

## СМЕШЕНИЕ В МИКРОФЛЮИДИКЕ

Шишанов М.В., Кук Х.Г., Досов К.А., Яшунин Д.В., Большаков И.А., Морозов Н.В.

Шишанов Михаил Валентинович (ORCID 0000-0003-2861-5878), Кук Христофор Герман (ORCID 0009-0005-7115-6760), Досов Кирилл Алексеевич (ORCID 0009-0000-7243-691X), Яшунин Дмиртий Владимирович (ORCID 0009-0002-5741-3626), Большаков Иван Андреевич (ORCID 0009-0002-3600-2123), Морозов Никита Вячеславович (ORCID 0009-0001-4045-5355),  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
г. Москва, Россия. 125047, Московская область, г. Москва, Миусская площадь, 9.  
E-mail: shishanov.m.v@muctr.ru, kuk.khristofor@inbox.ru, FlowL4b@yandex.ru

*Настоящая статья посвящена исследованию особенностей смешения в области микрофлюидных технологий. Микрофлюидика (микрогидродинамика) – это наука, описывающая поведение малых (порядка микро и нанолитра) объемов и потоков жидкостей. Микрофлюидные реактора получили широкое распространение в различных областях науки: медицина, специальная химия, биохимия, ядерная химия и многие другие. Они пользуются успехом ввиду обеспечения повышенного массо- и теплообмена, лучшей интенсификации процесса и, как следствие, высокого выхода продукта. Наиболее важными элементами микрореакторов являются миксерная зона, которая обеспечивает дестабилизацию и закручивание потоков с целью их перемешивания, и реакционная зона (змеевидный канал), рассчитываемая в зависимости от кинетики конкретной реакции. Задачей текущего исследования является выявление наиболее эффективной геометрии смесительных ячеек пластинчатого микрореактора для обеспечения полного перемешивания реагентов, необходимого для дальнейшего протекания любых химических реакций. В данной статье рассмотрены основные формы ячеек микрореактора, определены их гидродинамические параметры в программе для компьютерного моделирования Comsol. Также предложен критерий эффективности смешения, основанный на данных на выходе из миксерной ячейки, на основании которого определены зависимости параметров смешения от формы ячейки. В рамках данной работы моделировали многофазную систему «жидкость-жидкость». Помимо этого, были проанализированы варианты исполнения миксерных зон, основанных на каскадном исполнении, предложена наиболее эффективная ячейка, наиболее близкая к модели реактора идеального смешения. Наиболее успешную геометрию необходимо реализовать путем обработки металла или стекла, с применением различных технологических операций. Проточная часть миксерной и реакционных зон может быть прорезанной, вырезанной в пластине, содержащей поток, углубленной в потоковую пластину, вдавленной в потоковую пластину, выгравированной в потоковой пластине, изготовлена с применением аддитивных технологий или полученным путем сочетания всего перечисленного согласно заданным технологиям.*

**Ключевые слова:** смешение, микромиксер, микрореактор, каскад смешения, ячейка, компьютерное моделирование

## MIXING IN MICROFLUIDICS

Shishanov M.V, Cook Ch.G., Dosov K.A., Yashunin D.V., Bolshakov I.A., Morozov N.V.

Shishanov Mikhail Valentinovich (ORCID 0000-0003-2861-5878), Cook Christopher German (ORCID 0009-0005-7115-6760), Dosov Kirill Alekseevich (ORCID 0009-0000-7243-691X), Yashunin Dmirty Vladimirovich (ORCID 0009-0002-5741-3626), Bolshakov Ivan Andreevich (ORCID 0009-0002-3600-2123), Morozov Nikita Vyacheslavovich (ORCID 0009-0001-4045-5355)  
Russian University of Chemical Technology DI. Mendeleev,  
Moscow, Russia. 125047, Moscow region, Moscow, Miusskaya square, 9.  
E-mail: kuk.khristofor@inbox.ru, FlowL4b@yandex.ru

