

М. В. Кашкарова¹✉, А. Ю. Кравцова¹

Визуализация λ_2 -изоповерхностей вязкой жидкости в т-микроканалах при наложенных пульсациях

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

Аннотация. Одним из устройств для перемешивания жидкостей является Т-микромиксер. Исследования течений в Т-микромиксерах направлены на поиск различных методов повышения эффективности перемешивания в них. Так, к пассивным методам повышения эффективности работы устройств относится изменение конфигурации, а именно размера каналов [1]. Одним из активных методов является применение дополнительных пульсаций расхода во входных потоках [2]. Одновременно с этим, реальные жидкости в технологических процессах могут обладать различными физическими свойствами, отличными от свойств воды, которая чаще всего применяется в качестве рабочей жидкости в большинстве работ по исследованию течений в микроканалах. В работе проведено исследование поведения вязкой жидкости (30% раствор глицерина) в микроканале при наложенных пульсациях на входах. Варьировались значения частот пульсаций и числа Рейнольдса. Получены λ_2 -изоповерхности и поля концентраций в Т-микроканале. Проведено сопоставление течений при различных параметрах потока.

Ключевые слова: Т-микроканал, пульсации, λ_2 -изоповерхности, число Рейнольдса

М. V. Kashkarova¹✉, A. Yu. Kravtsova¹

Visualization of λ_2 -isosurfaces of viscous liquid in t-microchannels with superimposed pulsations

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

Abstract. One of the devices for mixing liquids is a T-micromixer. Studies of flows in T-micromixers are aimed at finding various methods to increase the efficiency of mixing in them. Thus, passive methods of increasing the efficiency of devices include changing the configuration, namely the channel size [1]. One of the active methods is the use of additional flow pulsations in the input streams [2]. At the same time, real liquids in technological processes may have different physical properties than water, which is most often referred to as working fluid in most studies of microchannels. The paper investigates the behavior of a viscous liquid (30% glycerol solution) in a microchannel with superimposed pulsations at the inputs. The values of the pulsation frequencies and the Reynolds number varied. λ_2 -isosurface and concentration fields in the T-microchannel are obtained. A comparison of currents at different parameters is carried out.

Keywords: T-microchannel, superimposed pulsations, λ_2 -isosurface, Reynolds number

Введение

Помимо пассивных методов повышения эффективности перемешивания в микромиксерах за счет изменения геометрии устройства [3,4], на практике ис-

пользуют и активные методы, предусматривающие различные дополнительные внешние воздействия. Одним из таких методов является наложение пульсаций расхода на входные потоки. Пульсации расхода, как было отмечено авторами работы [5], меняют профиль скорости и структуру потока. В [6] проведено моделирование течения в Т-микроканале при малом числе Рейнольдса $Re = 0,2$, исследованы поля коэффициента перемешивания при различных амплитудах и частотах колебаний. Источник пульсаций может располагаться и внутри потока. Так, в [7] исследованы поля скоростей и концентраций течения в Т-микроканале с пульсирующим элементом, расположенным в месте слияния потоков. Динамика вязкой жидкости при низких числах Рейнольдса в микроканале с осциллирующим цилиндром исследована в [8]. Целью настоящей работы является исследование влияния вязкости рабочей жидкости на структуру течения в Т-микроканале с наложенными пульсациями во входных каналах в широком диапазоне чисел Рейнольдса и величин частот колебаний входящего потока.

Методы и материалы

Расчетные области, использованные в работе, были построены по аналогии с микроканальными установками Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Т-образный микроканал имел размеры $120 \times 120 \times 240$ мкм. Рабочими жидкостями были вода и водный 30 % раствор глицерина. Рабочие жидкости поступали в канал через входные отверстия. Скорость потока задавалась на входе. Наложённые синфазные пульсации расхода были применены к основному потоку во входных каналах. Основной характеристикой потока выступало число Рейнольдса $Re = U_0 D_h / \nu$, где U_0 – средняя скорость потока в выходном канале, $D_h = 160$ мкм – гидравлический диаметр указанного микроканального устройства.

