

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ В МИКРОФЛИДНОМ ИСПОЛНЕНИИ
НА ПРИМЕРЕ ОКИСЛЕНИЯ ПАРА КСИЛОЛА****Шишанов М.В., Досов К.А., Кук Х.Г., Геворкян Э.Л.**

Шишанов Михаил Валентинович (ORCID 0000-0003-2861-5878), Досов Кирилл Алексеевич (ORCID 0009-0000-7243-691X), Кук Христофор Герман (ORCID 0009-0005-7115-6760), Геворкян Элиза Липаридовна (ORCID 0009-0005-4510-5046)
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, dosovkirill@yandex.ru, kuk.khristofor@inbox.ru, elia.gevorkyan15@mail.ru

В данной работе представлена разработка методики для проведения окислительных реакций в микрофлюидных системах, направленная на повышение их эффективности и безопасности. В качестве модельного процесса выбрано окисление пара ксилола. В рамках исследования был проведён многофакторный эксперимент, в котором исследованы влияния различных факторов, таких как температура, соотношение реагентов и выбор окислителя. На основании вышеперечисленных параметров, построены «тепловые карты», которые позволили определить оптимальные условия для протекания реакции. Использование микрофлюидных технологий позволило существенно снизить риски, присущие традиционным методам окисления, где часто используются высокие температуры до 800 °С, повышенное давление (до 30 атмосфер) и существует значительная опасность возникновения пожаров и взрывов. Микрофлюидные устройства обеспечивают более точный контроль над параметрами реакции, что позволяет проводить окисление при более мягких условиях. Это способствует минимизации побочных реакций, улучшению управляемости процессом и повышению безопасности. Разработанная методика не только создает безопасные условия для проведения окислительных реакций, но и делает процесс более энергоэффективным и экологически безопасным. Это является важным аспектом для дальнейшего промышленного применения. Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал микрофлюидных технологий как для лабораторного, так и для промышленного масштабов. Методика может быть адаптирована к различным окислительным процессам, что открывает возможности для синтеза производных п-ксилола и других органических соединений, обеспечивая универсальность и широкую применимость подхода в химической промышленности.

Ключевые слова: малотоннажная химия, технология микрореакций, типовой процесс окисления, микрофлюидика, многофакторный эксперимент, оптимальные параметры процесса, окисление п-ксилола

**RESEARCH OF THE OXIDATION PROCESS IN MICROFLUIDIC SYSTEM USING
THE EXAMPLE OF PARAXYLENE OXIDATION****Shishanov M.V., Dosov K.A., Cook H.G., Gevorkyan E.L**

Shishanov Mikhail Valentinovich (ORCID 0000-0003-2861-5878), Dosov Kirill Alekseevich (ORCID 0009-0000-7243-691X), Cook Christopher German (ORCID 0009-0005-7115-6760), Gevorkyan Eliza Liparidovna (ORCID 0009-0005-4510-5046)
Russian University of Chemical Technology DI. Mendeleev,
Moscow, Russia. 125047, Moscow region, Moscow, Miusskaya square, 9.
E-mail: shishanov.m.v@muctr.ru, dosovkirill@yandex.ru, kuk.khristofor@inbox.ru, elia.gevorkyan15@mail.ru

This paper presents the development of a methodology for oxidation reactions in microfluidic systems, aimed at improving their efficiency and safety. The oxidation of xylene vapor was chosen as a model process. As part of the study, a multifactorial experiment was conducted in which the effects of various factors such as temperature, component ratio and oxidant selection were investigated. Based on the above parameters, heat maps were constructed to determine the optimum conditions

for the reaction to proceed. The use of microfluidic technologies has significantly reduced the risks inherent in traditional oxidation methods, where high temperatures (to 800 °C), high pressure (to 30 atmospheres) are often used, and there is a significant risk of fires and explosions. Microfluidic devices provide more precise control over the reaction parameters, which allows oxidation to be carried out under milder conditions. This helps to minimize adverse reactions, improve process manageability and increase safety. The developed technique not only creates safe conditions for carrying out oxidative reactions, but also makes the process more energy efficient and environmentally friendly. This is an important aspect for further industrial applications. The results obtained demonstrate the significant potential of microfluidic technologies for both laboratory and industrial scales. The technique can be adapted to various oxidative processes, which opens up opportunities for the synthesis of derivatives of p-xylene and other organic compounds, providing versatility and wide applicability of the approach in the chemical industry.

Keywords: fine chemicals, microreaction technology, typical oxidation process, microfluidics, multi-factorial experiment, optimal process parameters, oxidation of p-xylene

ВВЕДЕНИЕ

Процесс окисления в органическом синтезе заключается в увеличении степени окисления органических молекул путём введения атомов кислорода или удаления атомов водорода [1].