*This article is devoted to the study of mixing features in the field of microfluidic technologies. Microfluidics (microhydrodynamics) is a science that describes the behavior of small (of the order of micro and nanoliters) volumes and flows of liquids. Microfluidic reactors are widely used in various fields of science: medicine, special chemistry, biochemistry, nuclear chemistry, and many others. They are successful due to the provision of increased mass and heat transfer, better intensification of the process and, as a result, a high product yield. Key words: mixing, micromixer, microreactor, mixing cascade, cell, computer simulation. The most important elements of microreactors are the mixing zone, which provides destabilization and swirling of the flows in order to mix them, and the reaction zone (serpentine channel), calculated depending on the kinetics of a particular reaction. The task of the current study is to identify the most efficient geometry of the mixing cells of a plate microreactor to ensure complete mixing of the reagents, which is necessary for the further occurrence of any chemical reactions. In this article, the main forms of microreactor cells are considered, their hydrodynamic parameters are determined in the Comsol computer simulation program. A mixing efficiency criterion is also proposed, based on the data at the outlet of the mixer cell, on the basis of which the dependences of the mixing parameters on the shape of the cell are determined. Within the framework of this work, a multiphase system "liquid-liquid" was modeled. In addition, the design options for mixing zones based on cascade design were analyzed, and the most efficient cell closest to the ideal mixing reactor model was proposed. The most successful geometry must be realized by processing metal or glass, using various technological operations. The flow part of the mixing and reaction zones can be slotted, cut into the plate containing the flow, recessed into the flow plate, pressed into the flow plate, engraved into the flow plate, manufactured using additive technologies, or obtained by a combination of all of the above according to specified technologies.*

**Key words:** mixing, micromixer, microreactor, mixing cascade, cell, computer simulation

#### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Задача создания идеального реактора смешения при проектировании конструкции проточных реакторов является одной из трудных и востребованных задач проектирования оборудования химических производств [1].

Численное моделирование проточного реактора смешения связано с необходимостью создания САЕ-модели реактора, учитывающей особенности гидродинамики проточной части, а также вязкостных свойств компонентов смеси [2].

Для модели идеального смешения принимается ряд допущений. Допускается, что в результате интенсивного перемешивания устанавливаются абсолютно одинаковые условия в любой точке реактора: концентрации реагентов и продуктов, степени превращения реагентов, температура, скорость химической реакции и т. д.

В работе [3] показано, что наиболее перспективным вариантом конструкции проточной части реактора смешения является каскадная схема реактора, в которой идентичные по форме элементарные ячейки смешения расположены последовательно друг за другом.

Цель настоящего исследования - подбор оптимальной геометрии миксерной зоны микрофлюидного реактора, максимально приближенного по своим критериям и характеристикам к реактору идеального смешения. На сегодняшний день существуют работы, посвященные данной теме,

однако они направлены на моделирование оптимальных условий для конкретной реакции и рассматривают стандартные смесевые зоны (как правило, Y или T образные) [1-3].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Разработка основных типов конструкции проточной части реактора – основные формы элементарной ячейки реактора (далее по тексту ячейка).

Определение основных гидродинамических параметров элементарной ячейки, а именно: скорость, давление (гидродинамическое сопротивление), максимальное значение градиента скорости, максимальное значение градиента давления, максимальное значение скорости сдвига в смеси. Выбор критерия оптимального смешения (далее по тексту КОС) в элементарной ячейке реактора.

Определение зависимости КОС от геометрических характеристик формы элементарной ячейки для каждого варианта формы ячейки.

Определение зависимости КОС от количества ячеек в каскаде проточного реактора.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала для исследования были использованы простейшие формы проточного канала в ячейке. Основным подход, применяемый при разработке формы канала, заключался в перемешивания компонентов смеси за счет создания встречных внутренних потоков в смеси за счет изменения вектора скорости жидкости вбли-

зи неподвижных стенок канала. Применяли принцип смещения входного и выходного сечения ячейки, а также использование внутренних неподвижных стенок – жиклеров, наличие которых приводило к локальному увеличению скорости движения смеси и изменению направления вектора скорости жидкости в канале.

Были выбраны следующие вариации ячеек:

1) «улитка» – простое осевое смещение друг относительно друга входного и выходного сечения (рис. 1а) [4];

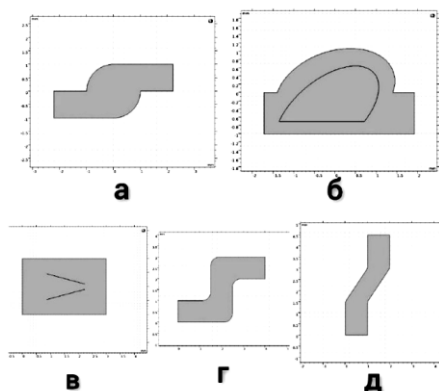


Рис. 1. Вариации ячеек  
Fig. 1. Cell Variations

2) «петля» – наличие в канале возвратного элемента, обеспечивающего встречное течение для большего перемешивания компонентов смеси (рис. 1б);