Численное моделирование течения в Т-микроканале с наложенными пульсациями проводилось в CFD-пакете STAR CCM+. Для описания течения в канале микронного размера использовались нестационарные уравнения Навье-Стокса. В качестве рабочих жидкостей рассматривались вода и водный 30% раствор глицерина, их физические параметры полагались постоянными. В каждом конкретном расчете использовался только один вид жидкости. Используемые модели многофазного взаимодействия предполагали, что среда является взаимопроникающим континуумом с общим полем давления. Параметры расчета включали в себя: D_h – гидравлический диаметр устройства, для рассматриваемого канала величина составляла $D_h = 160$ мкм, Re – число Рейнольдса (в разных постановках задавались параметры из диапазона от 120 до 400), ρ – плотность конкретного вида рабочей жидкости, S – площадь сечения выходного канала ($S = 28800$ мкм²), ν – кинематическая вязкость рабочей жидкости. Поток считался ламинарным.

Пульсации подавались на оба входных канала. Величина расхода жидкости во входных каналах Q_1 и Q_2 от времени изменялась по формуле:

$$Q_1 = Q_2 = Q_a \sin(\omega t) + Q,$$

где

$$Q = \frac{\rho \text{Re} v S}{D_h}, \quad Q_a = 1,57 \cdot 10^{-8} \text{ кг/с.}$$

Избыточное давление на входе было равно 0, то есть жидкость свободно вытекала из канала. Расчетная область построена следующим образом: жидкость поступает в канал через два противонаправленных соосных канала с квадратными сечениями (длина грани 120 мкм), а покидает устройство через выходной канал с прямоугольным сечением 120 х 240 мкм². Входные каналы составляют угол 90° к выходному. Многогранные ячейки расчетной сетки были измельчены в области слияния потоков. Количество ячеек составляло ~10⁶.

Результаты

В качестве рабочей жидкости был выбран 30% водный раствор глицерина плотностью 1076,5 кг/м³ и вязкостью 0,001432 Па·с. Частоты наложенных пульсаций менялись в диапазоне от 0 до 800 Гц.



Рис. 1. λ_2 -изоповерхность (а) и линии тока с указанием скорости и поля концентраций в поперечных сечениях iD_h , $i=0..4$ (б) вязкой жидкости в Т-микроканале с наложенными пульсациями при $\text{Re} = 120$, $f = 200..800$ Гц

При $\text{Re} = 120$ течение является стационарным, и пульсации не влияют на поток, картина течения идентичная для всех исследованных частот наложенных пульсаций. Для повышения эффективности перемешивания в Т-микромиксере вязких жидкостей при низких числах Рейнольдса метод добавления наложенных пульсаций является неэффективным.

Для случаев больших чисел Рейнольдса, когда поток в канале становится нестационарным, частоты начинают вносить вклад в картину течения вязкой жидкости в Т-микроканале. Для лучшего понимания картины течения в канале были построены поля концентраций в поперечных сечениях выходного канала (рис. 2).

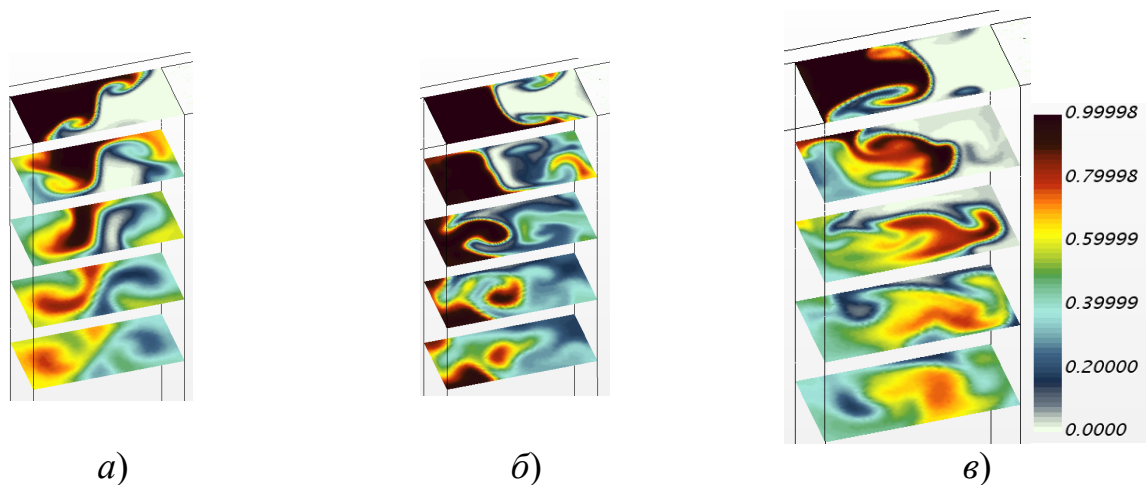


Рис. 2. Поля концентрации в Т-микромиксере при $Re = 400$ и различных частотах возмущения входного потока.