Окисление является ключевым процессом, используемым для преобразования органических соединений в различные функциональные группы, такие как карбонильные молекулы (кетоны, альдегиды), карбоксильные вещества (кислоты), эпоксидные соединения и др.

Все это позволяет получать необходимые химические продукты и полупродукты для самых различных областей науки и промышленности. Начиная от крупнотоннажного производства различных полимеров и композитов (прим. полиэтилентерефталат), заканчивая специальной химией и фармацевтическими продуктами (прим. активные фармацевтические ингредиенты, микрокапсулы и средства доставки лекарств). А широкий выбор окислителей и катализаторов позволяет создать условия для производства конкретного вещества с высокой степенью чистоты.

Окисление, как правило, происходит по радикальному механизму [2] и является многофазным процессом, который имеет ряд недостатков: взрыво- и пожароопасность, токсичность и агрессивность исходных реагентов, сложность контроля процесса и его масштабируемости. Что обуславливает ряд сложностей при аппаратурном оформлении и выдвигает особые требования к подбору оборудования и технологии.

В свою очередь микрофлюидные реактора – это современный тип проточных реакторов, который основан на применении каналов малого диаметра (от 0,5 до 2 мм) [3–5]. За счет небольшого внутреннего объема и высокой площади поверхности происходит значительное повышение

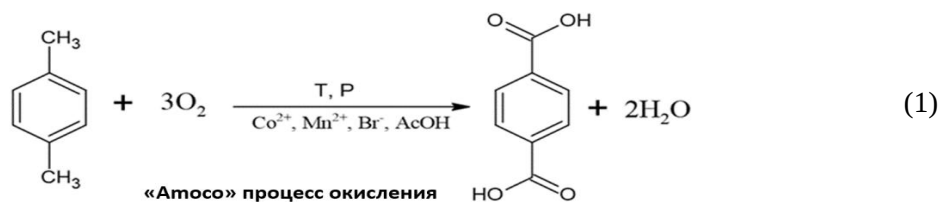
массо- и теплообмена, что положительно влияет на выход процесса и повышение селективности [4]. Также стоит отметить высокую точность контроля температуры, давления и скорости потоков, площади межфазной поверхности, что позволяет получать результаты с более высокой степенью воспроизводимости [6–17]. Миниатюрные размеры оборудования и малые объемы реагентов значительно уменьшают риск взрывов, утечек и других аварийных ситуаций при работе с агрессивными или токсичными веществами [3–4]. Также стоит отметить значительное повышение скорости массообмена: на 1 – 2 порядка выше, чем в традиционных многофазных аппаратах (барботажная колонна, насадочная колонна, распылительная колонна, емкостной реактор, автоклав) [7–8].

Все эти особенности данной технологии могут снизить влияние рисков аварий во время процесса окисления, а также подобрать более «мягкие» условия для проведения процесса [2].

Для отработки процесса было выбрано окисление молекулы п-ксилола методом «Атосо» [1–2]. Брутто-реакция, а также промежуточные продукты каждого этапа окисления представлены данного процесса представлены ниже. Таким образом, цель данной работы – проведение и отработка процесса окисления в микрофлюидном оборудовании, а также поиск оптимальных условий проведения данного синтеза.

Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- собрать микрофлюидную проточную установку для проведения процесса окисления п-ксилола;
- провести реакцию окисления п-ксилола в микроканале;
- варьировать различные параметры процесса для определения оптимальной методики окисления в микроканале.



МЕТОДЫ

Исходные материалы

Все реагенты были приобретены в следующих компаниях: уксусная кислота лед. 99,8 % и перекись водорода, 37 % (марка А) – «Русский Химик»; п-Ксилол (чда) – АО «ЛенРеактив»; кобальт (II) уксуснокислый 4-водный чда, марганец (II) уксуснокислый чда и калий бромистый ч – «Реактив Экспресс».

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве целевого параметра оценки эффективности методики окисления был выбран следующий фактор: наличие пиков ЯМР-13С, соответствующих окисленным продуктам реакции имеющих строение $\text{C}_6\text{H}_5\text{-C-X}$ (X – гидроксильная, альдегидная и карбоксильная) при бензольном кольце. Все исходные вещества и продукты реакции предварительно растворяли в хлороформе-D (0,1 мл вещества – 1 мл растворителя) и исследовали на ЯМР-спектраторе Bruker 600 MHz WB Avance III.

Пример снятого ЯМР-спектратора, свидетельствующего о наличии окисленных веществ в продуктах реакции представлен на рис. 1.

В качестве второго целевого параметра оценки эффективности технологии были выбраны эксплуатационные свойства технологической линии, которые включают в себя стабильность реакционного газожидкостного потока, отсутствие колебаний и запылений потока. Каждому критерию присваивалось относительное значение 0 или 1 (то есть «0» при наличии эксплуатационных проблем и «1» при стабильной работе во время всего технологического процесса).

