

УДК 544.723.2

EDN
[NGSFEO](#)

Анализ применения системы адсорбции с применением цеолита для удаления газообразных загрязняющих веществ

**О.С. Харитонова*, В.В. Бронская, А.В. Клинов, Д.В. Башкиров,
В.В. Макарихин**

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. Карла Маркса, 68, Казань, 420015, Россия

*E-mail: os_kharitonova@mail.ru

Аннотация. Для удаления кислых газов и летучих органических соединений из газовой среды перед сбросом в атмосферу чаще всего применяют процесс адсорбции с применением цеолитов. В настоящее время цеолиты привлекают внимание исследователей благодаря своим свойствам, а именно адсорбционным свойствам, каталитическим свойствам и другие. В статье представлен анализ применения процесса адсорбции для удаления загрязняющих газообразных веществ из газовой смеси.

Ключевые слова: адсорбция, цеолиты, углеводородные газы.

Analysis of the adsorption system application using zeolite for the removal of gaseous pollutants

**O.S. Kharitonova*, V.V. Bronskaya, A.V. Klinov, D.V. Bashkirov,
V.V. Makarikhin**

Kazan National Research Technological University, Karl Marx Street, 68, Kazan,
420015, Russia

*E-mail: os_kharitonova@mail.ru

Abstract. Removing acid gases and volatile organic compounds from the gas environment before discharging into the atmosphere, the adsorption using zeolites is most often used. Currently, zeolites attract the attention of researchers due to their properties, namely adsorption properties, catalytic properties, and others. The article presents an analysis of the application of the adsorption process to remove polluting gaseous substances from the gas mixture.

Keywords: adsorption, zeolites, hydrocarbon gases.

1. Введение

Цеолиты являются эффективными адсорбентами для удаления кислых газов и летучих органических соединений (ЛОС) из газовых потоков. Их уникальные свойства делают их популярным выбором для очистки газов в промышленных условиях [1-3]. Рассмотрим подробнее, как цеолиты применяются для этих целей и какие преимущества они обеспечивают.

- **Высокая селективность.** Цеолиты имеют кристаллическую структуру с определённым размером пор, что позволяет им избирательно адсорбировать молекулы определённого размера и формы. Это особенно полезно для разделения смесей газов и удаления целевых загрязнителей, таких как сероводород (H_2S), диоксид серы (SO_2), аммиак (NH_3) или ЛОС. Селективность также зависит от химического состава цеолита, который можно модифицировать для улучшения адсорбции конкретных веществ.
- **Возможность регенерации.** После насыщения адсорбента загрязнителями цеолиты можно регенерировать. Обычно это делается путём нагревания (термическая десорбция) или продувки инертным газом, что позволяет удалить адсорбированные вещества и восстановить адсорбционную способность цеолита. Регенерация делает процесс экономически выгодным, так как один и тот же материал можно использовать многократно.
- **Пористая структура.** Цеолиты имеют высокую удельную поверхность благодаря своей микропористой структуре. Это увеличивает их адсорбционную ёмкость и позволяет эффективно улавливать даже низкие концентрации загрязнителей. Размер пор можно регулировать, выбирая цеолиты с определённой структурой (например, цеолиты типа A, X, Y или ZSM-5).
- **Физико-химическая стабильность.** Цеолиты устойчивы к высоким температурам, что делает их пригодными для использования в процессах, где газы имеют повышенную температуру. Они также устойчивы к химической коррозии и механическим воздействиям, что обеспечивает их долговечность в промышленных условиях.
- **Экологичность.** Цеолиты являются природными или синтетическими материалами, которые считаются безопасными для окружающей среды. Они не выделяют вредных веществ в процессе эксплуатации и могут быть

утилизированы без значительного экологического ущерба. В некоторых случаях использованные цеолиты можно перерабатывать или использовать в других сферах деятельности, например, в строительстве или сельском хозяйстве.

2. Применение цеолитов для удаления кислых газов и ЛОС

Применение цеолитов для удаления кислых газов и летучих органических соединений (ЛОС) широко распространено в промышленности. Рассмотрим основные аспекты их использования для этих целей [4].

2.1. Удаление кислых газов

Кислые газы, такие как сероводород (H_2S), диоксид серы (SO_2), диоксид углерода (CO_2) и оксиды азота (NO_x), часто присутствуют в промышленных выбросах. Цеолиты эффективно адсорбируют эти газы благодаря своей пористой структуре и химическим свойствам [5-6].

