



## Краткие сообщения

Краткое сообщение

УДК 538.913

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13560>

Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния

## Детектирование ацетона сенсором на основе клиноптилолита

Е. А. Попов<sup>1</sup>✉, Д. С. Потанина<sup>1</sup>, Е. В. Богатиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет,  
Университетская пл. 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

### Аннотация

**Цель статьи:** Активное развитие микробиореакторов, использующихся в широком спектре биотехнологических, медицинских, сельскохозяйственных, экологических задач, требует совершенствования их элементной базы, в том числе, газочувствительных сенсоров различных метаболитов. Особое предпочтение при этом отдается сенсорам, которые способны распознавать состав сложных газовых смесей без использования громоздких и дорогих структур. Перспективным в этом направлении являются сенсоры на основе цеолитов.

**Экспериментальная часть:** Рассмотрены кривые релаксации ионной проводимости цеолитов при приложении ступенчатых импульсов напряжения. Показано выполнение степенной зависимости тока ионной проводимости от времени с параметрами, зависящими от сорбции паров ацетона.

**Выводы:** Полученные результаты демонстрируют возможность применения газочувствительных сенсоров на основе клиноптилолита для детектирования ацетона, что важно для их применения в составе микробиореакторов.

**Ключевые слова:** клиноптилолит, цеолит, ацетон, газочувствительный сенсор, микробиореактор, ионная проводимость

**Для цитирования:** Попов Е. А., Потанина Д. С., Богатиков Е. В. Детектирование ацетона сенсором на основе клиноптилолита. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(1): 148–152. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13560>

**For citation:** Popov E. A., Potanina D. S., Bogatikov E. V. Detection of acetone by a clinoptilolite-based sensor. *Condensed Matter and Interphases*. 2026;28(1): 148–152. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13560>

✉ Попов Евгений Анатольевич, e-mail: [crystal.guy@yandex.ru](mailto:crystal.guy@yandex.ru)

© Попов Е. А., Потанина Д. С., Богатиков Е.В., 2026



## Введение

В настоящее время активно развивается элементная база микробиореакторов, контролирующих и оптимизирующих условия роста микроорганизмов, клеток и тканей. Важным компонентом микробиореакторов [1–4] являются газочувствительные сенсоры, которые позволяют регистрировать продукты жизнедеятельности микроорганизмов [5, 6]. Особенностью таких сенсоров являются одноразовый характер их применения, а также повышенные требования к миниатюризации и стоимости.

Перечисленным требованиям удовлетворяют сенсоры на основе природных цеолитов [7–13]. Наличие в кристаллической решетке системы каналов с диаметром до 1 нм обеспечивает сорбционные процессы, влияющие на электрофизические свойства цеолитов. Распространенность цеолитов в природе обеспечивает их низкую стоимость. Особенный интерес представляет возможность использования единственного сенсора для детектирования смеси газов. Это особенно важно для микробиореакторов, в которых крайне ограничено пространство в сменных блоках с ростовыми камерами, где затруднено размещение мультисенсорных структур с большим количеством чувствительных элементов. В качестве перспективного цеолита представляется наиболее распространенный природный цеолит – клиноптилолит, имеющий достаточно большие каналы с размером ~0.8 нм.

Наиболее часто для регистрации отклика сенсоров на основе цеолитов используется импедансная спектроскопия [14–17]. Однако при этом невозможно зафиксировать ряд долговременных процессов, связанных с дрейфом ионов в каналах цеолита [18]. Решением является регистрация отклика на ступенчатую функцию напряжения. Ранее была показана возможность выделения отклика на сорбцию паров аммиака на фоне сорбции паров воды [19]. При использовании сенсоров в микробиореакторах важно также детектирование таких метаболитов, как ацетон или этиловый спирт. Они более сложны для детектирования, так как имеют крупные молекулы, которые слабо участвуют в ионном переносе в каналах цеолитов.

Целью данной работы являлся поиск параметров отклика сенсоров на основе клиноптилолита, обеспечивающих детектирование паров ацетона для использования сенсоров в составе микробиореакторов.

## 1. Экспериментальная часть

В качестве сенсора использовалась система встречно-штыревых электродов (40×20 мм, шаг электродов 2 мм) со слоем клиноптилолита. Газочувствительный слой формировался осаждением из водной суспензии цеолита без применения дополнительных связующих (так как сенсоры в микробиореакторах являются одноразовыми и не требуется их механическая прочность и долговечность).