При больших числах Рейнольдса ($Re > 250$) λ_2 -изоповерхности имеют очень сложную структуру (рис. 3), а также являются нестационарными. В области слияния потоков λ_2 -структуры совершают колебательные движения вдоль оси входных каналов, а в выходном канале наблюдается винтовое вращение «ножек» изоповерхности. Увеличение наложенной частоты приводит к укрупнению вихревых структур в выходном канале, что является косвенным признаком улучшения эффективности перемешивания.

Заключение

Исследовано влияние наложенных пульсаций на течение вязкой жидкости в Т-микроканале. При низких числах Рейнольдса пульсации не оказывают влияние на поток. При больших числах Рейнольдса увеличение частоты пульсации приводит к укрупнению размера «ножек» вихревой изоповерхности в выходном канале.

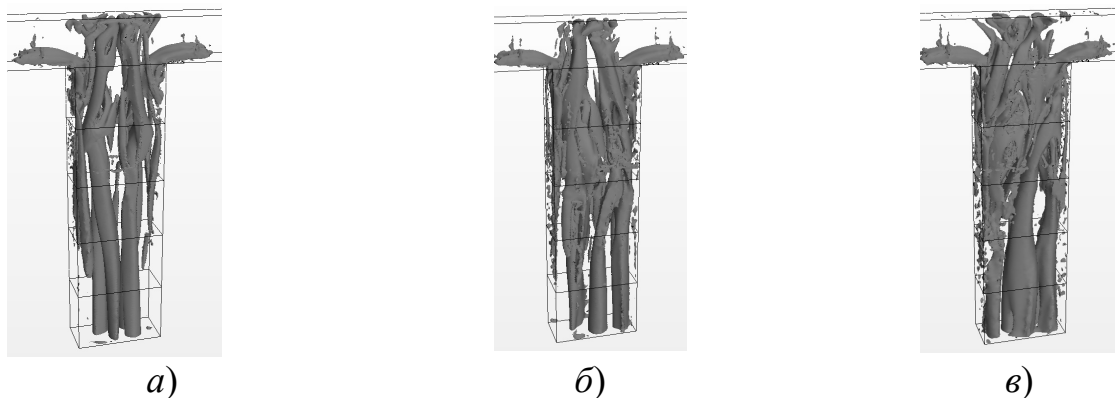


Рис. 3. λ_2 -структуры в Т-микроканале при различных синфазных частотах, накладываемых на расходы во входных каналах: а) – $f = 200$ Гц, б) – $f = 400$ Гц, в) – $f = 800$ Гц

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li B., Hou J., Xu K., Gao Q., Zeng M., Wang Q. 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>.
2. Кашкарова М.В., Кравцова А.Ю., Павлов В.А. Диагностика течения в микроканалах с наложенными пульсациями // Сборник материалов Национальная конференция с международным участием, «СибОптика»; (Новосибирск, 14 мая), 2024, Т.8, с.101–106. DOI 10.33764/2618-981X-2024-8-1-101-106.
3. 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>.
4. Houssein A., Bassem E.Z., Jalal F., Mahmoud K. Enhanced micromixer designs for chemical applications – Numerical simulations and analysis. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Volume 208, 2025, 110098, ISSN 0255-2701, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.110098>.
5. Karbaschi M, Javadi A, Bastani D, Miller R (2014) High frequency oscillatory flow in micro channels. *Colloids Surf A* 460:355–360. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.03.062>.
6. Cheaib F, Kekejian G, Antoun S, Cheikh M, Lakkis I (2016) Microfluidic mixing using pulsating flows. *Microfluidics and Nanofluidics* 20:70. <https://doi.org/10.1007/s10404-016-1731-4/>.
7. Seyed M.M., Ehsan A., Hossein S.R., Reza K. Numerical study of the performance of an active micromixer based on the oscillations of a microbeam. *Chemical Engineering Science*, Volume 297, 2024, 120273, ISSN 0009-2509, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120273>.
8. Ghanbari S. et al. Numerical investigating the impact of fluid properties and oscillation frequency on micro mixer efficiency. *Heliyon*, Volume 11, Issue 1, e41290, [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)17321-5](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)17321-5).

© М. В. Кашкарова, А. Ю. Кравцова, 2025