

УСТРОЙСТВА И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 542.06

МИКРОФЛЮИДНЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ЭЛЕМЕНТ ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2024 г. М. А. Марченкова^{1,2}, С. В. Чапек², Е. А. Муханова^{2,*},
А. В. Солдатов², М. В. Ковальчук^{1,3}

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ
“Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов Южного федерального
университета, Ростов-на-Дону, Россия

³Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия
*E-mail: kand@sfedu.ru

Поступила в редакцию 26.01.2024 г.

После доработки 26.01.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Современные технологии в области микрофлюидики играют важную роль в научных исследованиях, медицине, фармакологии, экологии, биологических и нанотехнологиях. Рассматриваются значение микрофлюидных процессов в рамках природоподобных технологий и их потенциал для развития новых методов и приложений. Важным преимуществом микрофлюидных технологий является возможность работы с очень малыми объемами жидкости или газа, что позволяет снизить расход реагентов, повысить чувствительность и точность анализа, а также сократить время анализа, обработки и получения образцов. Описаны достижения в области микрофлюидных технологий, их преимущества и потенциальные применения, а также перспективы развития данной области.

DOI: 10.56304/S199272232460140X

Микрофлюидика — перспективная область научных исследований, которая изучает поведение жидкостей в микро- и наномасштабах. Эта технология нашла широкое применение в различных областях, включая медицину, аналитику, фармакологию, экологию, исследования биологических систем и нанотехнологии. Рассмотрим значение микрофлюидных процессов в рамках природоподобных технологий и их потенциал для развития новых методов и приложений.

Микрофлюидика — область знания, находящаяся на стыке физики, химии, биологии и инженерных наук, изучающая поведение жидкостей и газов в микро- и наномасштабах. В микрофлюидике применяются миниатюрные каналы, структуры и устройства, с помощью которых можно контролировать и управлять сверхмалыми потоками жидкостей и газов.

Микрофлюидика возникла в конце 1980-х гг. и с тех пор стала одной из наиболее активно развивающихся исследовательских областей. Она нашла применение в таких отраслях, как нано- и биотехнологии, фармацевтика, медицина, анализ и контроль качества, энергетика и других.

Одна из важных особенностей микрофлюидики заключается в том, что она позволяет работать с очень малыми объемами жидкости или газа, что снижает расход реагентов и повышает чувствительность и точность анализа, а также сокращает время анализа, обработки и получения образцов: к примеру, при использовании традиционных методов новый материал появляется в течение нескольких лет, в то время как микрофлюидные технологии сокращают этот срок до месяцев.

Применение микрофлюидики в медицине, например, позволяет разработать новые методы диагностики и лечения заболеваний, создать портативные медицинские устройства для быстрой диагностики, улучшить процессы биопроизводства и т.д. Также микрофлюидика находит применение в разработке микросистем для обнаружения вредных веществ, анализа состава пищевых продуктов, качественного контроля воды и других областях.

Последние несколько десятилетий микрофлюидика тесно переплетается с дисциплинами химии, биологии и материаловедения и играет значительную роль в разработке природоподобных технологий, которые воссоздают, копируют, имитируют природные феномены и структуры.

Эффективное управление и анализ микрофлюидных процессов можно воспроизвести и оптимизировать в соответствии с естественными принципами и законами природы. Отметим перспективные применения микрофлюидных процессов в различных областях.

Медицина. Микрофлюидные технологии позволяют разрабатывать приборы для диагностики и мониторинга заболеваний, а также для доставки лекарственных препаратов. Это открывает возможности для более точной и персонализированной медицины [1].

Биотехнология. Микрофлюидика используется для создания биомиметических устройств, которые могут анализировать биологические пробы, такие как кровь или ткани, и проводить исследования в области биомедицины и генной терапии [2].

Аналитика. В области аналитики микрофлюидные технологии используются для проведения точных анализов биологических и химических образцов, что позволяет улучшить процессы диагностики и мониторинга [3].

Фармакология. Микрофлюидные устройства могут использоваться для исследования воздействия лекарственных препаратов на клеточном уровне, а также для создания новых способов доставки лекарств [4].

Экология. Микрофлюидные технологии могут помогать в мониторинге качества воды, анализе загрязнений и изучении поведения микроорганизмов в окружающей среде [5].

Водоочистка. Природоподобные технологии в микрофлюидике могут использоваться для создания более эффективных методов очистки воды от загрязнителей и микроорганизмов [6].

