

М. В. КашкарOVA¹✉, Д. В. Литвинова¹, А. Ю. Кравцова¹

Цифровой двойник течения вязкой жидкости в т-миксере при неравных расходах во входных каналах

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

Аннотация. В технологических процессах для получения смесей зачастую используют микромиксеры различных конфигураций. Преимущество таких устройств заключается в их простоте, а перемешивание происходит за счет особой геометрии канала. Основная часть исследований по данной тематике ориентирована на разработку методов, направленных на повышение эффективности смешивания в микроканалах. Так, например, в [1] исследуется влияние угла изгиба выходного канала на коэффициент перемешивания. Рабочей жидкостью в большинстве работ выступает вода. При этом, в реальных технологических процессах физические свойства смешиваемых жидкостей могут отличаться. В данной работе исследовалось влияние вязкости рабочей жидкости на течение в т-микроканале, и проанализировано влияние неравных расходов на картину течения. Моделирование проводилось в CFD-пакете STAR CCM+.

Ключевые слова: микромиксер, неравные расходы, число Рейнольдса, нестационарный поток, коэффициент перемешивания

M. V. Kashkarova¹✉, D. V. Litvinova¹, A. Yu. Kravtsova¹

Digital twin of viscous liquid flow in a t-mixer at different flow rates in the input channels

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

Abstract. In technological processes, micromixers of various configurations are used to produce mixtures. The advantage of such devices lies in their simplicity, and mixing occurs due to the special geometry of the channel. The main part of the research on this topic is aimed at developing methods directed to improving the efficiency of mixing in microchannels. For example, in [1] the influence of the bending angle of the output channel on the mixing coefficient is investigated. The working fluid in most cases is water. In real technological processes, the physical properties of the mixed liquids may differ. In this paper, the effect of the viscosity of the working fluid on the flow in the t-micromixers was investigated and the effect of unequal flow rates on the flow pattern was analyzed. The simulation was carried out in the CFD package STAR CCM+.

Keywords: micromixer, unequal flow rates, Reynolds number, unsteady flow, mixing coefficient

Введение

Чаще всего для исследования течений в лабораторных условиях в качестве рабочей жидкости используют дистиллированную воду. Физические свойства рабочих жидкостей, используемых в реальных технологических процессах, мо-

гут достаточно сильно отличаться от свойств воды. Также, реальные производственные технологии могут предполагать смешивание веществ в различных пропорциях. Один из вариантов реализации такого технологического процесса представлен в [2], где исследуются миксеры различного сечения. Такой способ предполагает изготовление нового микромиксера под конкретный технологический процесс. Другим способом реализации смешивания веществ в разных пропорциях является изменение величины расходов во входных каналах, что позволяет избежать дополнительных издержек.

В работе проведено сравнение течений вязкой и маловязкой жидкости в микроканале. Построены λ_2 -изоповерхности, поля концентраций и линии тока. Проведено сравнение протяженности λ_2 -структур при различных соотношениях расходов во входных каналах.

Методы и материалы

Расчетные области, используемые в моделировании, были построены в соответствии с размерами применяемых в реальных технологических условиях микромиксеров. Область течения представляла собой Т-образную призму размерами $120 \times 120 \times 240$ мкм. В качестве рабочих жидкостей рассматривались вода (плотность – 1000 кг/м^3 , вязкость – $8,90 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$) и водный раствор глицерина 30% (плотность – $1076,5 \text{ кг/м}^3$, вязкость – $0,001432 \text{ Па} \cdot \text{с}$). Основной характеристикой потока жидкости в микроканале является число Рейнольдса $Re = U_0 D_h / \nu$, где U_0 – средняя скорость потока в выходном канале, $D_h = 160$ мкм – гидравлический диаметр выходного канала, ν – кинематическая вязкость жидкости.

Для моделирования течения в микромиксере использовался CFD-пакет STAR CCM+. Для описания течения вязкого потока были выбраны нестационарные уравнения Навье-Стокса. Рабочая жидкость имела постоянную вязкость и плотность. Обе жидкости, которые подавались во входные каналы, имели одинаковые физические свойства. Среда рассматривалась как взаимопроникающий континуум с общим полем давления. Поток считался ламинарным.