Оборудование

Микрокапиллярный проточный реактор, представляющий из себя капилляр 1/16 дюйма (с внутренним диаметром 0,75 мм), шприцевой насос SPLab01 (объем шприца 150 мл.), воздушный компрессор AP-980, высокотемпературная печь для нагрева, контроллер температуры TPM210.

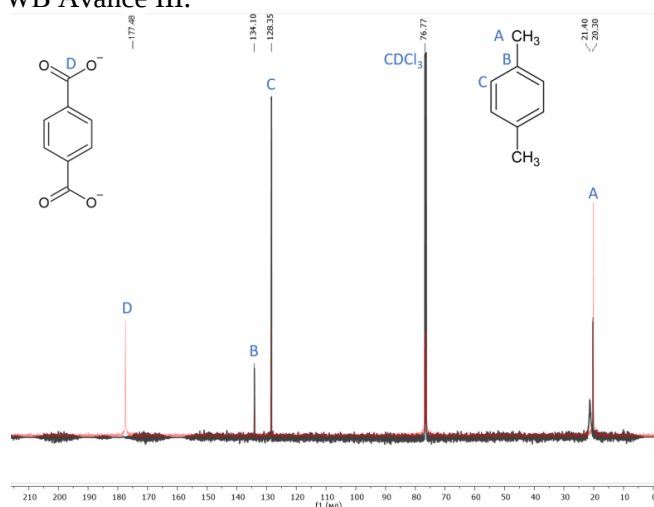


Рис. 1. Спектр ЯМР-13С исходной реакционной массы (серый цвет) и продуктов реакции (красный цвет) с наличием характерного пика аниона карбоксильной группы при бензольном кольце [16]

Fig. 1. NMR-13C spectrum of the initial reaction mass (gray) and reaction products (red) with the presence of a characteristic peak of the carboxyl group anion at the benzene ring [16]

Методика

Для отработки методики окисления в микрофлюидном исполнении была собрана технологическая линия проточного типа, в которой в качестве реактора выступала стальная капиллярная трубка длиной 3 м и внутренним диаметром 0,75 мм. Само же перемешивание исходного реакционного потока и потока окислителя (воздух/пероксид водорода) происходило в Т-образном тройнике с внутренним диаметром 0,75 мм.

Для повышения стабильности потоки были расположены перпендикулярно друг другу, а направление реакционного потока совпадало с направлением исходного потока жидкости.

Для отработки процесса окисления кислородом воздуха была собрана следующая технологическая линия (рис. 2), которая включает в себя: 1 – шприцевой насос (SPLab01); 2 – воздушный компрессор (AP-980); 3 – тройник для смешивания потоков; 4 – микрофлюидный реактор (капиллярная трубка DN 0,75 мм); 5 – кварцевая трубка; 6 – высокотемпературную печь; 7 – термopара; 8 – контроллер TPM210; 9 – емкость продукта с обратным холодильником.

Для отработки процесса окисления пероксидом водорода компрессор был заменён на шприцевой насос – SPLab01 (рис. 3).

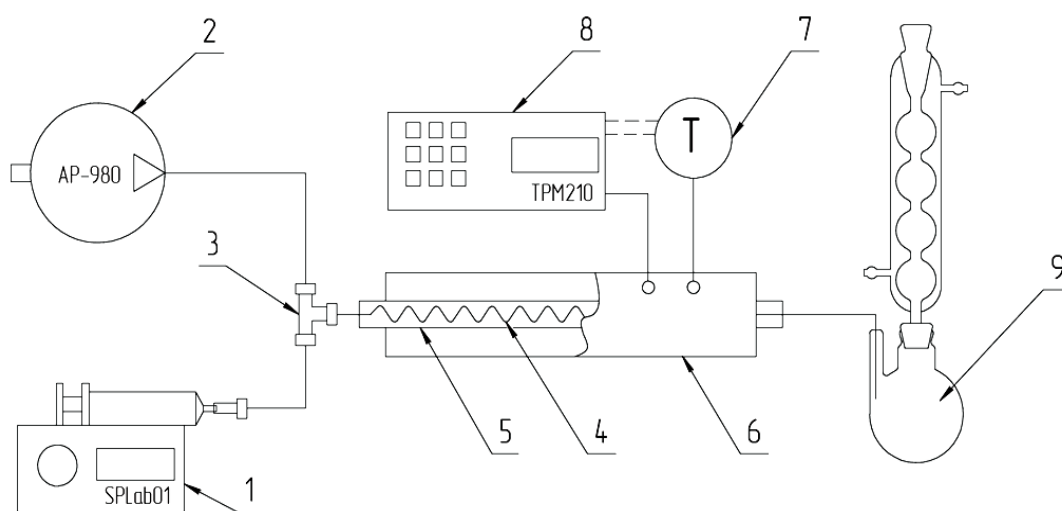


Рис. 2. Технологическая схема установки процесса окисления кислородом воздуха
Fig. 2. Technological scheme of the installation of oxidation-process using oxygen from air