Схема проведения эксперимента соответствовала использованной ранее в работе [19] при обнаружении паров аммиака. Для наблюдения процесса релаксации ионной проводимости на электроды подавалась серия ступенчатых импульсов постоянного напряжения переменной полярности. Длительность импульсов составляла 30 с, размах прикладываемого напряжения 5 В. Для измерения тока, протекающего через слой цеолита, измерялось падение напряжения на измерительном резисторе, включенном последовательно с сенсором. Падение напряжения на резисторе предварительно усиливалось прецизионным инструментальным усилителем, после чего оцифровывалось с помощью 24-битного сигма-дельта АЦП с частотой дискретизации 20 Гц, позволяющей производить аппаратное подавление сетевых помех 50 Гц. Полученные данные сглаживались методом скользящего среднего по 5 точкам и передавались на компьютер. В результате, размах шума в полученных данных не превышал 0.1 нА.

Сенсор помещался в эксикатор, влажность внутри которого задавалась насыщенным раствором соли (NaCl – для получения относительной влажности 75 % и KCl для получения относительной влажности 84 %). Относительная влажность и температура дополнительно контролировались датчиками с погрешностью 1 % и 1 °С соответственно. Перед помещением в эксикатор сенсор нагревался до температуры ~80 °С для проведения десорбции. Эффективность десорбции контролировалась по измерению ионной проводимости. После помещения сенсора в эксикатор на протяжении 24 ч производилась выдержка при постоянной температуре (20 °С либо 25 °С) для достижения состояния равновесия. В начале проведения эксперимента на протяжении 1 ч производилась запись результатов без добавления паров ацетона, после чего в эксикатор подавался раствор ацетона, обеспечивающий при испарении концентрацию паров ~1000 ppm (что соответствует порогу восприятия

ацетона обонянием человека), либо ~50000 ppm (что примерно соответствует средней смертельно опасной концентрации ацетона для животных). Запись результатов продолжалась ~ 4 ч.

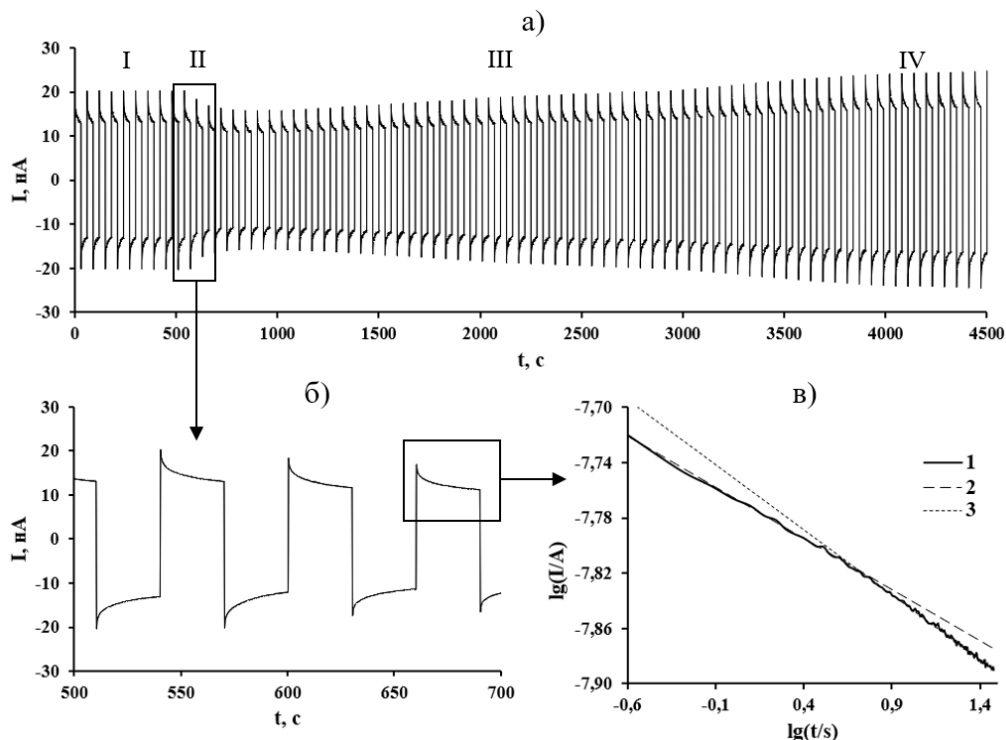
**2. Результаты и обсуждение**

Пример измерения тока ионной проводимости при приложении импульсов переменной полярности приведен на рис. 1а. Согласно представленным результатам эксперимент можно разделить на 4 стадии (обозначены на рис. 1а римскими цифрами I–IV). На первой стадии – до введения раствора ацетона в эксикатор – амплитуда отклика на ступенчатые импульсы постоянна. На второй стадии – после введения ацетона – начинается падение амплитуды отклика. На третьей стадии амплитуда отклика вновь начинает возрастать и на четвертой стадии эксперимента она достигает насыщения (при этом амплитуда превышает начальную, соответствующую отсутствию паров ацетона).