В качестве граничных условий на стенках были использованы условия прилипания. Во входах канала задавались значения массового расхода, с учетом того, что отношение расходов в первом и втором входном каналах принимало определенное значение. Величины расходов в первом и втором входных каналах задавались с помощью выражений:

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

где $Q = \frac{RevS}{D_h}$; S – площадь сечения выходного канала; R характеризует отношение меньшего значения входного расхода к большему:

$$R = \frac{Q_1}{Q_2}.$$

На выходе из микроканала ставилось условие свободного истечения. Геометрия расчетной области совпадала с конфигурацией канала: два коллинеарных входных канала квадратного сечения с гранью размером 120 мкм сходятся в один выходной прямоугольный канал размером 120×240 мкм. Длина каждого из входных каналов 1,2 мм, длина выходного 2,4 мм. Угол между каждым из входных и выходным каналами составлял 90°. Расчетная сетка состояла из многогранных ячеек, в области слияния потоков ячейки сетки были дополнительно измельчены.

Результаты

В результате сравнений λ_2 -изоповерхностей для вязкой и невязкой рабочих жидкостей получили, что в вязкой жидкости вихревые структуры намного менее развиты. Так, если в воде протяженность «ножек» изоповерхности составляет $3D_h$, то в водном растворе глицерина (30%) протяженность составляет всего лишь $1D_h$ (рис. 1). Течения в случае обеих рабочих жидкостей являются стационарными.

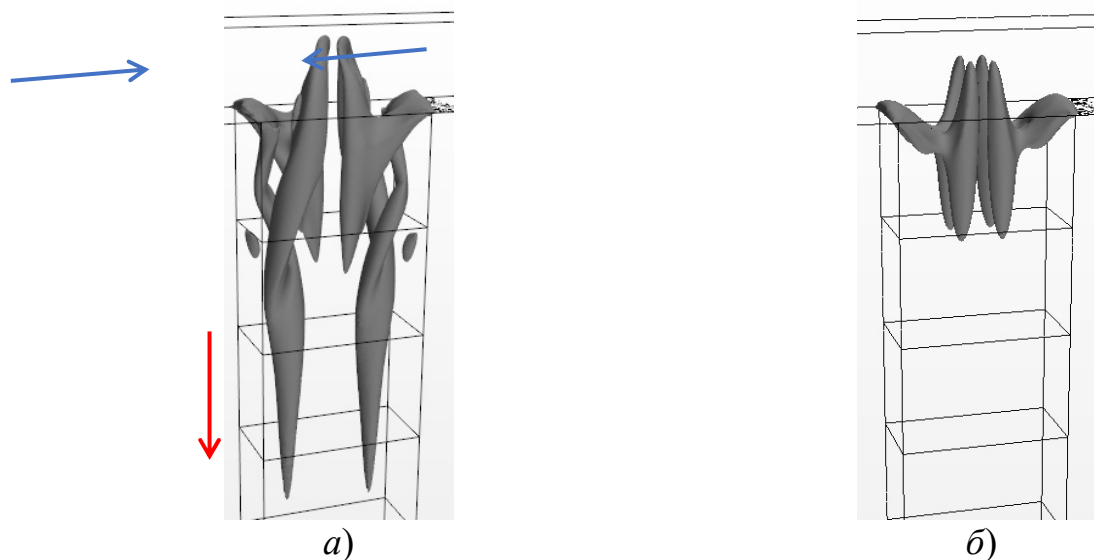


Рис. 1. Влияние вязкости рабочей жидкости на форму λ_2 -изоповерхности в т-микромиксере. $Re = 120$, $R = 1$. (а) – вода, (б) – водный раствор глицерина (30%). Стрелками указаны направления потока

Исследована также динамика изоповерхности при изменении величины соотношения входных расходов. При уменьшении величины R изоповерхность теряет свою симметричность, и положение «ножек» смещается в сторону канала с меньшим расходом (рис. 2).

