Д), відстань між центрами вздовж каналу – 200 мкм, ширина мікроканалу 200 мкм, висота 50 мкм. Бар'єри мають 3 різні форми: квадратну, трикутну і круглу. Всі ці розміри наведено в табл. 1.

Довжина змодельованого мікроканалу становить 5 мм. Моделювання було зроблено для стаціонарної нестисливої течії, дві рідини мають фізичні властивості води з концентрацією частинок в рідині – перша 0, а друга 1, коефіцієнт дифузії $D \sim 10^{-10} \text{ м}^2 / \text{с}$. Швидкість $V \sim 0,1-1000 \text{ мм} / \text{с}$. Змішування припиняється, коли молярна інтенсивність дорівнює 0,5 для обох рідин. Також було здійснено поворот квадратних бар'єрів на кут у 45° , щоб запобігти утворенню мертвих об'ємів у мікроканалі (табл. 1).

Таблиця 1

Розміри і параметри Т-мікроміксерів з бар'єрами

Мікроканал	Розміри	
	Ширина	200 мкм
Висота	50 мкм	
Довжина	5 мм	
Бар'єри	Розміри	
	Ширина	90 мкм
Висота	0-50 мкм	
Довжина	90 мкм	
Зміщення	0-50 мкм	
Інтервал	200 мкм	
Бар'єри	Форма	
	Квадратна	◆
Трикутна	◄	
Кругла	●	

Результати моделювання модифікованого Т-мікроміксерів

Всі моделювання проводили при малих числах Рейнольдса $Re = 0,1$. Моделювання результатів для різних висот бар'єрів показано на рис. 2. Результати демонструють, що найкращого змішування – 48 % – було досягнуто, коли висота бар'єра в мікроканалі дорівнювала висоті мікроканалу (50 мкм), без бар'єрів ефективність змішування Т-подібного мікроміксерів становила лише 22 %.

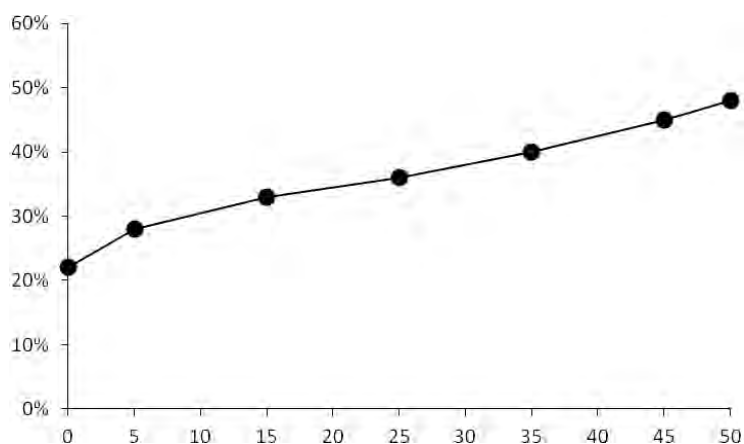


Рис. 2. Відсоток змішування для різних висот бар'єрів

Для дослідження впливу форми бар'єрів дослідження було проведено для 3-х типів геометрії: кругла, трикутна, квадратна (результати наведено в табл. 2). Кожна форма бар'єру має ті самі розміри 90 x 90 мкм і 50 мкм відступ від центральної осі каналу. В результаті дослідження круглі бар'єри продемонстрували найгірше змішування (42 %), трикутні бар'єри продемонстрували найкраще перемішування (51 %), краще, ніж квадратні бар'єри, повернуті під кутом 45° (49 %), але трикутні бар'єри утворюють мертві об'єми, а вони небажані для подальших досліджень.

Також було досліджено зміщення бар'єрів від центральної осі мікроканалу до його стінок за фіксованої висоти бар'єрів у 50 мкм і виявлено, що 20 мкм зсув від центральної осі дає 62 % змішування для 5 мм довжини мікроканалу і 40 мкм зсув дає тільки 39 % для 5 мм довжини мікроканалу, але перше зміщення дає тільки ~ 73 % змішування для 10 мм довжини мікроканалу, а друге дає ~ 79 % змішування для 10 мм довжини мікроканалу. Отримані результати наведено на рис. 3.