3) «жиклер» – наличие в канале ячейки неподвижной стенки или стенок, обеспечивающих локальное увеличение/уменьшение скорости течения компонентов смеси для их встречного перемешивания (рисунок 1в) [5];

4) «Вариации Z – образных ячеек», также обеспечивающих осевое смещение потоков и их дестабилизацию (рис. 1г-д) [6]. В рамках данного исследования, было проведено моделирование однофазного смешения двух компонентов «жидкость – жидкость», а именно «метанол-вода» в программе Comsol Multiphysics.

В данной работе не рассматривается влияние температуры на эффективность смешения, в связи с этим все исследования проводились при температуре 293,15 К. Входные данные для моделирования приведены в таблице 1.

В рамках CAE-моделирования необходимо произвести анализ проведен анализ сеточной сходимости. В рамках дискретизации геометрических моделей была построена расчетная сетка в программе Comsol с применением метода конечных элементов.

В результате проведенного анализа сеточной сходимости было обнаружено, что наиболее оптимальной сеткой для данных типов геометрий является

сетка высокой плотности с количеством элементов, равным 9900-10000 и значением минимального качества элемента от 0,6573 (рис. 2. 3).

Таблица 1.

Входные данные моделирования для всех ячеек  
Table 1. Simulation input data for all cells

Значение	Обозначение	Значение	Размерность
Площадь ячейки	S	6	мм <sup>2</sup>
Массовый расход на входе	$q_0$	$2.7778 \cdot 10^{-4}$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$
Концентрации реагентов	$c_1, c_2$	1	$\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$
Толщина канала	d	0.002	м

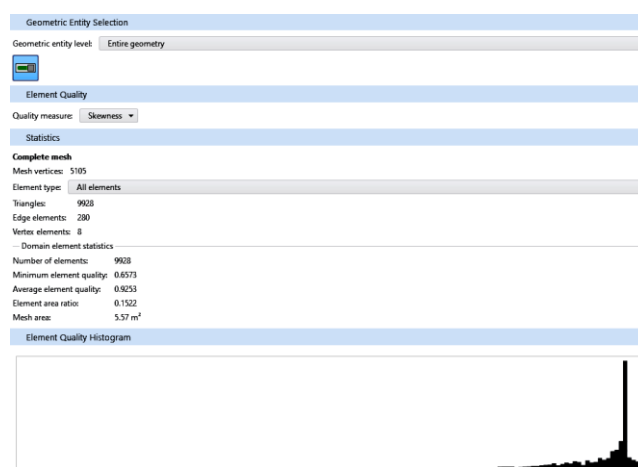


Рис.2. Качество сетки  
Fig. 2. Mesh quality

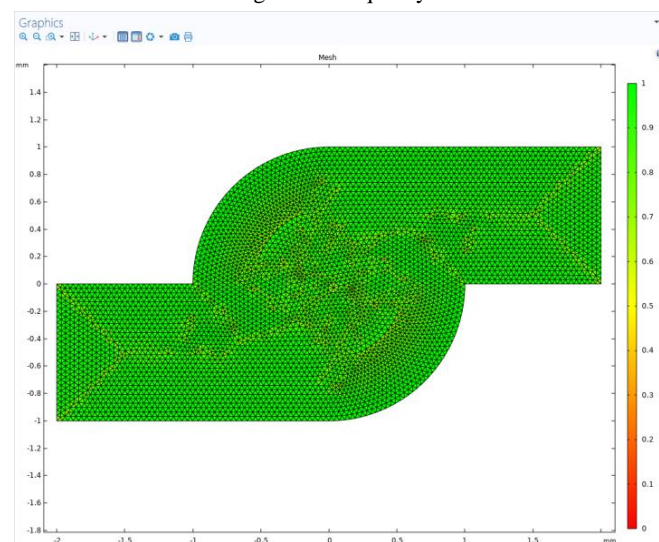


Рис.3. Визуализация качества сетки  
Fig. 3. Visualization of mesh quality

В рамках данной работы оценивали эффективность перемешивания без среднееквдратичного отклонения [7] и анализировали оптимальность ста-