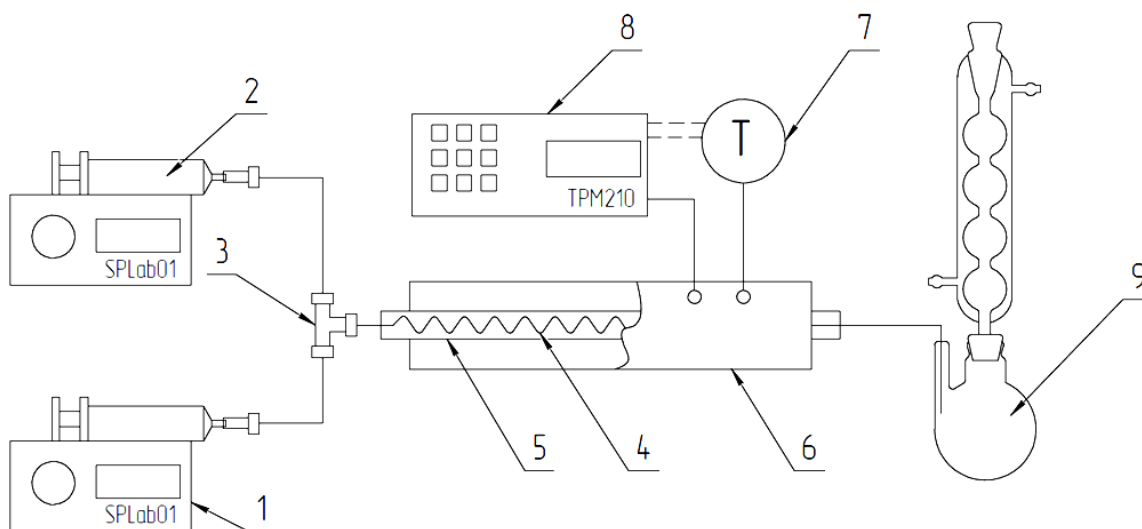


Рис. 3. Технологическая схема установки процесса окисления пероксидом водорода
Fig. 3. Technological scheme of the installation of oxidation-process using hydrogen peroxide

Таблица 1

Состав реакционной массы и соотношение реагентов
Table 1. Composition of the reaction mass and ratio of reagents

Компонент	CAS	Масс.ч.
уксусная кислота	64-19-7	100
п-ксилол	106-42-3	10
кобальт уксусноокислый II 4-водный	6147-53-1	0,24
Марганец уксусноокислый II 4-водный	6156-78-1	0,024
бромид калия	7758-02-3	0,11

Предварительно была приготовлена исходная реакционная масса со следующими соотношениями компонентов (табл. 1). Также были рассчитаны минимальные мольные соотношения потоков для проведения синтеза: для процесса поток реагентов/воздух - 1/310 (мл/мин), поток реагентов/пероксид водорода-37% - 1/0,5 (мл/мин) соответственно. Для разработки эффективной методики лабораторного синтеза были проведены следующие серии экспериментов с различными окислителями, в которых изменяли температуру процесса и расходы реагентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После проведения всех экспериментов была получены две матрицы экспериментов, эффективность которых сравнивались по ранее описанным критериям (табл. 2). Для более наглядного и понятного отображения эффективности методики были составлены «тепловые карты» каждой матрицы экспериментов при различных условиях и с различными окислителями для каждого целевого параметра (рис. 3 и 4):

Таблица 2

Матрица экспериментов при окислении кислородом воздуха и пероксидом водорода
Table 2. A matrix of experiments of oxidation-process using oxygen from air and hydrogen peroxide

№	Параметр-1 (Температура), °C	Параметр-2 (Расход окислителя на расход потока реакционной массы (1 мл/мин), мл/мин	Целевой параметр-1 (Наличие пика ЯМР-13C)	Целевой параметр-2 (экспл. св-ва)
Окислитель – воздух				
1	170± 5	310	0*	0°
2	170± 5	1000	1	1
3	170± 5	2000	0*	0 ^{oo}
4	200± 5	310	0*	0°
5	200± 5	1000	1	1
6	200± 5	2000	0*	0 ^{oo}
7	400± 10	310	1	0°
8	400± 10	1000	0**	0°
9	400± 10	2000	0*	0°
Окислитель – пероксид водорода				
10	100 ± 5°C	0,5	0*	1
11	100 ± 5°C	1	0*	1
12	100 ± 5°C	2,5	0*	1
13	200 ± 5°C	0,5	1	1
14	200 ± 5°C	1	1	0°
15	200 ± 5°C	2,5	1	0°
16	400 ± 10°C	0,5	0**	0°
17	400 ± 10°C	1	0**	0°
18	400 ± 10°C	2,5	0**	1