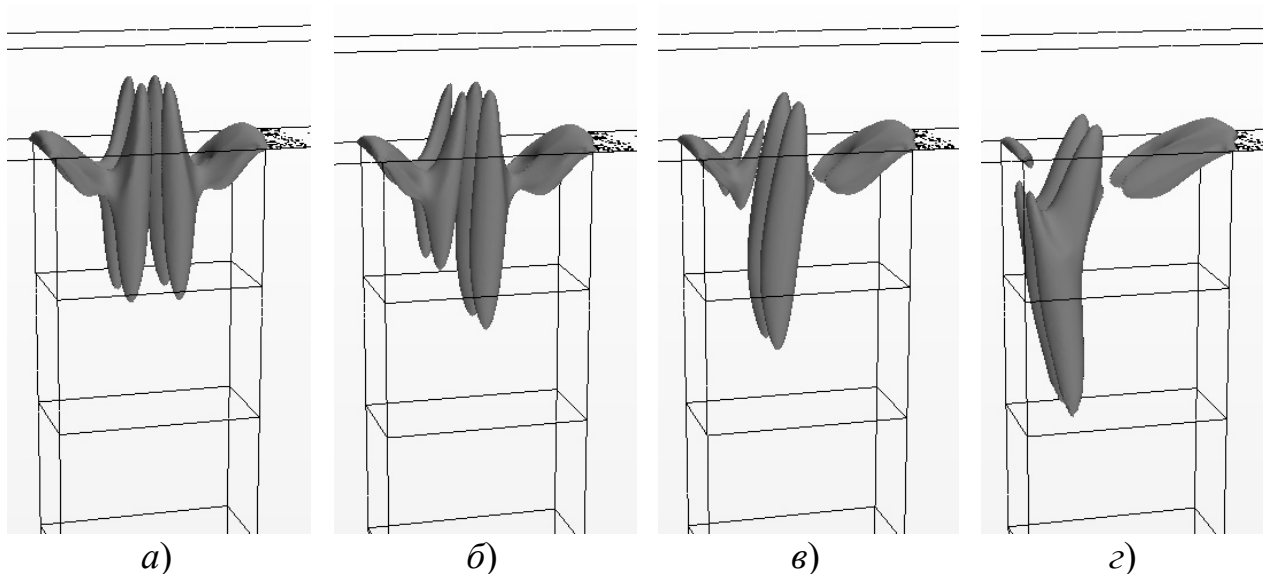


Рис. 2. Динамика изменения λ_2 -изоповерхности при уменьшении параметра R :
(а) – $R = 1$; (б) – $R = 0,75$, (в) – $R = 0,5$, (г) – $R = 0,25$.

Для анализа течения в выходном канале при различных соотношениях R были построены линии тока и поля концентраций в выходном канале микромиксера (рис. 3).

