

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛАХ

Лобасов А.С., Минаков А.В.

Научный руководитель – ст. преподаватель Минаков А.В.
Сибирский федеральный университет

Перемешивание микроскопических количеств жидкости имеет важное значение во многих приложениях: химические микрореакторы, анализаторы химических и биологических веществ и многие другие. Поскольку характерное значение числа Рейнольдса для микроканалов порядка 1, то скорость перемешивания в них определяется в основном молекулярной диффузией. А это очень медленный процесс, поэтому применяются различные способы улучшения смешения.

Одним из способов интенсификации смешения в микроканалах является применение различных вставок. В данной работе рассмотрено смешение в Т-образном микроканале с Г-образными вставками. Геометрия микроканала: толщина микроканала – 0,28 мм; ширина входов – 0,25 мм; длина довставочной зоны – 0,5 мм; длина зоны смешения – 2 мм; ширина зоны смешения, вставочной и довставочной зон – 0,1 мм; толщина вставки – 0,07 мм; длина каждой из сторон (направляющих) вставки – 0,3 мм; малый зазор между вставкой и стенкой – 0,05 мм; большой зазор между вставкой и стенкой – 0,15 мм; расстояние между соседними вставками – 0,1 мм.

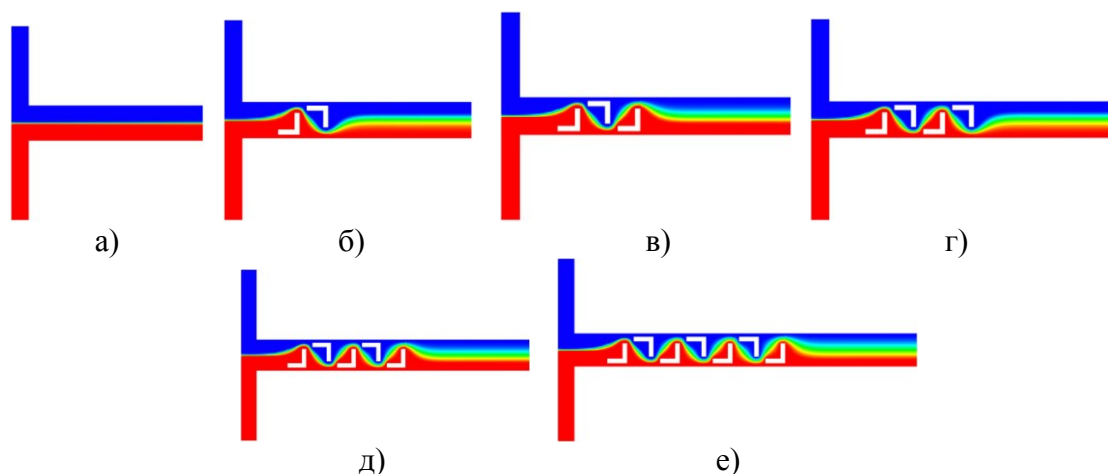


Рис. 1. Смешение двух жидкостей в Т-образном микроканале: а) без Г-образных вставок; б) с двумя Г-образными вставками; в) с тремя Г-образными вставками; г) с четырьмя Г-образными вставками; д) с пятью Г-образными вставками; е) с семью Г-образными вставками

Табл. 1. Результаты численного моделирования смешения двух жидкостей в Т-образном микроканале с различным количеством Г-образных вставок

Кол-во вставок	Перепад давления, Па	Смешение, %	Эффективность смешения, I_n/I_0	Усиление перепада давлений, p_n/p_0
0	8,905	4,264	1	1
2	22,057	20,922	4.907	2,477
3	29,869	22,811	5.350	3,354
4	37,686	24,816	5.820	4,232
5	45,503	26,693	6.260	5,110
7	61,136	30,876	7.241	6,865

В первой серии численных экспериментов фиксировались числа Рейнольдса и Пекле и варьировалось количество вставок. На рисунках 1а-1е показана качественная картина смешения жидкостей в канале без вставок, с двумя, тремя, четырьмя, пятью и семью вставками. Число Рейнольдса в данной серии расчетов равнялось 2, число Пекле – 5000. Количественные результаты расчётов представлены в таблице 1.

Во второй серии расчетов число вставок было фиксировано, а варьировались числа Рейнольдса и Пекле. В результате численного моделирования было установлено, что с увеличением числа Рейнольдса растёт как смешение, так и перепад давления, но от числа Пекле зависит только эффективность смешения, а перепад давлений остаётся постоянным.