тического смесителя по одному из компонентов (метанолу), основываясь на следующих критериях:

1) Критерий  $K$ , характеризующий одинаковое распределение молекул реагентов на выходе из простейшего статического смесителя – ячейки. Его формула (1) приведена ниже:

$$K = \frac{|0,5 - X_c^{max}| + |0,5 - X_c^{ave}| + |0,5 - X_c^{min}|}{3}, \quad (1)$$

где  $X_c^{max}$  - максимальное содержание мольной доли метанола на выходе из ячейки,  $X_c^{ave}$  - среднее содержание мольной доли метанола на выходе из ячейки,  $X_c^{min}$  - минимальное содержание мольной доли метанола на выходе из ячейки.

Таким образом, исходя из формулы выше, при идеальном смешении,  $K = 0$ .

2) Также немаловажен градиент скоростей, поэтому имеет место критерий, равный максимальной скорости в объеме ячейки  $V_{max}$ . Чем выше скорость в ячейке, тем лучше потенциал перемешивания. Однако следует учитывать, что в микрофлюидном процессе режим движения жидкости - ламинарный, со значением  $Re$  не более 2000 [8]. Таким образом, при вышеуказанных входных данных, значение скорости не должно превышать 0,89 м/с.

Для численного решения поставленных задач использовались следующие допущения:

Для расчета гидродинамики использовали модуль Comsol Laminar Flow. Интерфейс Laminar Flow (spf) используется для расчета полей скорости и давления для течения однофазной жидкости в режиме ламинарного течения. Течение остается ламинарным до тех пор, пока число Рейнольдса ниже определенного критического значения. Уравнения, решаемые интерфейсом Laminar Flow, представляют собой уравнения Навье-Стокса для сохранения импульса и уравнение неразрывности для сохранения массы (2)-(4):

$$\rho(u * \nabla)u = \nabla * [-p * I + K] + F \quad (2)$$

$$\rho \nabla * (u) = 0 \quad (3)$$

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $u$  – скорость,  $\nabla$  – оператор Набла,  $p$  – давление, оказываемое на частицу,  $I$  – единичная матрица,  $K$  – коэффициент Пуассона,  $F$  - внешние силы, которые мы применяем к жидкости,  $\mu$  - кинематическая вязкость,  $T$  – время. Здесь  $(u * \nabla)u$  - перемещение жидкости в пространстве. Для расчета особенностей химизма реагентов и смешения использовали модуль Chemistry совместно с модулем Transport of Diluted Species.

Интерфейс Transport of Diluted Species используется для расчета поля концентрации разбавленного растворенного вещества в растворителе. С помощью этого интерфейса можно управ-

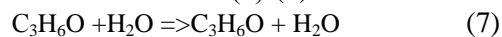
лять транспортом и реакциями веществ, растворенных в газе, жидкости или твердом теле. Движущими силами переноса могут быть диффузия по закону Фика, конвекция в сочетании с полем течения и миграция в сочетании с электрическим полем (5)-(6):

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot J_i + u \cdot \nabla c_i = R_i \quad (5)$$

$$J_i = -D \cdot \nabla c_i, \quad (6)$$

где  $c_i$  – мольная доля  $i$ -го компонента,  $t$  – время,  $\nabla$  – оператор Набла,  $J_i$  – диффузия по закону Фика,  $D$  – коэффициент диффузии,  $u$  – скорость.

Модуль «Chemistry» дополняет функционал базовой платформы COMSOL Multiphysics® позволяет пользователям формулировать, анализировать и редактировать уравнения химических реакций, а также уравнения, функции и переменные, описывающие кинетику реакций. Реакцию задавали в упрощенном виде, исключительно для моделирования массообмена (7)-(9).



$$r_i = k_j^f \prod_{j \in react} c^{-vij} \quad (8)$$

$$k^f = A^f * \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{n^f} * \exp\left(\frac{-E^f}{R_g * T}\right), \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент Аррениуса,  $A$  – коэффициент скорости реакции ( $1 \frac{м^3}{моль * с}$ ),  $E$  – энергия активации ( $1 \frac{Джоуль}{моль}$ ),  $n = 0$ ,  $T_{ref} = 1K$ .

Для упрощения расчетов модуль решателя разбили на два блока: стационарный (для гидродинамики - поскольку для поставленных задач механика переходных процессов нецелесообразна) и временной – для всего остального.

