

М. В. Кашкарова^{1}, А. Ю. Кравцова¹, В.А. Павлов¹*

Диагностика течения в микроканалах с наложенными пульсациями

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

Аннотация. Т-микромиксер – одно из множества устройств, применяемое для смешивания жидкостей в ходе различных технологических процессов. Одним из методов повышения эффективности перемешивания в т-микромиксерах является наложение пульсаций на входные потоки. В работе проведено экспериментальное исследование картины течения в Т-микромиксере методом лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF), используя две рабочие жидкости с одинаковыми свойствами, одна из которых была окрашена красителем, не меняющим ее физические параметры. Пульсации накладывались на оба входных потока. Помимо экспериментального исследования было проведено компьютерное моделирование пульсационного течения в микроканале. В результате экспериментов с использованием метода LIF были получены визуализации течения жидкости. Были построены поля скорости и давления, а также изоповерхности завихренности, что позволило оценить структуру потока. Кроме того, было исследовано влияние пульсаций на характер течения в Т-образном микроканале, что дало возможность понять, как изменение входных параметров влияет на поведение потока. Эти данные могут быть использованы для оптимизации процессов и улучшения конструкции микроканалов.

Ключевые слова: Т-микроканал, наложенные пульсации, поле скорости, число Рейнольдса

М. V. Kashkarova^{1}, A. Yu. Kravtsova¹, V.A.Pavlov¹*

Diagnostics of Flow in Microchannels with Imposed Pulsations

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

Abstract. The T-micromixer is a device commonly used to mix liquids in various technological processes. One method to enhance mixing efficiency in T-micromixers is applying pulsations to the inflow streams. An experimental study of the flow pattern within a T-micromixer was conducted using the Laser-Induced Fluorescence (LIF) method. This study utilized two working fluids with identical properties, one of which was dyed with a colorant that does not alter its physical parameters. This research provided valuable insights into the flow characteristics and mixing efficiency, as well as the impact of pulsations on the mixing process. The findings can be applied to optimize the design of micromixers and improve their performance in various applications. Pulsations were superimposed on both input streams. In addition to the experimental study, computer simulation of the pulsation flow in the microchannel was carried out. Based on the results of the work, flow patterns were obtained by the LIF method, velocity fields, pressure fields, vorticity isosurfaces were constructed, and the effect of pulsations on the flow pattern in the T-microchannel depending on the input parameters was described.

Keywords: T-microchannel, superimposed pulsations, velocity field, Reynolds number

Введение

В качестве одного из методов регулирования скорости тепло- и массообмена, а также гидродинамической структуры турбулентных потоков в микроканалах может применяться наложение периодического возбуждения на входные потоки [1,2]. Такой подход обещает быть очень эффективным для различных инженерных технологий, нефтяной промышленности, судо- и машиностроения, химической промышленности и медицины. В работе [3] показано, что структура потока и эволюция формы профиля скорости существенно зависят от частоты внешнего возмущения и типа канала. Исследовано влияние добавления противофазных пульсаций к основному потоку во впускных каналах Т-микромиксера для низкого числа Рейнольдса $Re = 0,3$ с использованием вычислительной гидродинамики [4]. Авторы проанализировали динамику потока при импульсном воздействии на два впускных отверстия со сдвигом фаз на 90 и 180 градусов. Число Струхала составило 0,094, 0,375, 1,5. Изучая эволюцию линий материала и контурный график зависимости концентрации жидкости, авторы продемонстрировали повышение эффективности перемешивания и искажение линий подачи материала в выпускном канале. Было получено значительное влияние на гидродинамику жидкости и структуру импульсного потока на входе в выпускной канал для $Re < 10$ [5]. В [6] численно исследованы перемешивание и гидродинамика жидкости в импульсных потоках с точки зрения амплитуды пульсаций, частоты пульсаций, фазового угла, высоты канала и вязкости жидкости при низких числах Рейнольдса. Амплитуда и частота пульсаций оказывают наиболее сильное влияние на структуру потока в смесительном канале. Из-за пульсации эффективность перемешивания испытывает пространственные колебания ниже по потоку, а также временные колебания в течение цикла пульсации. Существует оптимальная частота пульсаций, ниже и выше которой перемешивание ухудшается, и эта оптимальная частота зависит от амплитуды пульсаций и ширины канала. Исследовано влияние возмущений давления на поток внутри Т-образного смесителя для $Re < 0,24$ в случае диффузии с преобладанием конвекции в выходном канале, была определена частота пульсаций, наилучшая для перемешивания [7]. Целью нашей работы является демонстрация структуры картины течения в случае добавления внешнего возмущения к основному потоку внутри Т-образного микроканала в расширенном диапазоне чисел Рейнольдса и частот внешнего возмущения.