* – отсутствие изменений пиков в продуктах реакции

** – наличие посторонних пиков

° – образование воздушных пробок

^{oo} – наличие неравномерного потока и пульсаций

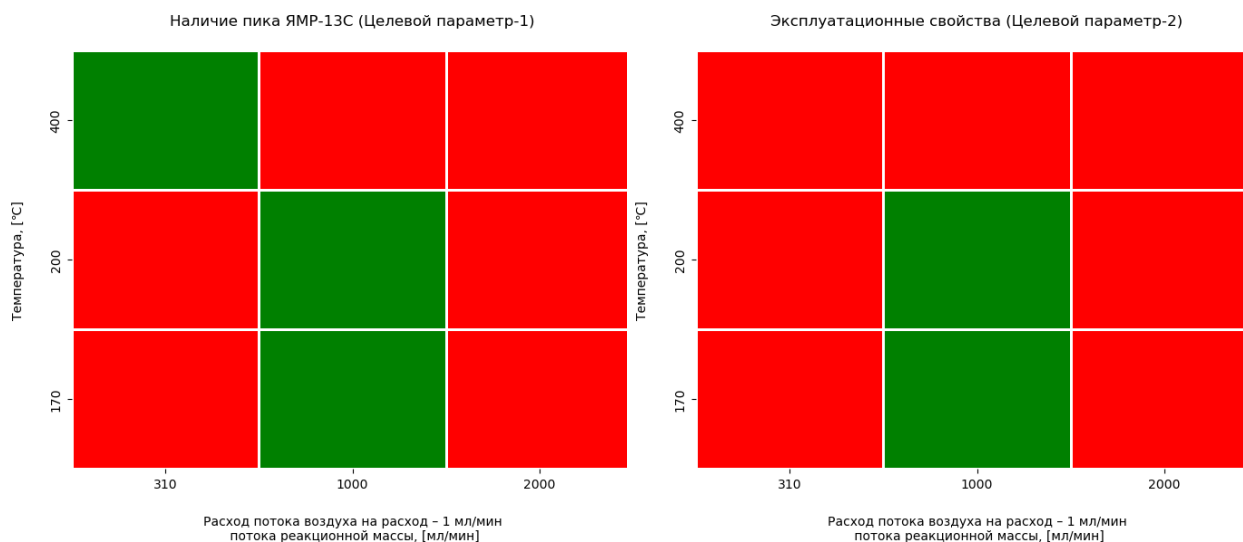


Рис. 3. Слева: значение целевого параметра-1 «наличия пиков ЯМР-13С», справа: значение целевого параметра-2 «эксплуатационные свойства» в зависимости от изменения температуры и соотношения расходов реагентов при окислении кислородом воздуха

Fig. 3. On the left: the value of the target parameter-1 "the presence of NMR-13C peaks", on the right: the value of the target parameter-2 "operational properties" depending on temperature changes and the ratio of reagent consumption during of oxidation-process using oxygen from air