Для каждого блока использовался решатель AMG с настройками: нелинейный метод, упрощение сходимости - Iterations or tolerance; значение Relative Tolerance принимали 0,1 для упрощения расчетов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже (в табл. 2) представлены результаты моделирования, а именно: максимальное значение градиента скорости ( $V_{max}$ ), максимальное значение градиента давления ( $P_{max}$ ), максимальное значение скорости сдвига в смеси ( $Sr_{max}$ ).

Таблица 2.

Результаты моделирования  
Table 2. Simulation results

Тип ячейки	$V_{max}$ , м/с	$P_{max}$ , Па	$Sr_{max}$ , $c^{-1}$
Улитка	0.45	53.56	$1.4 * 10^4$
Z-45	0.45	45.21	$8 * 10^3$
Z-90	0.5	99.12	$1.4 * 10^4$
Петля	0.6	272.5	$3 * 10^4$
Жиклер	0.35	47.5	$1 * 10^4$

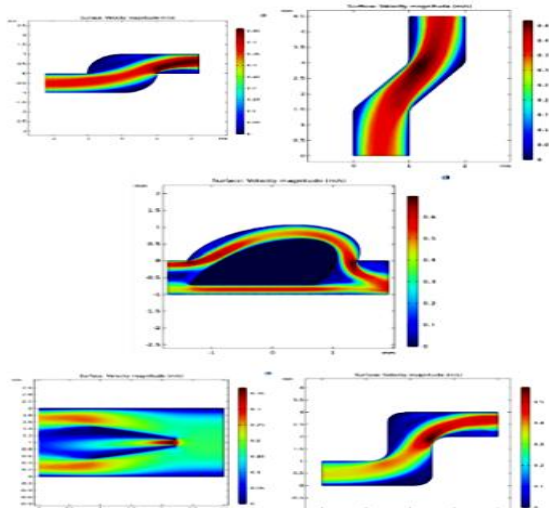


Рис. 4. Градиент скоростей в ячейках  
Fig. 4. Velocity gradient in cells

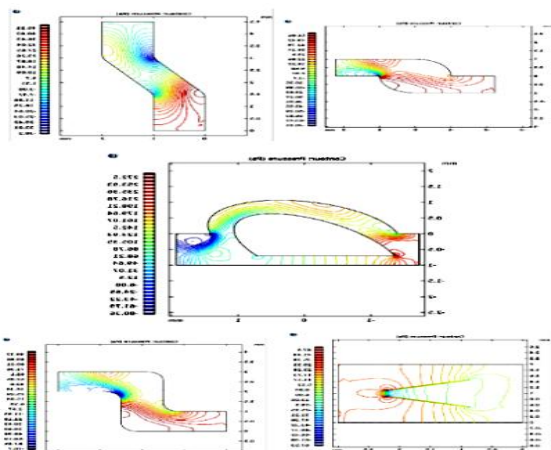


Рис. 5. Градиент давлений в ячейках  
Fig. 5. Pressure gradient in cells

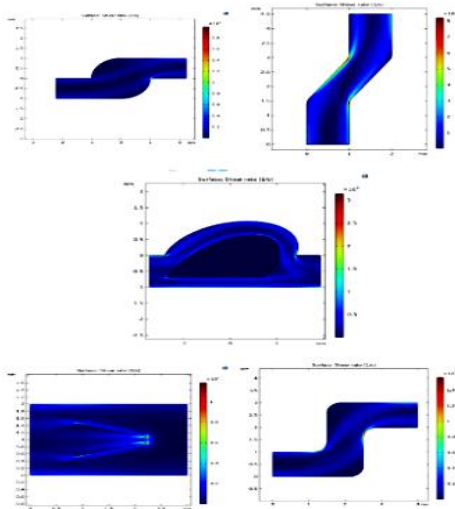


Рис. 6. Градиент сдвига в ячейках  
Fig. 6. Shear gradient in cells

Как видно из таблицы выше, наиболее эффективной ячейкой является вариация Z-образной ячейки под углом 90 градусов. Вторыми по эффективности являются ячейки «жиклер» и «улитка». Значение скорости сдвига у данных ячеек, а также значения локальных увеличений скоростей, так же велико, что говорит о дестабилизации потоков реагентов, обеспечивающее их улучшенное перемешивание. Тип ячейки «петля», отличается повышенным перепадом давлений, что обусловлено наличием возвратного элемента, значительно сужающего зону проточную зону ячейки.