Методы и материалы

Эксперименты проводились в микроканале на установке Института теплофизики им. Кутателадзе СО РАН. Использовалась техника лазерной флуоресценции для визуализации мгновенных концентраций в потоке. Для этого применялся инвертированный микроскоп Carl Zeiss Axio Observer.Z1 с Nd:YAG лазером, который имеет длину волны 532 нм, длительность импульса 5 нс и энергию импульса 25 мДж. Изображения фиксировались с помощью CCD-камеры с разрешением 2048 на 2048 пикселей и глубиной цвета 8 бит на пиксель, а синхро-

низация осуществлялась через специализированный процессор. Система LIF управлялась с помощью компьютера с использованием программного обеспечения 'ActualFlow'. Исследование проводилось на Т-образном микроканале, изготовленном из оптически прозрачного материала SU-8. Размеры канала составляли 120 x 120 x 240 микрометров, и он был установлен на столе микроскопа. В качестве рабочих жидкостей использовались дистиллированная вода и раствор дистиллированной воды с красителем Rhodamine 6G, который растворяется на молекулярном уровне. Концентрация красителя в растворе составляла 724 мг/л. Скорость потока на входе контролировалась с помощью шприцевого насоса KD Scientific, а для создания синфазной пульсации во впускных каналах использовалась специальная система возбуждения потока на основе пьезоэлектрического привода [8]. Рассматриваемый поток характеризовался числом Рейнольдса $Re = U_0 \cdot D_h / \nu$, где U_0 – средняя скорость потока на выходе, $D_h = 4S/P = 160$ мкм – гидравлический диаметр, S и P – площадь поперечного сечения и периметр канала, соответственно, ν – кинематическая вязкость. Амплитуда внешнего возмущения фиксируется равной 100 мкм, что соответствует $3,14 \cdot 10^{-5}$ м³/с сжимаемого объема при частоте $f = 1000$ Гц.

В дополнение к экспериментальным исследованиям, было выполнено компьютерное моделирование жидкостного потока с использованием программного обеспечения STAR CCM+. Для описания движения жидкости в микроканале использовалась нестационарная модель уравнений Навье–Стокса. Предполагалось, что плотность и вязкость рабочих жидкостей остаются неизменными. Обе смешиваемые жидкости имели идентичные физические характеристики, соответствующие свойствам воды. Двухфазная система моделировалась как единый континуум с общим полем давления. В модели устанавливались следующие фиксированные параметры: D_h – гидравлический диаметр выходного канала, равный 160 мкм; Re – число Рейнольдса, варьирующееся в пределах от 250 до 400; ρ – плотность жидкости; S – площадь сечения выходного канала; ν – кинематическая вязкость. Режим потока рассматривался как ламинарный.

На оба входа в канал задавался переменный расход по формуле:

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

где

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

В условиях на выходе предполагалось, что поток будет свободным. Давление в конце канала устанавливалось на уровне 1 бара. Структура вычислительной области дублирует структуру экспериментального канала, который состоит из двух входных каналов квадратного сечения с размером грани 120 мкм и од-

ного выходного канала прямоугольного сечения размером 120 на 240 мкм. Входные каналы, расположенные соосно и направленные в противоположные стороны, образуют угол в 90 градусов с выходным каналом. При проведении расчетов использовалась полигональная сетка, которая была уточнена в месте слияния потоков (рис. 1).