На рис. 1б представлен фрагмент временного ряда, соответствующий второй стадии эксперимента, а на рис. 1в представлен фрагмент релаксации ионной проводимости в двойных логарифмических координатах.

Видно выполнение классического степенного закона Кюри – фон Швейдлера [18], при этом в определенный момент времени происходит смена показателя степени, что является типичным для цеолитов, в которых основной вклад вносит ионная проводимость в системе каналов кристаллической решетки [18, 20].

Значения показателей степени, полученные в эксперименте, приведены в таблице. Значения показателя  $n_1$  соответствуют начальному этапу релаксации проводимости (~2.5 с от момента ступенчатого изменения приложенного напряжения), тогда как показатель  $n_2$  соответствует заключительному этапу релаксации (интервал времени ~20÷30 с). Как видно, введение большой концентрации паров ацетона сопровождается уменьшением показателя  $n_1$  на всех стадиях эксперимента. Напротив, показатель  $n_2$  сначала уменьшает свое значение, а затем увеличивает. При этом отношение показателей  $n_2/n_1$  всегда растет с момента введения ацетона. Такое поведение сохраняется как при изменении температуры проведения эксперимента, так и при изменении относительной влажности.



**Рис. 1.** Отклик сенсора на основе клиноптилолита на ступенчатые импульсы напряжения в отсутствии паров ацетона (I) и в присутствии паров ацетона (II–IV): а) временная зависимость тока ионной проводимости; б) временная зависимость тока ионной проводимости в момент введения паров ацетона; в) степенной характер релаксации ионной проводимости: 1 – экспериментальная кривая в двойных логарифмических координатах; 2 – аппроксимирующая степенная зависимость для участка  $t < 2.5$  с; 3 – аппроксимирующая степенная зависимость для участка  $20 < t < 30$  с

**Таблица.** Значения степенных показателей для кривых релаксации ионной проводимости клиноптилолита

Содержание паров ацетона, ppm	T, °C	отн. вл., %	Стадия эксперимента	n1	n2	n2/n1
~50000	25	75	I	0.081	0.108	1.33
			II	0.070	0.095	1.36
			III	0.073	0.104	1.42
			IV	0.072	0.102	1.42
		84	I	0.088	0.124	1.41
			II	0.076	0.113	1.49
			III	0.075	0.114	1.52
			IV	0.075	0.125	1.67
	20	75	I	0.085	0.102	1.20
			II	0.073	0.088	1.21
			III	0.074	0.094	1.27
			IV	0.076	0.100	1.32
~1000	25	75	I	0.075	0.098	1.31
			II	0.076	0.101	1.33
			III	0.080	0.118	1.48
			IV	0.078	0.120	1.54

При низкой концентрации ацетона сохраняются рост отношения  $n_2/n_1$  с введением ацетона, однако вызван он не уменьшением показателя  $n_1$ , а ростом показателя  $n_2$ .

По сравнению с существенным изменением показателей степени, полученными ранее при сорбции паров аммиака [19], изменение показателей степени при сорбции ацетона имеет существенно меньшее значение. Это вызвано тем, что молекулы аммиака, во-первых, имеют существенно меньший диаметр и, следовательно, большую подвижность в порах цеолита по сравнению с ацетоном. Во-вторых, ионы аммония, образующиеся в порах цеолита, непосредственно участвуют в ионной проводимости. В случае же с ацетоном влияние на проводимость, видимо, является косвенным (изменение подвижности воды и ионов металлов в порах цеолита, а также изменение количества молекул воды в порах).

### 3. Заключение

Обнаруженное изменение степенных показателей кривой релаксации проводимости клиноптилолита в присутствии паров ацетона позволяет рассматривать сенсор на основе цеолита в качестве перспективного элемента микробиореакторов. Показано, что в качестве важного параметра для детектирования ацетона можно использовать отношение степенных показателей на различных этапах релаксации ионной проводимости.

### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы

- Kim K. R., Yeo W.-H. Advances in sensor developments for cell culture monitoring. *BMEMat.* 2023;1(4): e12047. <https://doi.org/10.1002/bmm2.12047>
- Jansen R., Morschett H., Hasenklever D., Moch M., Wiechert W., Oldiges M. Microbioreactor-assisted cultivation workflows for time-efficient phenotyping of protein producing *Aspergillus niger* in batch and fed-batch mode. *Biotechnology Progress.* 2021;37: e3144. <https://doi.org/10.1002/btpr.3144>
- Fink M., Cserjan-Puschmann M., Reinisch D., Striedner G. High-throughput microbioreactor provides a capable tool for early stage bioprocess development. *Scientific Reports.* 2021;11: 2056. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81633-6>
- Podunavac I., Knežić T, Djisalov M., ... Radonic V. Mammalian cell-growth monitoring based on an impedimetric sensor and image processing within a microfluidic platform. *Sensors.* 2023;23(7):3748. <https://doi.org/10.3390/s23073748>
- Viebrock K., Rabl D., Meinen S., ... Krull R. Microsensor in microbioreactors: full bioprocess characterization in a novel capillary-wave microbioreactor. *Biosensors.* 2022;12(7): 512–530. <https://doi.org/10.3390/bios12070512>

