

М. В. Кашкарова^{1}, А. Ю. Кравцова¹, М. А. Воробьев¹*

Особенности течения в Т-микромиксере при высоких числах Re и отличающихся расходах во входах

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Аннотация. Микромиксеры различной конфигурации используются в некоторых технологических процессах для перемешивания жидкостей. Эффективность устройства повышается за счет увеличения скоростей входящего потока. При переходе через критическое значение числа Re , поток становится нестационарным. Зачастую, пропорции смешиваемых жидкостей неодинаковы. Для реализации таких процессов на входы в микромиксер подаются потоки с разными величинами объемных расходов в соответствии с необходимыми пропорциями. Это, несомненно, влияет на картину течения в канале. В настоящей работе рассмотрено течение в т-микроканале и проведено компьютерное моделирование в программном пакете STAR CCM+ нестационарного потока в микромиксере с разными величинами расходов рабочих жидкостей во входных каналах. Описаны особенности картины течения и поля скоростей и давления в канале.

Ключевые слова: микромиксер, поля скорости и давления, неодинаковые расходы, число Рейнольдса, нестационарный поток

M. V. Kashkarova^{1}, A. Yu. Kravtsova¹, M.A. Vorob'ev¹*

Features of the Flow in the T-micromixer at High Re Numbers and Unequal Input Flow Rates

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
*e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Abstract. Micromixers of various configurations are used in some technological processes for mixing liquids. The efficiency of the device is increased by increasing the incoming flow rates. When passing through the critical value of the number Re , the flow becomes unsteady. Often, the proportions of the mixed liquids are not the same. To implement such processes, streams with different volume flow rates are fed to the inputs of the micromixer in accordance with the necessary proportions. This undoubtedly affects the flow pattern in the channel. In this paper, the flow in the T-microchannel is considered and computer modeling in the STAR CCM+ software package of an unsteady flow in a micromixer with different flow rates of working fluids in the input channels is carried out. The features of the flow pattern and the velocity and pressure fields in the channel are described.

Keywords: micromixer, velocity and pressure fields, unequal flow rates, Reynolds number, unsteady flow

Введение

На эффективность перемешивания жидкостей в т-микроканале, несомненно, влияет величина расхода на входах. При высоких числах Re происходит переход в нестационарный режим. Критерий перехода в различных работах варьируется от 225 [1] до 240 [2]. Некоторые технологические процессы химической, биологической и других видов промышленности включают в себя смешивание различных веществ в разных пропорциях. Один из методов для реализации такого смешивания описан в работе [3], где проведено исследование потоков в микроканалах различного сечения. Добиться смешивания жидкостей в разных пропорциях можно также путем изменения расходов во входных каналах в соответствии с необходимыми соотношениями веществ. Такая методика позволяет избежать дополнительных издержек.

В работе исследованы особенности полей скорости и давления в т-микроканале при нестационарных режимах течения.

Методы и материалы

В экспериментальных исследованиях были задействованы микроканальные установки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Картины мгновенной концентрации течения были получены на системе лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF) и инвертированного микроскопа Carl Zeiss Axio Observer.Z1 с Nd:YAG лазером (длина волны 532 нм, длительность импульса 5 нс, энергия импульса 25 мДж), а также использовалась CCD-камера (8 бит на пиксель, разрешение 2048×2048 пикселей) с синхронизирующим процессором. Управление системой LIF осуществлялось с помощью программного пакета 'ActualFlow'. Исследуемая область представляла собой оптически прозрачный Т-образный микроканал размерами $120 \times 120 \times 240$ мкм, который устанавливается на стол микроскопа. Две рабочие жидкости – дистиллированная вода и подкрашенный раствор дистиллированной воды (краситель Rhodamine 6G, концентрация 724 мг/л) – подавались во входные отверстия микроканалов. Рассматриваемый поток характеризуется числом Рейнольдса $Re = U_0 \cdot D_h / \nu$, где U_0 – средняя скорость потока на выходе, $D_h = 160$ мкм – гидравлический диаметр, ν – кинематическая вязкость.