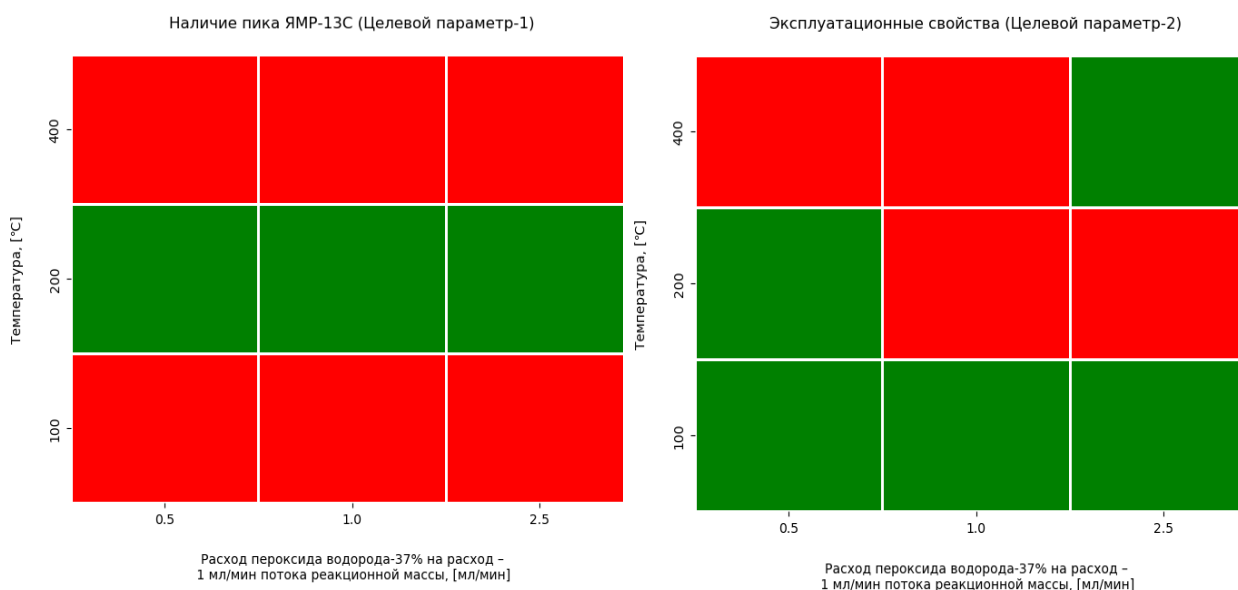


Рис. 4. Слева: значение целевого параметра-1 «наличия пиков ЯМР-13С», справа: значение целевого параметра-2 «эксплуатационные свойства» в зависимости от изменения температуры и соотношения расходов реагентов при окислении пероксидом водорода

Fig. 4. On the left: the value of the target parameter-1 "the presence of NMR-13C peaks", on the right: the value of the target parameter-2 "operational properties" depending on temperature changes and the ratio of reagent consumption during of oxidation-process using hydrogen peroxide

Как можно заметить из представленных диаграмм: при методике окисления кислородом воздуха оптимальными (совпадение обоих целевых параметров) являются условия соотношения расход воздуха/расход реакционной массы – 1000 мл/мин в температурном диапазоне от 170 до 200 °C, а при окислении пероксидом водорода – расход пероксида водорода/расход реакционной мас-

сы 0,5 при температуре около 200 °C (рис. 5). Однако стоит отметить, что при работе с пероксидами возникает повышенный риск пожаро- и взрывоопасности процесса, а высокая агрессивность данного вещества и появление отходов в результате синтеза требуют дополнительных стадий контроля и очистки.

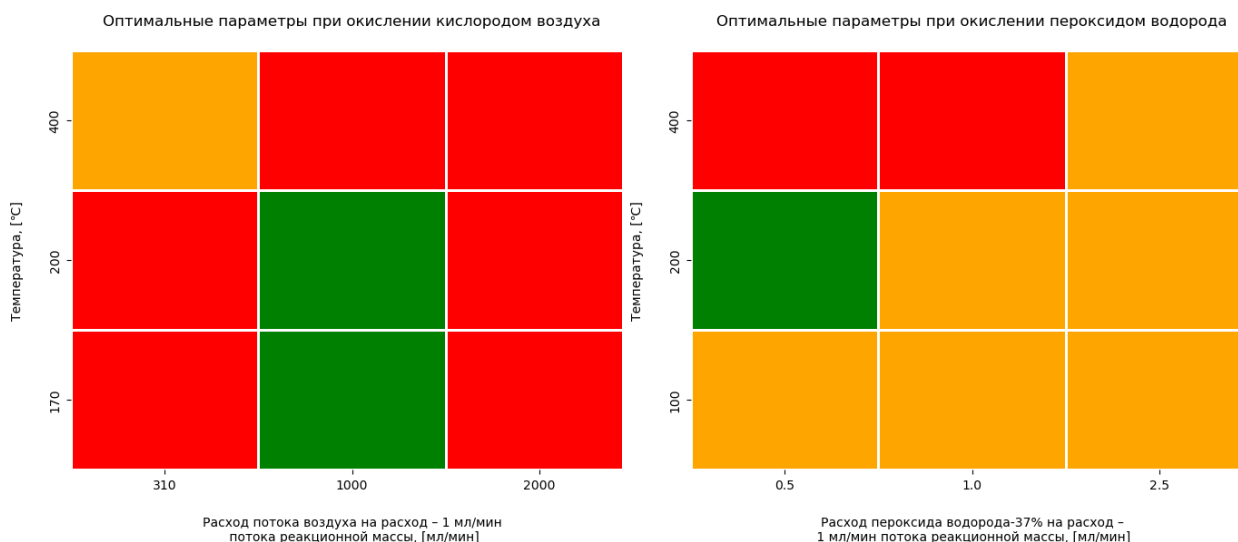


Рис. 5. Наложение целевых параметров «наличия пиков ЯМР-13С» и «эксплуатационных свойств» в зависимости от изменения температуры и соотношения расходов реагентов при окислении кислородом воздуха и пероксидом водорода соответственно

Fig. 5. The combining of target parameters for the "presence of NMR-13C peaks" and "operational properties" depending on temperature changes and the ratio of reagent costs during of oxidation-process using oxygen from air and hydrogen peroxide, respectively

ВЫВОДЫ

В данной работе был проведен процесс окисления в микрофлюидном исполнении. Проверена возможность использования различных окислителей. Исследовано влияние температуры процесса и соотношений реагентов на выход продукта и условия работы оборудования.