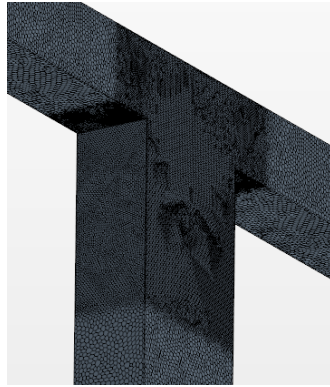


Рис. 1. Вычислительная сетка

Результаты

На рис. 2 показано влияние пульсации, наложенной на входной поток, на скорости течения в канале. Видно, что при одних и тех же числах Re значения скоростей в потоке с пульсациями значительно выше. Вихревая изоповерхность при наложенных возмущениях имеет больший размер, что, несомненно, положительно отразится на эффективности перемешивания.

На рис. 3 представлено сопоставление LIF-картины течения и результатов компьютерного моделирования – полей скорости и давления в Т-микроканале. Поля скоростей и давления симметричны. Максимальное значение скорости и давления по сечению находится в его центральной части. Вихревая изоповерхность локализуется в области слияния потоков, имеет симметричную форму.

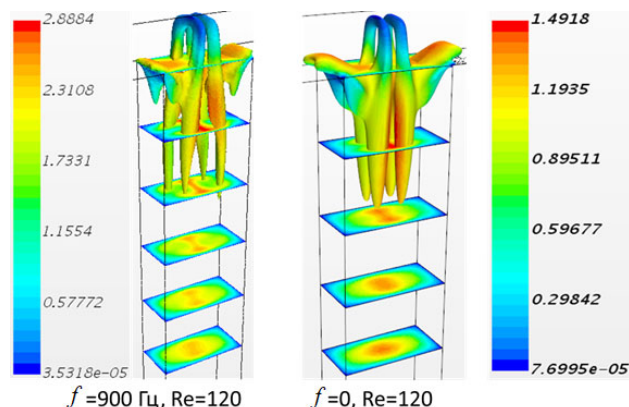


Рис. 2. Поля скоростей в поперечных сечениях выходного канала с шагом $i \cdot D_h$, $i=1..5$ и изоповерхность завихренности в Т-микроканале с наложенной пульсацией и без возмущения потока