Как видно из результатов моделирования (рис. 4-6), наличие большого количества поворотных зон, преград, и отсутствие скруглений приводят к увеличению скорости и величины сдвига слоев жидкости относительно друг друга.

Однако, с целью улучшения эффективности перемешивания и использования всех преимуществ миксерной зоны, используют каскад статических смесителей путем последовательного включения в технологическую схему нескольких ячеек [9].

В данной работе проводилось исследование каскадов с учетом допущения об отсутствии возвратного влияния: каждая последующая ячейка не влияет на предыдущую. Моделировались все ячейки с увеличением их количества до 10.

Результаты проведенных исследований приведены ниже. При проведении испытания обнаружилось, что максимальная скорость в каскаде остается постоянной при наращивании ячеек (рис. 7).

Таблица 3.

Значения КОС для одной ячейки  
Table 3. CBS values for one cell

Тип ячейки	$X_c^{min}$	$X_c^{max}$	$X_c^{ave}$	K
Улитка	0,020	0,963	0,594	0,346
Петля	0,000	1,000	0,285	0,405
z-90	0,090	0,950	0,630	0,330
z-45	0,000	1,000	0,554	0,351
жиклер	0,000	1,000	0,480	0,340

При использовании каскадного подхода, лидером является ячейка Z-90. Более того, значение критерия K при 10 последовательно соединенных ячеек равно нулю, что означает идеальное перемешивание. Такой тип смесевой зоны является моделью идеального смешения, в котором на заключительном этапе смешения можно достичь одинаковых параметров в любой точке реактора.

Ячейка «улитка» при каскадном исполнении показала большую эффективность по сравнению с остальными ячейками при одинаковом количестве элементов каскада и также может быть использована для получения наиболее эффективного результата (рис. 8).

Ячейка «жиклёр», напротив, показала полную неэффективность при наращивании и может

быть использована исключительно в качестве дополнительного самостоятельного элемента смешения. Также исследования показали, что максимальная скорость внутри ячейки не меняется с изменением количества последовательно соединенных ячеек. Перепад давления же, напротив, при добавлении ячеек значительно увеличивается, ввиду увеличения количества местных сопротивлений.