На рисунках 2а-2е показано визуальное отображение смешения жидкостей в Т-образном микроканале с четырьмя и пятью вставками с различными числами Рейнольдса и Пекле.

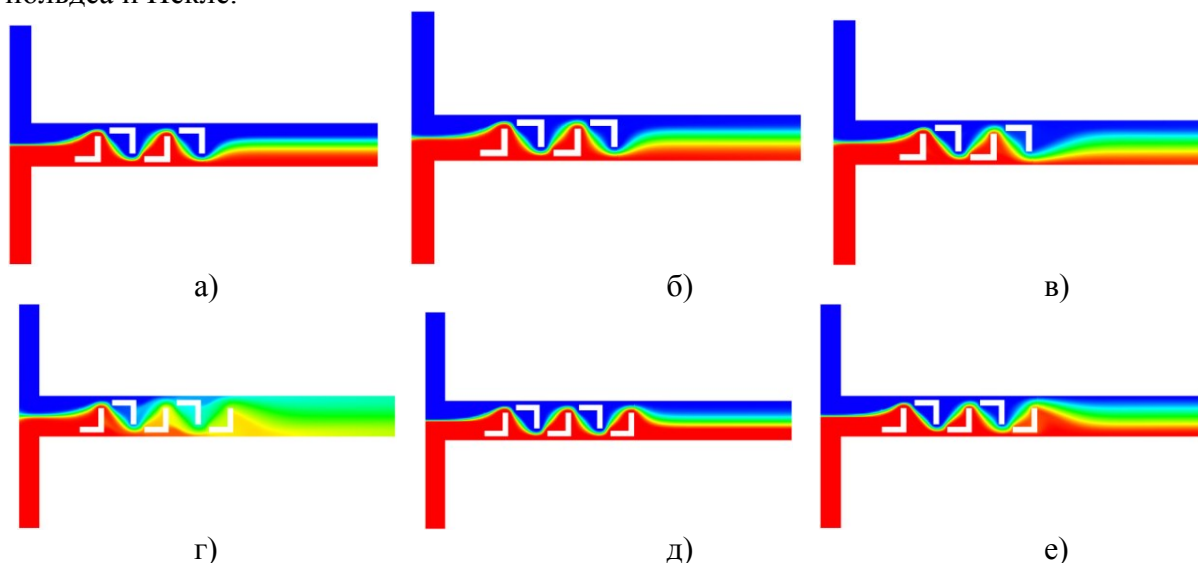


Рис. 2. Смешение двух жидкостей в Т-образном микроканале: а) с четырьмя Г-образными вставками, $Re = 0,5$ и $Pe = 5000$; б) с четырьмя Г-образными вставками, $Re = 2$ и $Pe = 500$; в) с четырьмя Г-образными вставками, $Re = 10$ и $Pe = 500$; г) с пятью Г-образными вставками, $Re = 10$ и $Pe = 100$; д) с пятью Г-образными вставками, $Re = 0,01$ и $Pe = 20000$; е) с пятью Г-образными вставками, $Re = 10$ и $Pe = 20000$;

Другой вариант интенсификации – это смешение жидкостей в микромиксере S-типа прямоугольного сечения.

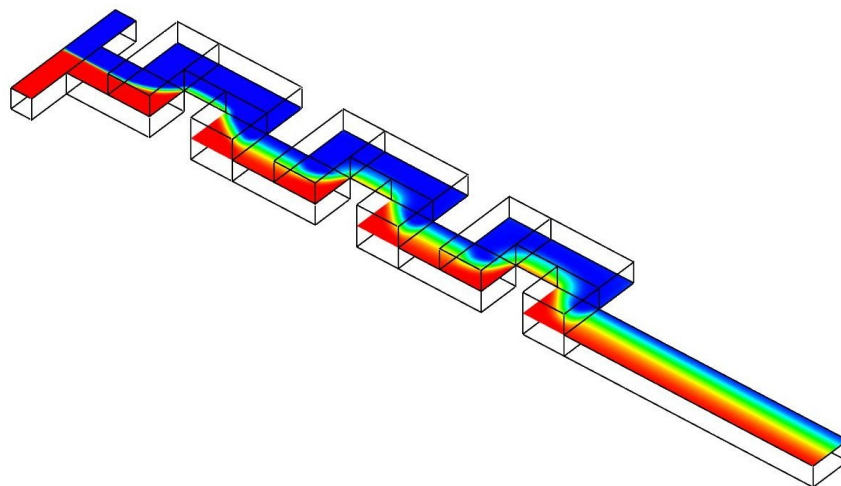


Рис. 3. Геометрия микромиксера S-типа прямоугольного сечения

Геометрия канала с тремя секциями и качественная картина смешения в данном канале показаны на рисунке 3. Расчётная сетка содержала около 150000 узлов. Число Рейнольдса задавалось равным 4, число Пекле – 5000.