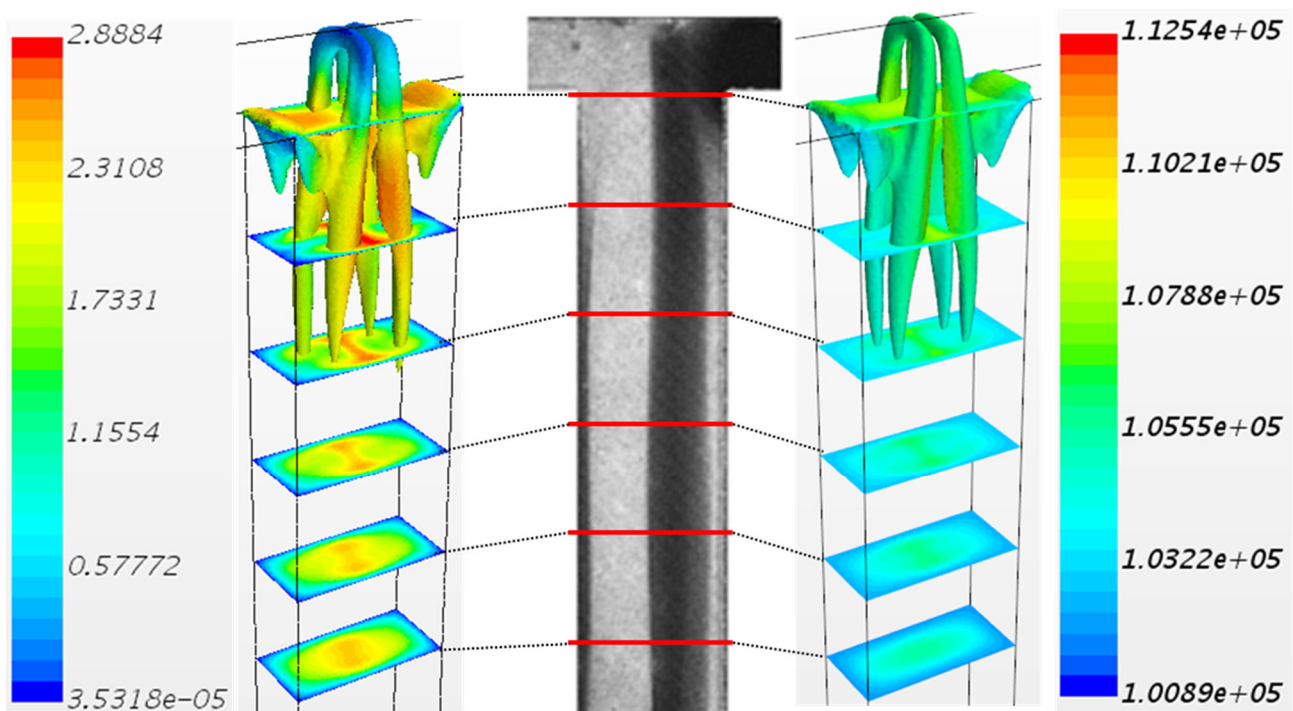


Рис. 3. Картина течения и изповерхность завихренности в Т-микроканале ($f = 900$ Гц, $Re = 120$): слева – поле скорости в поперечных сечениях выходного канала с шагом $i \cdot D_h$, $i=1..5$, посередине – экспериментальная визуализация течения в Т-микроканале, справа – поле давления в поперечных сечениях выходного канала с шагом $i \cdot D_h$, $i=1..5$

Заключение

В работе проведено как экспериментальное исследование, так и компьютерное моделирование потока в Т-микроканале с наложенными пульсациями. Построены и описаны поля скорости и давления в поперечных сечениях выходного канала. Показано влияние наложенных пульсаций на характеристики течения в канале.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alekseenko S, Bilsky A, Heinz O, Ilyushin B, Markovich D (2003) Turbulent structure of excited axisymmetric impinging jet. Sedimentation and Sediment Transport. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0347-5>.
2. Hwang SD, Cho HH (2003) Effects of acoustic excitation positions on heat transfer and flow in axisymmetric impinging jet: main jet excitation and shear layer excitation. Int J Heat Fluid Flow 24(2):199–209. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(02\)00236-9](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(02)00236-9).
3. Karbaschi M, Javadi A, Bastani D, Miller R (2014) High frequency oscillatory flow in micro channels. Colloids Surf A460:355–360. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.03.062>.
4. Goulet A, Glasgow I, Aubry N (2005) Dynamics of microfluidic mixing using time pulsing. Discrete Contin Dyn Syst. <https://doi.org/10.3934/proc.2005.2005.327>.

5. Ma Y, Sun CP, Fields M, Li Y, Haake DA, Churchil BM, Ho CM (2008) An unsteady microfluidic T-form mixer perturbed by hydrodynamic pressure. *J. Micromech Microeng* 18(4):45015. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/4/045015>.
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. Ma Y, Sun CP, Fields M, Li Y, Haake DA, Churchil BM, Ho CM (2008) An unsteady microfluidic T-form mixer perturbed by hydrodynamic pressure. *J. Micromech Microeng* 18(4):45015. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/4/045015/>.
8. Kravtsova AY, Meshalkin YE, Bilsky AV (2017) Investigation of high frequency external perturbation effects on flow in a T-shape microchannel by μ LIF technique. *IOP J Phy Conf Ser* 925:012020–012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/925/1/012020>.

© *М. В. Каишкарлова, А. Ю. Кравцова, В. А. Павлов, 2024*