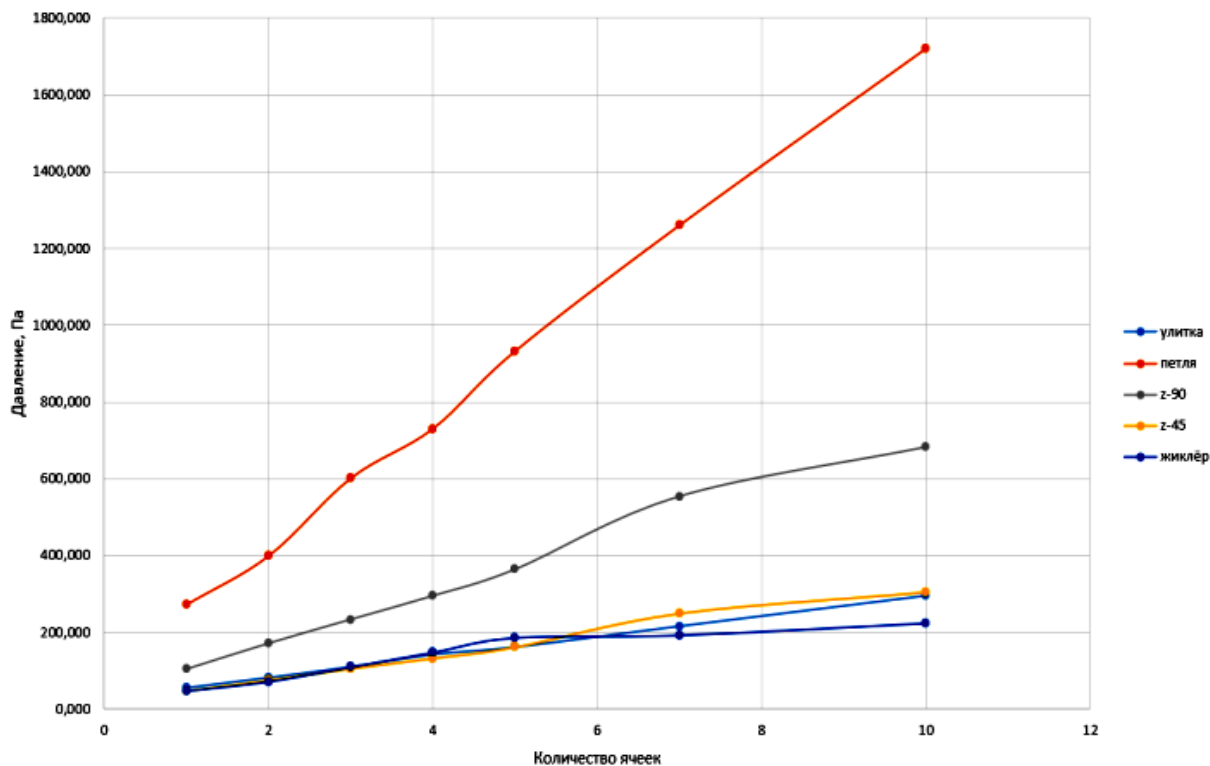


Рис. 7. Зависимость потери давления от количества ячеек  
Fig. 7. Зависимость потери давления от количества ячеек

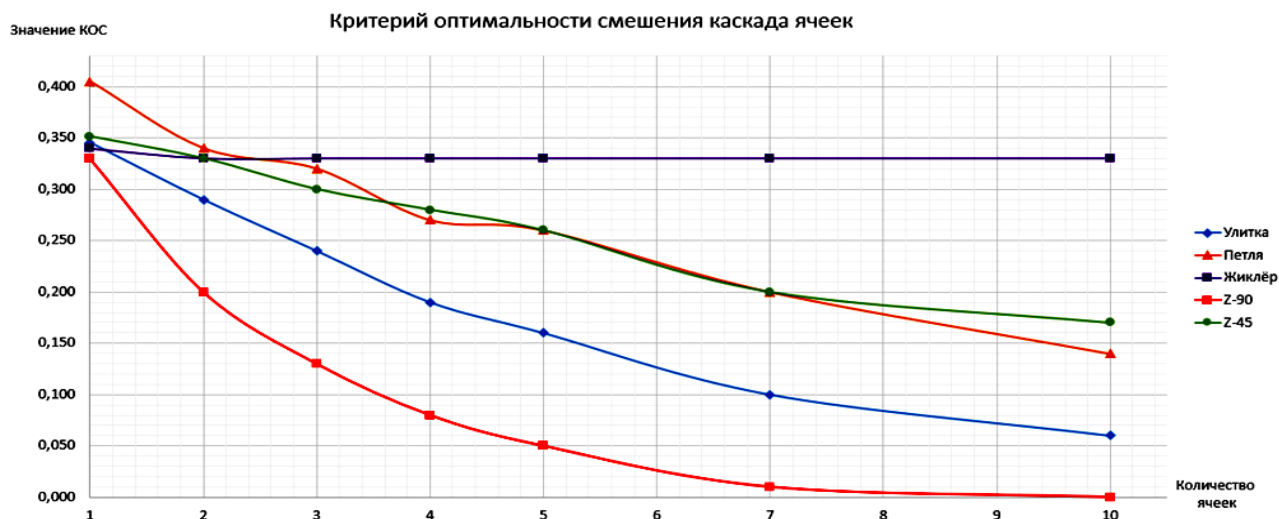


Рис. 8. Значения КОС в каскадах ячеек  
Fig. 8. CBS values in cascades of cells

ВЫВОДЫ

Наиболее важными параметрами микрореакторов являются эффективное перемешивание и возможность обеспечения изотермического процесса (идеального нагрева) [10].