Расчёты проводились для микромиксера S-типа с одной, двумя, тремя, четырьмя и восемью секциями. Результаты расчетов сопоставлялись с результатами смешения в прямом канале прямоугольного сечения аналогичной длины. Это показано в таблице 2. Как видно из таблицы смешение в микромиксере S-типа намного лучше, а перепад давлений даже меньше, чем в прямом канале. Это объясняется тем, что в местах изгиба микромиксера площадь сечения в два раза больше, чем на прямых его участках.

Табл. 2. Результаты численного моделирования смешения двух жидкостей в искривлённом микроканале прямоугольного сечения

Кол-во секций	Перепад давления в искривлённом канале, Па	Смешение в искривлённом канале, %	Перепад давления в прямом канале, Па	Смешение в прямом канале, %	Перепад давления в прямом канале (аналитика), Па
1	283,6	24,40	355,5	8,26	363,3
2	402,9	32,44	546,7	10,26	559,0
3	522,0	37,39	737,7	11,95	754,6
4	641,3	43,70	930,3	13,43	950,2
8	1118	58,74	1693	18,23	1733

Кроме пассивного методов смешения, где процесс интенсифицируется за счёт особенностей геометрии канала, существуют и активные методы смешения, где интенсификация происходит под действием внешних факторов (электромагнитных, акустических). В данной работе был рассмотрен способ интенсификации связанный с периодическими изменениями расхода жидкости на входе в микроканал. Было проведено сравнение пассивного и активного метода смешения жидкостей в микромиксере T-типа.

Геометрия канала показана на рисунке 4, ширина микроканала – 200 мкм, толщина – 100 мкм. Левый и правый вход имеют одинаковую длину – 500 мкм. Длина канала смешения – 2000 мкм. При пассивном смешении на верхний вход в микроканал подается подкрашенная жидкость со среднерасходной скоростью 1 мм/с, через левый вход с такой же скоростью подается чистая жидкость со следующими физическими свойствами: плотность – 1000 кг/м³, вязкость – 0.000667 Па×с, коэффициент диффузии краски в чистой жидкости – 7×10^{-11} м²/с.

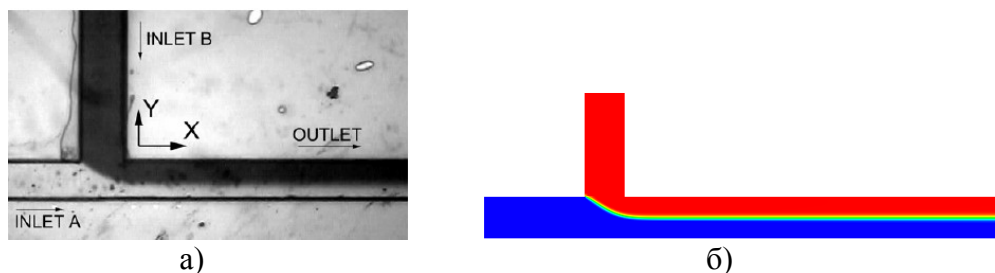


Рис. 4. Геометрия канала: а) эксперимент; б) расчёт

Видно, что перемешивание здесь очень плохое. Эффективность смешения при стационарном течении на выходе из смесителя (на расстоянии 2000 мкм от места слияния потоков) составляет 9,9%. Перепад давления между верхним входом и выходом равен $\Delta P = 5,149$ Па.

При активном смешении на левом входе среднерасходная скорость жидкости задавалась постоянной и равной 1 мм/с. Среднерасходная скорость на верхнем входе задавалась следующим образом: $V = 1 \text{ мм/с} + A \times \sin(2\pi f \times t)$, где f – частота пульсаций скоро-

сти на входе, A – амплитуда пульсаций. В расчетах варьировались частота и амплитуда пульсаций скорости следующим образом: $A = 1, 2, 5, 10$ мм/с. $f = 0.05, 0.1, 1, 2, 5, 10$ Гц. На рисунках 5а-5г изображены результаты расчёта – изолинии осреднённой по времени концентрации краски.