Исследование потока в микроканале было выполнено с использованием программного обеспечения STAR CCM+. Для описания нестационарного течения в микроканале была выбрана нестационарная система уравнений Навье-Стокса. Физические параметры обеих смешиваемых жидкостей были идентичны и соответствовали характеристикам воды. В модели двухфазной среды предполагалось, что она состоит из двух взаимодействующих континуумов с единым полем давления. В расчетах фиксировались такие параметры, как D_h – гидравлический диаметр выходного канала, составляющий 160 мкм; Re – число Рейнольдса; ρ – плотность жидкости; S – площадь сечения выходного канала; ν – кинематическая вязкость. В канале предполагалась ламинарность потока.

В качестве граничных условий для стенок канала использовалось предположение о непроницаемости и отсутствии скольжения. На входах в микромиксер

задавались фиксированные массовые расходы так, чтобы обеспечить определенное соотношение между первым и вторым входными потоками. Регулировка массовых расходов в каждом из входных каналов позволяла достичь необходимых различий в расходах:

$$Q_1 = \frac{RQ}{1+R}, \quad Q_2 = \frac{Q}{1+R},$$

здесь

$$Q = \frac{Re\nu S}{D_h}.$$

Параметр R определяется как соотношение меньшего и большего входных расходов, причем $R \leq 1$.

Исходя из предположения, что жидкость беспрепятственно вытекает из микроканала, давление на выходе было задано равным 1 бару. Геометрическая форма расчетной области точно соответствовала форме экспериментального канала, который включал два входных канала с квадратным сечением 120 на 120 мкм и один выходной канал прямоугольной формы размером 120 на 240 мкм. Каждый входной канал составлял 1,2 миллиметра в длину, а выходной имел размер 2,4 миллиметра. Угол между каналами равнялся 90 градусам. В ходе расчетов использовалась многогранная сетка, размер ячеек которой был уменьшен у области слияния каналов для достижения большей точности расчетов, а также детализации характеристик потока в канале.

Результаты

На рис. 1 представлены результаты экспериментального и компьютерного исследования нестационарного потока в T-микроканале. Слева и справа от LIF-картины течения расположены поля скорости (слева) и давления (справа) в поперечных сечениях микроканала. Также на изображениях слева и справа представлена изоповерхность завихренности. Наибольшие значения скоростей находятся в области пересечения потоков из двух входных каналов. Из рисунков видно, что максимальные значения скорости и давления расположены ближе к каналу с меньшим значением расхода.

При уменьшении соотношения входных расходов поля скорости и давления, а также и изоповерхность становятся более ассимитричными (рис. 2). В потоке возникают вихри сложной формы, локализованные в области слияния входных потоков, а затем распространяющиеся вдоль оси канала. Максимум скорости и давления (по поперечному сечению) периодически перемещается в плоскости канала с течением времени. Изоповерхность также совершает периодические флуктуации в верхней части вдоль оси входных каналов, а в нижней – вдоль выходного канала. При увеличении скорости потока при одном и том же соотноше-

нии расходов вихрь в канале увеличивается в размере и распространяется вдоль выходного канала (рис. 3). Форма его также усложняется с ростом числа Re .

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование и компьютерное моделирование нестационарного течения в Т-микроканале. Описаны поля скорости и давления в поперечных сечениях выходного канала. В области слияния потоков возникает вихрь сложной формы, который распространяется вдоль выходного канала. Приближение значения R к 1 приводит к симметризации потока. Увеличение числа Re при одинаковом соотношении расходов приводит к распространению вихря вдоль выходного канала и усложнению формы вихря.