Агрономия. Микрофлюидные технологии могут применяться для анализа почвы, растений и улучшения методов их обработки и ухода [7].

Нанотехнологии. В области нанотехнологий микрофлюидика может применяться для создания наночастиц, нанореакторов и других наноматериалов [8].

Производство энергии. Микрофлюидные технологии могут использоваться в разработке новых методов для преобразования энергии, включая солнечные батареи и топливные элементы [9].

Телекоммуникации. Микрофлюидные процессы могут быть применены в создании микрофлюидных устройств для передачи и обработки сигналов, что открывает возможности для создания более компактных и эффективных технологий связи [10].

Энергетика. Микрофлюидные системы могут быть использованы для разработки микротурбин или микрогенераторов. Они могут помочь улучшить энергетическую эффективность и уменьшить излишнее потребление ресурсов [11].

Кроме того, микрофлюидные процессы имеют перспективы применения в космической исследовательской отрасли [12]. Благодаря своей способности работать с малыми объемами жидкости они могут помочь в создании микрореакторов и микробиолабораторий для анализа образцов в космической среде.

Животные и растения используют микроканалы для транспортировки питательных веществ, жидкостей, клеток и молекул на большие расстояния (рис. 1). Например, у взрослого человека для транспортировки жидкости используется сердечно-сосудистая система с более крупными артериями, венами и меньшими капиллярами, а также лимфатическая система [13]. Размеры каналов в сердечно-сосудистой системе составляют в диаметре от 5 мкм до 4 мм и у взрослого человека могут быть протяженностью около 100 000 км. Вся сосудистая система подвергается механическим воздействиям. Долгое время исследователи стремились понять не только природу и свойства сосудов, но и сложное поведение крови и ее компонентов, протекающих по организму человека. В настоящее время использование микрофлюидных устройств для имитации природных систем позволяет со все большей точностью получать информацию о клеточных и молекулярных процессах в таких сложных системах.

В обзоре [14] дано подробное описание истории и современных версий “лабораторий-на-чипе”, которые позволяют с высокой точностью воспроизводить размеры, механические свойства и биологическую сложность сосудистых систем. Области применения включают в себя обнаружение патологических изменений в эритроцитах, лейкоцитах и тромбоцитах с высокой чувствительностью и возможность проведения оценки эффективности медикаментозного лечения. Недавние усилия были направлены на разработку микрофлюидных устройств, пригодных для воспроизведения таких сложных заболеваний, как тромбоз. Растущая сложность микрофлюидных моделей в дальнейшем придаст им большую клиническую значимость и может в итоге привести к использованию микрофлюидных сосудистых моделей в клиническом применении.

В обзоре [15] рассматриваются прогресс и вызовы, с которыми сталкиваются в настоящее время исследователи при создании нового класса портативных терапевтических искусственных легких на основе микрофлюидных устройств. Точная воспроизводимость функций может быть реализована благодаря размерам элементов и конструкции кровеносных каналов, которые точно имитируют те, что встречаются в их естественных аналогах. Они могут иметь площадь поверхности и объем в разы меньше, чем у современных клинических технологий, тем самым уменьшая



Рис. 1. Микрофлюидные природные системы.

размер устройства и уменьшая реакцию на ино-родное тело; содержать разветвленные сети кана-лов, копируя по основным характеристикам та-ковые в легких человека, улучшая биосовмести-мость; эффективно работать с комнатным воздухом, исключая необходимость использова-ния газовых баллонов; обладать биомиметиче-ским гидравлическим сопротивлением, позволя-ющим работать при естественном давлении и устраняющим необходимость в кровяных насо-сах; обеспечивать повышенную газообменную способность. Если все указанные преимущества будут реализованы в микрофлюидных устрой-ствах и оставшиеся проблемы решены, то искус-ственные легкие могут совершить революцию в области легочной реабилитации.

Растения также имеют сложную сосудистую систему капилляров, которая транспортирует во-ду и питательные вещества [16]. Например, кана-лы в листьях, представляющие собой основной орган растений для фотосинтеза, могут достав-лять питательные вещества к остальной части растения. Эту особенность использовали в [17] для создания искусственных систем со встроен-ными микрофлюидными каналами и усовершен-ствованной способностью реагировать на изме-нения окружающей среды. Растения реагируют на сигналы окружающей среды посредством дви-жений, что вдохновило исследователей внедрить чувствительные к температуре, влажности и освещенности материалы в устройство со складной геометрией. Принцип, лежащий в основе такой трансформируемой микросистемы, потенциа-льно может быть распространен на приложения, требующие взаимодействия между окружающей средой и устройствами, такие как динамические искусственные сосудистые сети и гибкая элек-троника, адаптирующаяся к форме.