Таким образом, оптимальная методика процесса окисления в микрофлюидном исполне-

нии состоит в использовании потока кислорода воздуха с заданным соотношением расход воздуха/расход реакционной массы – 1000 мл/мин в температурном диапазоне от 170 до 200 °C.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogério A.F. Tomás, João C.M. Bordado, João F.P. Gomes. p-Xylene Oxidation to Terephthalic Acid: A Literature Review Oriented toward Process Optimization and Development. *Chemical Reviews*. 2013. V. 113. N 10. P. 7421-7469. DOI:10.1021/cr300298j.
2. Овчинников В.И., Назимок В.Ф., Симонова Т.А. Производство терефталевой кислоты и ее диметилевого эфира. М.: Химия. 1982. 232 с.
3. Шишанов М.В., Кук Х.Г., Досов К.А., Яшунин Д.В., Большаков И.А., Морозов Н.В. Смешение в микрофлюидике. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. № 4 (76). С. 103–109. DOI: 10.6060/snt.20237604.00014.
4. S.G. Kandlikar. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 26 (2002). P. 389-407.
5. P. Watts, S.J. Haswell. Microfluidic combinatorial chemistry. *Current Opinion in Chemical Biology*. 2003. V. 7. P. 380-387.
6. H.-C. Shin, S.-M. Kim. Generalized flow regime map for two-phase mini/micro-channel flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2022. V. 196. P. 23-29.

REFERENCES

1. Rogério A.F. Tomás, João C.M. Bordado, João F.P. Gomes. p-Xylene Oxidation to Terephthalic Acid: A Literature Review Oriented toward Process Optimization and Development. *Chemical Reviews*. 2013. V. 113. N 10. P. 7421-7469. DOI:10.1021/cr300298j/
2. Ovchinnikov V.I., Nazimok V.F., Simonova T.A. Production of terephthalic acid and its dimethyl ether. M.: Chemistry. 1982. 232 p. (in Russian)
3. Shishanov M.V., Kuk H.G., Dosov K.A., Yashunin D.V., Bolshakov I.A., Morozov N.V. Mixing in microfluidics. *Modern high technology. Regional application*. 2023. N 4 (76). P. 103–109. DOI: 10.6060/snt.20237604.00014.
4. S.G. Kandlikar. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 26 (2002). P. 389-407.
5. P. Watts, S.J. Haswell. Microfluidic combinatorial chemistry. *Current Opinion in Chemical Biology*. 2003. V. 7. P. 380-387.
6. H.-C. Shin, S.-M. Kim. Generalized flow regime map for two-phase mini/micro-channel flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2022. V. 196. P. 23-29.