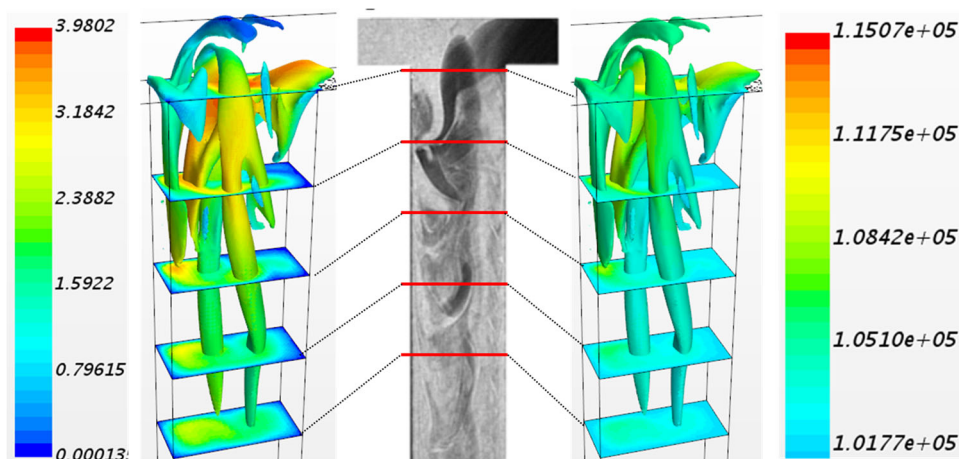


Рис. 1. Картина течения и изповерхность завихренности в Т-микроканале ($R=0,5$, $Re=250$): слева – поле скорости в поперечных сечениях выходного канала с шагом $i \cdot D_h$, $i=1..5$, посередине – экспериментальная визуализация течения в Т-микроканале, справа – поле давления в поперечных сечениях выходного канала с шагом $i \cdot D_h$, $i=1..5$

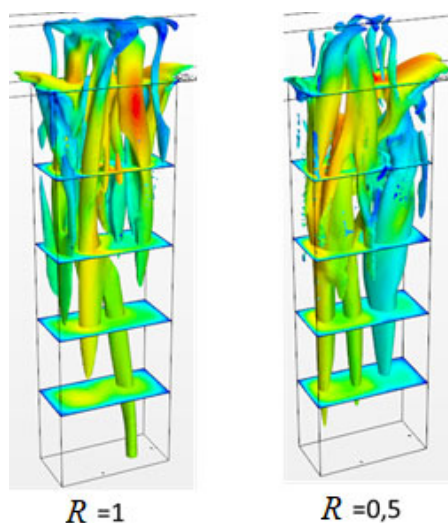


Рис. 2. Поле скорости в поперечных сечениях выходного канала с шагом $i \cdot D_h$, $i=1..5$, и изоповерхность завихренности ($Re=400$)

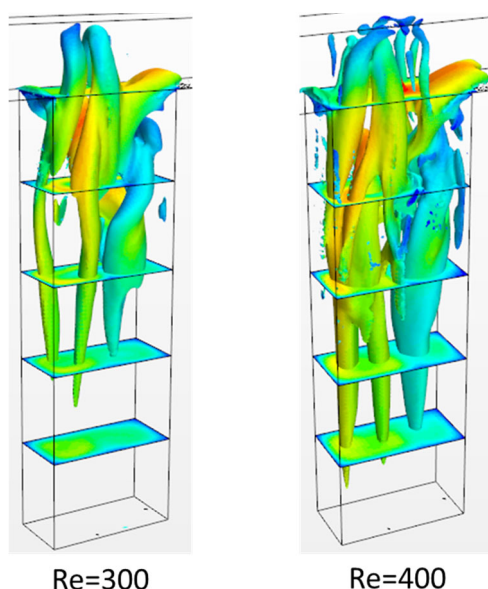


Рис. 3. Поле скорости в поперечных сечениях выходного канала с шагом $i \cdot D_h$, $i=1..5$, и изоповерхность завихренности ($R=0,5$)

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mariotti, A., Galletti, C., Mauri, R., Salvetti, M.V., and Brunazz, E., Steady and Unsteady Regimes in a T-Shaped Micro-Mixer: Synergic Experimental and Numerical Investigation, Chem. Eng. J., 2018, vol. 341, pp. 414–431.
2. Dreher S., Kockmann N., Woias P. Characterization of Laminar Transient Flow Regimes and Mixing in T-Shaped Micromixers // Heat Transfer Engin. 2009. Vol. 30. no. 1. P. 91–100.
3. B. Li, J. Hou, K. Xu, Q. Gao, M. Zeng, Q. Wang. Optimal designs for flow uniformity at inlet of microchannel flat tube heat exchanger, Applied Thermal Engineering, Volume 226, 2023, 120300, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120300>.

© М. В. Каукарова, А. Ю. Кравцова, М. А. Воробьев, 2024