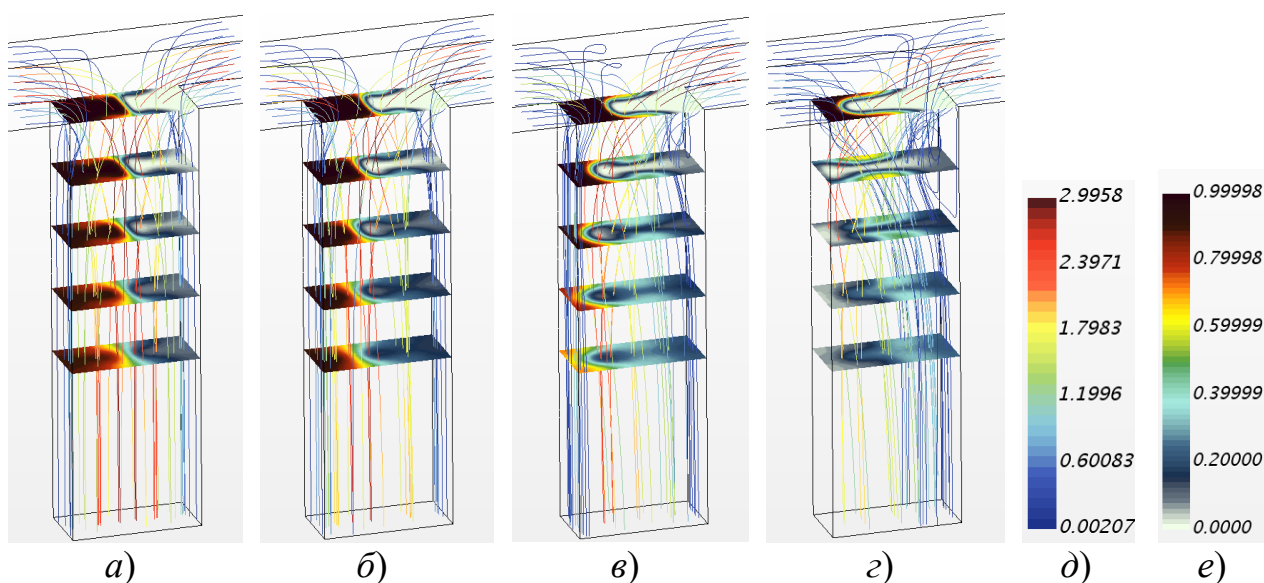


Рис. 3. Линии тока и поля концентраций в потоке водного раствора глицерина (30%) при различных соотношениях расходов во входных каналах: (а) – $R = 1$, (б) – $R = 0,75$, (в) – $R = 0,5$, (г) – $R = 0,25$. Шкалы: (д) – шкала для значений скорости, показанных на линиях тока, (е) – шкала концентраций, показанных в поперечных сечениях выходного канала, расстояние между сечениями равно D_h .

При уменьшении параметра R максимум скорости потока смещается в сторону к каналу с меньшим расходом (рис. 4).

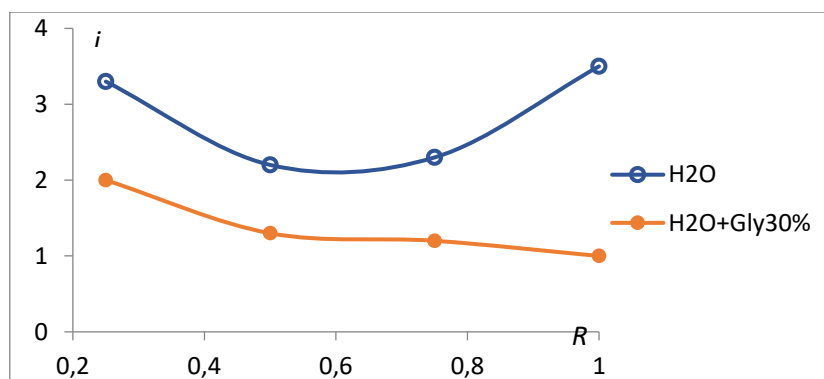


Рис. 4. Зависимость протяженности «ножек» λ_2 -изоповерхности в потоке воды и водного раствора глицерина (30%) при различных соотношениях расходов (i – коэффициент протяженности «ножек», iD_h , $i=1..4$).

Еще одним критерием влияния вязкости рабочей жидкости на поток является то, что в случае маловязкой жидкости (воды) протяженность «ножек» при уменьшении параметра R сначала уменьшается, а затем растет. В вязкой жидкости происходит постоянный рост протяженности «ножек».

Заключение

В работе с помощью компьютерного моделирования проведено сравнение течения вязкой и маловязкой рабочих жидкостей в т-микромиксере. Описана динамика изменения λ_2 -изоповерхности при изменении величины соотношения входных расходов R . Для более глубокого анализа течения в микроканале были построены поля концентраций и линии тока для различных R . Проведен сравнительный анализ протяженности «ножек» изоповерхности для случаев вязкой и маловязкой жидкости. В вязкой жидкости при уменьшении значения R происходит рост протяженности «ножек», тогда как в случае воды происходит сначала уменьшение, а затем рост протяженности.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rasheed, K., Ansari, M.A., Alam, S. et al. Performance analysis of T-shaped micromixers using an innovative bend structure of mixing channel. *Microfluid Nanofluid* 29, 6 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10404-024-02783-3>.
2. 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. Кашкарова, Д. В. Литвинова, А. Ю. Кравцова, 2025