7. **M. Akbari, M. Rahimi, M. Faryadi.** Gas-liquid flow mass transfer in a T shape microreactor stimulated with 1.7 MHz ultrasound waves. *Chin. J. Chem. Eng.* 2017. V. 25. P. 1143-1152. DOI: 10.1016/j.cjche.2017.03.010.
8. **Sobieszuk P, Aubin J, Pohorecki R.** Hydrodynamics and mass transfer in gas-liquid flows in microreactors. *Chem Eng Technol.* 2012. V. 8. N 35. P. 1346-1358.
9. **A. Etminan, Y.S. Muzychka, K. Pope.** Liquid film thickness of two-phase slug flows in capillary microchannels: A review paper. *Chin. J. Chem. Eng.* 2022. V. 100. P. 325-348.
10. **Mohsin Pasha, Saier Liu, Jin Zhang, Min Qiu, and Yuanhai Su;** Recent Advancements on Hydrodynamics and Mass Transfer Characteristics for CO₂ Absorption in Microreactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 2022. V. 34. N 61. P. 12249-12268. DOI: 10.1021/acs.iecr.2c01982.
11. **Chen Y, Sheng L, Deng J, Luo G.** Geometric effect on gas-liquid bubbly flow in capillary-embedded T-junction microchannels. *Ind Eng Chem Res.* 2021. V. 12. N 60. P. 4735-4744.
12. **G.-N. Ahn, S. Taniguchi, T. Aoyama, S. Hasebe, D. P. Kim, O. Tonomura.** Formation of gas-liquid slugs in millimeter-scale T-junctions – slug size estimation framework; *Chin. J. Chem. Eng.* 2020. V. 385. P. 12-27. DOI: 10.1016/j.ccej.2019.123492.
13. **Sheng L, Chen Y, Deng J, Luo G.** High-frequency formation of bubble with short length in a capillary embedded step T-junction microdevice. *AIChE J.* 2021. V. 11. N 67. P. 73-76.
14. **Lin Sheng, Yu Chang, Junjie Wang, Jian Deng, Guangsheng Luo.** Hydrodynamics of gas-liquid microfluidics: A review. *Chemical Engineering Science.* 2024. V. 285. P. 39-50. DOI: 10.1016/j.ces.2023.119563.
15. **Yaran Yin, Chunying Zhu, Rongwei Guo, Taotao Fu, Youguang Ma.** Gas-liquid two-phase flow in a square microchannel with chemical mass transfer: Flow pattern, void fraction and frictional pressure drop. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2018. V. 127. Part B. P. 484-496. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.113.
16. **Э. Преч, Ф. Бюльманн, К. Аффольтер.** Преч Э.; P71 Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных. М.: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний. 2006. 438 с.
17. **Данилова Е.А., Галанин Н.Е., Исляйкин М.К., Майзлиш В.Е., Березина Г.Р., Румянцева Т.А., Суворова Ю.В., Знойко С.А., Кустова Т.В.** Достижения в области химии макрогетероциклических соединений на кафедре технологии тонкого органического синтеза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 111-119. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6826j.
7. **M. Akbari, M. Rahimi, M. Faryadi.** Gas-liquid flow mass transfer in a T shape microreactor stimulated with 1.7 MHz ultrasound waves. *Chin. J. Chem. Eng.* 2017. V. 25. P. 1143-1152. DOI: 10.1016/j.cjche.2017.03.010.
8. **Sobieszuk P, Aubin J, Pohorecki R.** Hydrodynamics and mass transfer in gas-liquid flows in microreactors. *Chem Eng Technol.* 2012. V. 8. N 35. P. 1346-1358.
9. **A. Etminan, Y.S. Muzychka, K. Pope.** Liquid film thickness of two-phase slug flows in capillary microchannels: A review paper. *Chin. J. Chem. Eng.* 2022. V. 100. P. 325-348.
10. **Mohsin Pasha, Saier Liu, Jin Zhang, Min Qiu, and Yuanhai Su;** Recent Advancements on Hydrodynamics and Mass Transfer Characteristics for CO₂ Absorption in Microreactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 2022. V. 34. N 61. P. 12249-12268. DOI: 10.1021/acs.iecr.2c01982.
11. **Chen Y, Sheng L, Deng J, Luo G.** Geometric effect on gas-liquid bubbly flow in capillary-embedded T-junction microchannels. *Ind Eng Chem Res.* 2021. V. 12. N 60. P. 4735-4744.
12. **G.-N. Ahn, S. Taniguchi, T. Aoyama, S. Hasebe, D. P. Kim, O. Tonomura;** Formation of gas-liquid slugs in millimeter-scale T-junctions – slug size estimation framework; *Chin. J. Chem. Eng.* 2020. V. 385. P. 12-27. DOI: 10.1016/j.ccej.2019.123492.
13. **Sheng L, Chen Y, Deng J, Luo G.** High-frequency formation of bubble with short length in a capillary embedded step T-junction microdevice. *AIChE J.* 2021. V. 11. N 67. P. 73-76.
14. **Lin Sheng, Yu Chang, Junjie Wang, Jian Deng, Guangsheng Luo.** Hydrodynamics of gas-liquid microfluidics: A review. *Chemical Engineering Science.* 2024. V. 285. P. 39-50. DOI: 10.1016/j.ces.2023.119563.
15. **Yaran Yin, Chunying Zhu, Rongwei Guo, Taotao Fu, Youguang Ma.** Gas-liquid two-phase flow in a square microchannel with chemical mass transfer: Flow pattern, void fraction and frictional pressure drop. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2018. V. 127. Part B. P. 484-496. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.113.
16. **E. Prech, F. Bulmann, K. Affolter.** Prech E. P71 Determination of the structure of organic compounds. Tables of spectral data. M.: Mir; BINOM. Laboratory of Knowledge. 2006. 438 p. (in Russian)
17. **Danilova E.A., Galanin N.E., Islyaikin M.K., Maizlish V.E., Berezina G.R., Rummyantseva T.A., Suvorova Yu.V., Znoiko S.A., Kustova T.V.** Achievements in the field of chemistry of macroheterocyclic compounds at the department of technology of fine organic synthesis. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2023. V. 66. N 7. P. 111-119. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6826j.

Поступила в редакцию(Received) 08.05.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 26.06.2025