6. Helwig A., Hackner A., Müller G., Zappa D., Sberveglieri G. Self-test procedures for gas sensors embedded in microreactor systems. *Sensors*. 2018;18(2): 453–468. <https://doi.org/10.3390/s18020453>
7. Park J., Tabata H. Gas sensor array using a hybrid structure based on zeolite and oxide semiconductors for multiple bio-gas detection. *ACS Omega*. 2021;6(33): 21284–21293. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01435>
8. Stosic D., Zholobenko V. Application of zeolite-based materials for chemical sensing of VOCs. *Sensors*. 2025;25(5): 1634–1658. <https://doi.org/10.3390/s25051634>
9. Yamada Y., Hiyama S., Toyooka T., ... Tabata H. Ultratrace measurement of acetone from skin using zeolite: toward development of a wearable monitor of fat metabolism. *Analytical Chemistry*. 2015;87(15): 7588–7594. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b00296>
10. Kucherenko I. S., Soldatkin O. O., Dzyadevych S. V., Soldatkin A. P. Application of zeolites and zeolitic imidazolate frameworks in the biosensor development. *Biomaterials Advances*. 2022;143: 213180. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2022.213180>
11. Bacakova L., Vandrovцова M., Kopova I., Jirka I. Applications of zeolites in biotechnology and medicine. *Biomaterials Science*. 2018;6(5): 974–989. <http://dx.doi.org/10.1039/C8BM00028J>
12. Wang W., Zhang Q., Lv R., Wu D., Zhang S. Enhancing formaldehyde selectivity of SnO<sub>2</sub> gas sensors with the ZSM-5 modified layers. *Sensors*. 2021;21(12): 3947–962. <https://doi.org/10.3390/s21123947>
13. Симонов В. Н., Фомкин А. А., Школин А. В., Меньшиков И. Е. Ацетон-нейтральный адсорбционный сенсор влажности выдыхаемого воздуха при диагностике сахарного диабета. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2023;59(4): 456–460. <https://doi.org/10.31857/S004418562370050X>
14. Reiß S., Hagen G., Moos R. Zeolite-based impedimetric gas sensor device in low-cost technology for hydrocarbon gas detection. *Sensors*. 2008;8(12): 7904–7916. <https://doi.org/10.3390/s8127904>
15. Zheng Y., Li X., Dutta P. K. Exploitation of unique properties of zeolites in the development of gas sensors. *Sensors*. 2012;12(4): 5170–5194. <https://doi.org/10.3390/s120405170>
16. Pullano S. A., Falcone F., Critello D. C., Bianco M. G., Menniti M., Fiorillo A. S. An affordable fabrication of a zeolite-based capacitor for gas sensing. *Sensors*. 2020;20(7): 2143. <https://doi.org/10.3390/s20072143>
17. Wu Q., Zheng Y., Jian J., Wang J. Gas sensing performance of ion-exchanged Y zeolites as an impedimetric ammonia sensor. *Ionics*. 2017;23: 751–758. <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1849-0>
18. Jonscher A. K., Haidar A. R. The time-domain response of humid zeolites. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*. 1986;82(12): 3553–3560. <https://doi.org/10.1039/F19868203553>
19. Куцова Д. С., Богатиков Е. В., Смирнова К. Г., Глушков Г. И. Анализ состава сложной газовой смеси сенсором на основе цеолита. *Нано- и микросистемная техника*. 2016; 18(9): 589–592. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26711244>
20. Вейсман В. Л., Марков В. Н., Николаева Л. В., Панькова С. В., Соловьев В. Г. Проводимость монокристаллов цеолитов. *Физика твердого тела*. 1993;35(5): 1390–1393. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/14932>

### Информация об авторах

Попов Евгений Анатольевич, аспирант кафедры физики полупроводников и микроэлектроники, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0007-5323-7238>  
crystal.guy@yandex.ru

Потанина Дарья Сергеевна, аспирантка кафедры физики полупроводников и микроэлектроники, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0009-0453-0977>  
potanina.ds@gmail.com

Богатиков Евгений Васильевич, к. ф.-м. н., доцент кафедры физики полупроводников и микроэлектроники, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0006-5349-1466>  
evbogatikov@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.09.2025; одобрена после рецензирования 30.10.2025; принята к публикации 14.11.2025; опубликована онлайн 01.04.2026.