В данной статье были предложены критерий эффективности оптимального смешения и ячейки, позволяющие обеспечить роль миксерной зоны в различных типах проточных микрореакторов. В результате исследований, удалось выявить наиболее эффективный статической смеситель и проанализировать зависимость эффективности смешения от увеличения последовательно соединенных ячеек в каскадах, служащих миксерной зоной в указанных реакторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anton Enders, Ina G. Siller, Katharina Urmann, Michael R. Hoffmann, Janina Bahnemann. 3D Printed Microfluidic Mixers-A Comparative Study on Mixing Unit Performances. *Small*. 2018. Vol. 15. N 2. DOI: 10.1002/sml.201804326.
2. Bappa Mondal, Sumit Kumar Mehta, Promod Kumar Patowari, Sukumar Pati. Numerical study of mixing in wavy micromixers: comparison between raccoon and serpentine mixer. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2019. Vol. 138. P.44-61. DOI: 10.1016/j.cep.2018.12.011.
3. Timm Steffen Severin, Andreas Christoph Apel, Thomas Brück, Dirk Weuster-Botz. Investigation of vertical mixing in thin-layer cascade reactors using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 132. P. 436-444. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.01.036.
4. Norbert Josef Kockmann. Continuous reaction microreactor. Patent US N 9302243B2. 2016.
5. Friedrich Kapfhammer. Stationary mixer. Patent DE N 3738473A1. 1989.
6. Alexander Schilling, Klaus Kadel, Markus Schneider. Microreactor. Patent DE N 102020124280A1. 2021.
7. Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Оценка эффективности статических смесителей насадочного типа. *Вестник КГЭУ*. 2011. №4: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka>
8. Ayman Karim, Jaime Bravo, David Gorm, Travis Conant, Abhaya Datye. Comparison of wall-coated and packed-bed reactors for steam reforming of methanol. *Catalysis Today*. 2005. Vol. 110. P. 86-91. DOI: 10.1016/j.cattod.2005.09.010.
9. Imran Shah, Soo Wan Kim, Kyunghwan Kim, Yang Hoi Doh, Kyung Hyun Choi. Experimental and numerical analysis of Y-shaped split and recombination micro-mixer with different mixing units. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 358. P. 691-706. DOI: 10.1016/j.cej.2018.09.045.
10. Adama A. Bojang, Ho-Shing Wu. Design, Fundamental Principles of Fabrication and Applications of Microreactors. *Processes*. 2020. Vol. 8. P. 891. DOI: 10.3390/pr8080891.

Авторы выражают признательность руководству Передовой инженерной школы химического инжиниринга и машиностроения РХТУ им. Д.И. Менделеева, а также лично Еремину Владиславу Борисовичу, главному специалисту центра цифровой трансформации РХТУ им. Д. И. Менделеева за оказанную помощь при проведении данного исследования и написания настоящей статьи.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

REFERENCES

1. Anton Enders, Ina G. Siller, Katharina Urmann, Michael R. Hoffmann, Janina Bahnemann. 3D Printed Microfluidic Mixers-A Comparative Study on Mixing Unit Performances. *Small*. 2018. Vol. 15. N 2. DOI: 10.1002/sml.201804326.
2. Bappa Mondal, Sumit Kumar Mehta, Promod Kumar Patowari, Sukumar Pati. Numerical study of mixing in wavy micromixers: comparison between raccoon and serpentine mixer. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2019. Vol. 138. P. 44-61. DOI: 10.1016/j.cep.2018.12.011.
3. Timm Steffen Severin, Andreas Christoph Apel, Thomas Brück, Dirk Weuster-Botz. Investigation of vertical mixing in thin-layer cascade reactors using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 132. P. 436-444. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.01.036.
4. Norbert Josef Kockmann. Continuous reaction microreactor. Patent US N 9302243B2. 2016.
5. Friedrich Kapfhammer. Stationary mixer. Patent DE N 3738473A1. 1989.
6. Alexander Schilling, Klaus Kadel, Markus Schneider. Microreactor. Patent DE N 102020124280A1. 2021.
7. Farakhov T.M., Laptev A.G. Evaluation of the efficiency of packed-type static mixers. *Bulletin of KSEU*. 2011. N 4.: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka>
8. Ayman Karim, Jaime Bravo, David Gorm, Travis Conant, Abhaya Datye. Comparison of wall-coated and packed-bed reactors for steam reforming of methanol. *Catalysis Today*. 2005. Vol. 110. P. 86-91. DOI: 10.1016/j.cattod.2005.09.010.
9. Imran Shah, Soo Wan Kim, Kyunghwan Kim, Yang Hoi Doh, Kyung Hyun Choi. Experimental and numerical analysis of Y-shaped split and recombination micro-mixer with different mixing units. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 358. P. 691-706. DOI: 10.1016/j.cej. 2018.09.045.
10. Adama A. Bojang, Ho-Shing Wu. Design, Fundamental Principles of Fabrication and Applications of Microreactors. *Processes*. 2020. Vol. 8. P. 891. DOI: 10.3390/pr8080891.

Поступила в редакцию 24.09.2023  
Принята к опубликованию 28.10.2023

Received 24.09.2023  
Accepted 28.10.2023