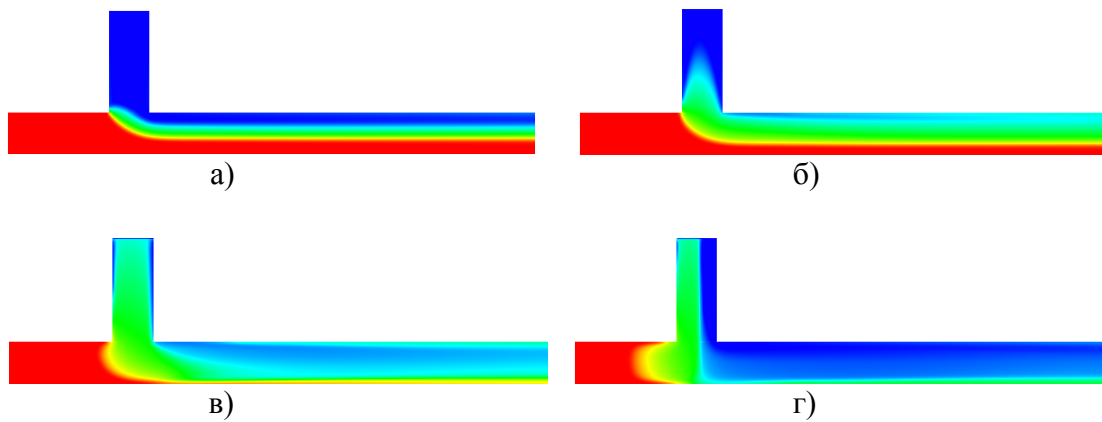


Рис. 5. Изолинии осредненной по времени концентрации краски: а) $f = 1$ Гц, $A = 1$ мм/с; б) $f = 1$ Гц, $A = 2$ мм/с; в) $f = 1$ Гц, $A = 5$ мм/с; г) $f = 1$ Гц, $A = 10$ мм/с;

Зависимость осредненной эффективности смешения от частоты и амплитуды пульсаций скорости на входе приведена на рисунке 6. Как видно, с ростом частоты пульсаций скорости эффективность смешения растет, достигая своего максимума в районе 1-2 Гц, затем медленно падает. С ростом амплитуду пульсаций скорости эффективность смешения также растет, достигая максимума при амплитуде 5 мм/с, и затем уменьшается.

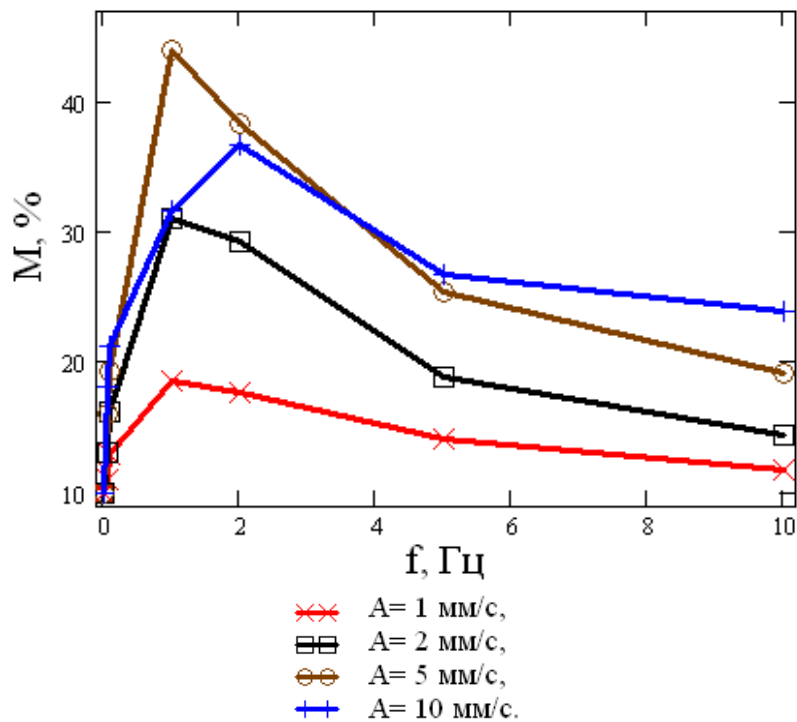


Рис. 6. Зависимость осредненной эффективности смешения от частоты и амплитуды пульсаций скорости на входе