

УДК 66.023.2

Двухступенчатый микрореактор с закрученными потоками жидкости: сравнение гидродинамики и качества микросмешения для различных способов подачи жидкости в микроаппарат

Макушева И.В. (СПбГТИ(ТУ))

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Абиев Р.Ш. (СПбГТИ(ТУ))

Введение:

В современном мире всё большую популярность набирает использование микроструктурированных реакторов в химической промышленности. Использование микрореакторов позволяет лучше управлять процессами тепло- и массопереноса, взаимодействовать с частицами микромасштаба (пузырьками, капельками).

В отличие от традиционного «капельного» метода (прямого или обратного соосаждения), в микрореакторном синтезе растворы солей и осадителя подаются с равными (или сопоставимыми) расходами [1].

Существенными преимуществами микрореакторов являются: компактность, высокие коэффициенты тепло- и массопереноса, развитые удельные поверхности контакта фаз, узкое распределение времени пребывания фаз в аппарате и обусловленная этим высокая селективность реакций, высокое качество перемешивания жидкости.

Целью данной работы является сопоставление трёх способов подачи жидкости в двухступенчатый микрореактор с интенсивно закрученными потоками жидкости (микро-ВСА-2), разработанный на кафедре ОХБА СПбГТИ(ТУ) для определения наиболее эффективного метода получения наноразмерных частиц.

Основная часть:

Предлагаемое решение – двухступенчатый микрореактор с закрученными потоками жидкости (микро-ВСА-2) [2].

Микро-ВСА2 состоит из корпуса, патрубков для подачи растворов в аппарат и патрубка для вывода продуктов из аппарата. Корпус состоит из двух ярусов, расположенных соосно по отношению друг к другу. К верхнему ярусу аппарата крепятся один соосный центральный и два тангенциальных патрубка (далее обозначаются как верхние тангенциальные патрубки) для ввода растворов в аппарат. К нижнему ярусу аппарата крепятся два тангенциальных патрубка (далее обозначаются как нижние тангенциальные патрубки) для ввода растворов в аппарат. Между собой верхний и нижний ярусы и нижний ярус и патрубок для вывода продукта из аппарата соединены узкими цилиндрическими горловинами с внутренними диаметрами $d_{\text{Uneck}} = 2,4$ мм и $d_{\text{Lneck}} = 6$ мм.

Расположение патрубков тангенциально к камере смешения обеспечивает закрутку потоков, которая в свою очередь позволяет достичь более высоких показателей микросмешения.

Проводили две серии экспериментов: 1 – исследование качества микросмешения в микро-ВСА-2 по йодид-иодатной методике, основанной на системе конкурентных параллельных реакций [3]; 2 – исследование гидродинамики в микро-ВСА.

Для выявления особенностей гидродинамики исследуемого аппарата было проведено несколько серий численных расчетов с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics v. 5.6 (модуль Turbulent Flow, SST).

Численное моделирование проводилось с помощью следующих модулей программного обеспечения COMSOL Multiphysics v. 5.6: (i) Turbulent Flow module, $k-\varepsilon$; (ii) Turbulent Flow module, $k-\omega$; (iii) Turbulent Flow module, SST; (iv) Turbulent Flow module, Low Re $k-\varepsilon$; (v) Turbulent Flow module, L-VEL; (vi) Turbulent Flow module, Realizable $k-\varepsilon$. Все шесть модулей дали одинаковые результаты; для дальнейших расчетов был выбран третий из них.

Обе серии экспериментов и численные расчёты были проведены для трёх способов подачи жидкости в микро-ВСА-2:

а) через верхний тангенциальный и центральный патрубки (TU+C);

b) через два верхних тангенциальных патрубка (TU+TU), расположенных друг напротив друга;

c) через верхний и нижний тангенциальные патрубки (TU+TL).

Удельную скорость диссипации энергии ϵ условно принято считать единой характеристикой смесителей, определяющей как качество микросмешения [5], так и затраты энергии на подачу растворов. Чем выше значение скорости диссипации энергии ϵ , тем лучше идут процессы перемешивания. Вместе с тем, ϵ не является однозначным фактором, определяющим качество микросмешения [4]

В данной работе рассматривается система с двумя входными патрубками и одним выходным патрубком. Для определения удельной скорости диссипации в такой системе было выведено уравнение Бернулли специального вида, благодаря которому удалось определить мощность, затрачиваемую на перемешивание [5].

Заключение:

Оптимальным способом подачи растворов в микро-ВСА2 является способ TU+C – в этом случае наблюдаются наименьшие значения индекса сегрегации $X_{S(TU+C)} = 1.89 \times 10^{-3} \dots 1.10 \times 10^{-2}$ при наибольших значениях удельной скорости диссипации энергии $\epsilon_{(TU+C)} = 2.30 \dots 41.25$ кВт/кг.

Из трёх способов подачи растворов в микро-ВСА2 по качеству микросмешения наихудшим является способ TU+TU ($X_{STU+TU} = 7.17 \times 10^{-3} \dots 8.50 \times 10^{-2}$). Это можно объяснить тем, что смешение происходит в объёме верхней камеры, а не в горловине, как при способе TU+C, а так же, тем, что оба потока имеют сравнительно низкую скорость, в отличие от способа TU+TL ($X_{STU+TL} = 1.31 \times 10^{-2} \dots 5.80 \times 10^{-2}$), где смешение так же происходит в камере микроаппарата, а не в горловине, но один из потоков приходит к зоне смешения, наделённый большей скоростью.

Численные расчёты показали, что в микро-ВСА-2 (TU+C) при подаче жидкости с общим расходом $Q_2 = 7,0$ л/мин осевая скорость в зоне смешения достигает 34 м/с. При методе подачи TU+C в микро-ВСА-2 наибольший вклад в общую скорость вносит осевая составляющая скорости u_z , тогда как вклад радиальной и тангенциальной составляющих невелик.

Список использованных источников:

1. Абиев Р.Ш. Влияние макро- и микросмешения на процессы растворного синтеза частиц оксидных материалов в микроаппаратах с интенсивно закрученными потоками/ Р.Ш. Абиев, И.В. Макушева// Теоретические основы химической технологии, 2022. - том 56, № 2. - С. 137-147.

2. Абиев Р.Ш. Патент РФ №2748486. Микрореактор-смеситель многоступенчатый с закрученными потоками. Заявка: 2020111799, 20.03.2020. Опубликовано: 26.05.2021 Бюл. № 15

3. Fournier C. A new parallel competing reaction system for assessing micromixing efficiency - experimental approach/ C. Fournier, L. Falk, J. Villermaux// Chem. Eng. Sci. – 1996. – V. 22. – P. 5053-5064.

4. Falk, L.; Commenge, J.-M. Performance comparison of micromixers. Chem Eng. Sci. 2010, 65, 405-411.

5. Abiev R.Sh., Makusheva I.V. Energy Dissipation Rate and Micromixing in a Two-Step Micro-Reactor with Intensively Swirled Flows. Micromachines 2022, V. 13, Iss. 11, 1859.

Автор _____ Макушева И.В.

Научный руководитель _____ Абиев Р.Ш.