Ефективність змішування для 3 типів геометрії бар'єрів

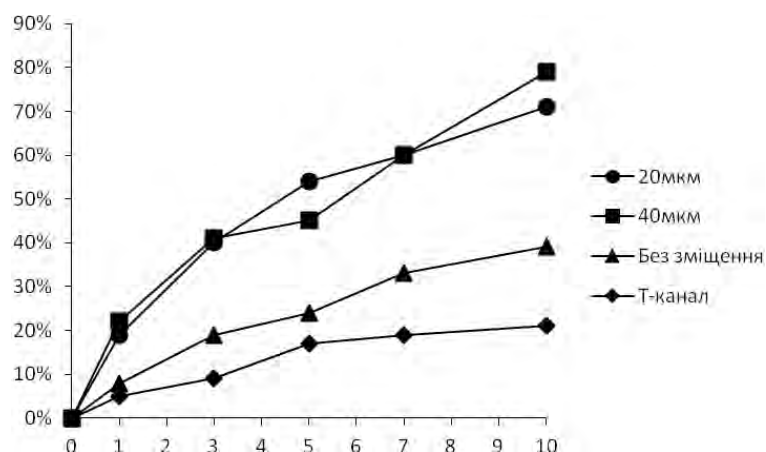
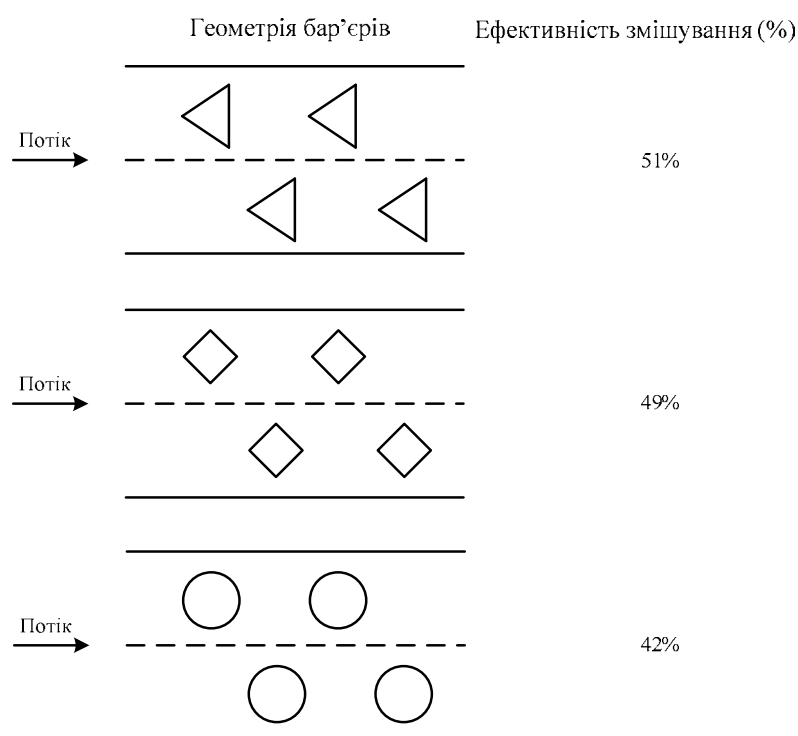


Рис. 3. Результати для різних зміщень бар'єрів від центральної осі мікроканалу

Висновки

Наведено модифікований Т-мікроміксер. Геометрію пасивного Т-мікроміксера було змінено завдяки інтеграції в структуру мікроканалу бар'єрів різної висоти, зміщених на різну величину від центру каналу та різних форм. Експериментально було встановлено, що оптимальних параметрів змішування було досягнуто, коли висота бар'єрів дорівнювала висоті мікроканалу (50 мкм), зі зміщенням бар'єрів від центру на 20–40 мкм і з квадратною формою бар'єрів, повернених під кутом 45°. Модифікація Т-мікроміксера забезпечує ефективне перемішування при малих числах Рейнольдса, і її надзвичайно легко реалізувати та інтегрувати в комплекс складніших мікропристроїв.

1. Berthier J., Silberzan P. *Microfluidics for biotechnology*. Artech House. – 2006. – P. 288–289.
2. Evans J.D., Liepmann D., Pisano A.P. *Planar Laminar Mixer, MEMS, Nagoya, Japan*. – 1997. – P. 96–101.
3. Melin J., Gimenez G. *A fast passive and planar liquid sample micromixer, Lab Chip* 4. – 2004. – P. 214.