Это лишь несколько примеров перспектив применения микрофлюидных процессов. Чтобы полностью реализовать данный потенциал и до-стичь перспектив, необходимо преодолеть неко-торые технические и технологические вызовы.

Некоторые из них включают в себя контроль и управление микромасштабными потоками, рас-пределение жидкости на малых поверхностях и интеграцию микрофлюидных систем с другими технологиями, а также применение искусствен-ного интеллекта и машинного обучения для более прецизионного управления разрабатываемыми устройствами. С развитием технологий улучша-ются возможности создания более сложных мик-рофлюидных систем, что открывает новые гори-зонты для их использования в природоподобных технологиях.

Микрофлюидные процессы играют важную роль в развитии природоподобных технологий. Их способность копировать природные физико-химические процессы открывает широкие пер-спективы для разработки инновационных мето-дов и технологий, которые могут стать незаме-ними в медицине, аналитике, фармакологии, биотехнологии, экологии и других значимых об-ластях. Изучение и применение микрофлюидных процессов в природоподобных технологиях игра-ет ключевую роль для научного сообщества, стре-мительного развития науки в условиях новых вы-зовов и угроз, с которыми столкнулось наше госу-дарство. Преодоление данных вызовов обеспечит технологический суверенитет России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rivet C., Lee H., Hirsch A. et al. // Chem. Eng. Sci. 2011. V. 66. № 7. P. 1490.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.015>
2. Ortseifen V., Viefhues M., Wobbe L., Grünberger A. // Front. Bioeng. Biotechnol. 2020. V. 8. P. 1.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.589074>
3. Liu W., Zhu Y. // Anal. Chim. Acta. 2020. V. 1113. P. 66.
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.03.011>
4. Bohr A., Colombo S., Jensen H. // Microfluidics for Pharmaceutical Applications. Norwich: Elsevier, 2019. P. 425.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812659-2.00016-8>

5. *Zhu X., Kun W., Yan. H. et al.* // *Environ. Sci. Technol.* 2022. V. 56. № 2. P. 711.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03899>
6. *Santana H.S., Silva Jr.J.L., Aghel B., Ortega-Casanova J.* // *SN Appl. Sci.* 2020. V. 2. № 3. P. 395.
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2176-7>
7. *Chronopoulou L et al.* Microfluidic synthesis of PLGA nanocarriers for the controlled delivery of bioactive compounds in plants of agronomic interest // *Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference*, online, 24–26 March 2021. <https://hdl.handle.net/11573/1562280>
8. *Fattahi Z., Hasanzadeh M.* // *Trends Anal. Chem.* 2022. V. 152. P. 116637.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116637>
9. *Ibrahim O.A., Navarro-Segarra M., Sadeghi P. et al.* // *Chem. Rev.* 2022. V. 122. № 7. P. 7236.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00499>
10. *Carrasco E., Gomez-Cruz J., Serrano-Berruero M. et al.* // *IEEE Open J. Antennas Propag.* 2022. V. 3. P. 425.
<https://doi.org/10.1109/OJAP.2022.3166232>
11. *Rossi C., Estève D.* // *Sens. Actuator A. Phys.* 2005. V. 120. № 2. P. 297.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.01.025>
12. *Kaigala G.V., Lovchik R.D., Delamarche E.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012. V. 51. № 45. P. 11224.
<https://doi.org/10.1002/anie.201201798>
13. *Pugsley M.K., Tabrizchi R.* // *J. Pharmacol. Toxicol. Methods.* 2000. V. 44. № 2. P. 333.
[https://doi.org/10.1016/S1056-8719\(00\)00125-8](https://doi.org/10.1016/S1056-8719(00)00125-8)
14. *Sebastian B., Dittrich P.S.* // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2018. V. 50. № 1. P. 483.
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010816-060246>
15. *Potkay J.A.* // *Lab. Chip.* 2014. V. 14. № 21. P. 4122.
<https://doi.org/10.1039/C4LC00828F>
16. *Lucas W.J., Groover A., Lichtenberger R. et al.* // *J. Integr. Plant. Biol.* 2013. V. 55. № 4. P. 294.
<https://doi.org/10.1111/jipb.12041>
17. *Pan Y., Yang Zh., Li Ch. et al.* // *Sci. Adv.* 2022. V. 8. № 18. P. 1.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abo1719>