Механизм адсорбции кислых газов:

- Физическая адсорбция: кислые газы улавливаются в порах цеолита за счёт сил Ван-дер-Ваальса.
- Химическая адсорбция: некоторые цеолиты модифицируются для усиления химического взаимодействия с кислыми газами. Например, цеолиты, пропитанные щелочными металлами (например, натрием или калием), лучше адсорбируют H_2S и SO_2 .

Примеры применения:

- Нефтегазовая промышленность: удаление H_2S и CO_2 из природного газа и попутного нефтяного газа.
- Энергетика: очистка дымовых газов от SO_2 и NO_x на электростанциях.
- Химическая промышленность: улавливание кислых газов в процессах производства серной кислоты, аммиака и других химических веществ.

2.2. Удаление летучих органических соединений (ЛОС)

Летучие органические соединения, такие как бензол, толуол, ксилолы, формальдегид и другие, часто присутствуют в выбросах химических, лакокрасочных и нефтеперерабатывающих производств. Цеолиты эффективно адсорбируют ЛОС благодаря своей высокой удельной поверхности и селективности.

Механизм адсорбции летучих органических соединений:

- ЛОС адсорбируются в порах цеолита за счёт физических взаимодействий (сил Ван-дер-Ваальса) и, в некоторых случаях, за счёт химических взаимодействий (если цеолит модифицирован).
- Селективность цеолитов позволяет улавливать определённые ЛОС даже при низких концентрациях.

3. Ограничения и пути их преодоления. Области промышленного применения

Любые системы и процессы имеют достоинства и недостатки в работе. Применение цеолитов имеет следующие ограничения [7-10]:

- Чувствительность к влаге. Вода может «конкурировать» с целевыми загрязнителями, а именно занимать поры адсорбента вместо целевого загрязнителя. Для решения этой проблемы газовый поток предварительно осушают. Для осушки возможно также применение специальных цеолитов.
- Высокая стоимость синтетических цеолитов: Использование природных цеолитов или комбинирование с другими адсорбентами (например, активированным углём) может снизить затраты.
- Ограниченная ёмкость. Для повышения эффективности используют многоступенчатые системы очистки или комбинируют цеолиты с другими методами (например, каталитическим окислением).

С каждым годом возрастает потребность в цеолитах и область их применение увеличивается, появляются новые способы применения данных веществ. Основные пути использования цеолитов является:

- Нефтепереработка. Очистка попутного нефтяного газа от H_2S и ЛОС.
- Энергетика. Улавливание SO_2 и NO_x из дымовых газов.
- Химическая промышленность. Очистка выбросов от ЛОС в производстве пластмасс, красок и растворителей.
- Очистка воздуха. Использование цеолитов в системах вентиляции и кондиционирования воздуха на промышленных объектах.

4. Выводы

Цеолиты являются эффективным и экологически безопасным решением для удаления кислых газов и ЛОС из промышленных выбросов. Их высокая селективность, возможность регенерации и устойчивость к экстремальным условиям делают их

незаменимыми в современных системах очистки газов. Однако для достижения максимальной эффективности важно правильно подбирать тип цеолита и условия его использования.

Список литературы

1. Zhang, P. Direct synthesis of liquefied petroleum gas from syngas over H-ZSM-5 enwrapped Pd-based zeolite capsule catalyst / P. Zhang, G. Yang, L. Tan, P. Ai, R. Yang, N. Tsubaki // *Catal Today*. – 2018. – № 303. – P. 77-85.
2. Lu, P. Direct syngas conversion to liquefied petroleum gas: importance of a multifunctional metal-zeolite interface / P. Lu, J. Sun, D. Shen, R. Yang, C. Xing, C. Lu [et al]. // *Appl Energy*. – 2018. – № 209. – P. 1–7.
3. Moretti, A. F. Incorporation of *Lactobacillus plantarum* and zeolites in poultry feed can reduce aflatoxin B1 levels / A. F. Moretti, R. R. Gamba, J. Puppo, N. Malo, A. Gómez-Zavaglia, Á. L. Peláez, M. A. Golowczyc // *J Food Sci Technol*. – 2018. – № 55. – P. 431-436.
4. Meunier, F. Second law analysis of a solid adsorption heat pump operating on reversible cascade cycles: application to the Zeolite-water pair / F. Meunier // *J Heat Recovery Syst* 1985. – № 5. – P. 133-141.
5. Li, A. Performance evaluation of a zeolite- water adsorption chiller with entropy analysis of thermodynamic insight / A. Li, I.A. Bin, K. Thu, K.C. Ng, W.S. Loh // *Appl Energy*. – 2014. – № 13. – P.702-711.
6. Харитонов, О. С. Применение цеолитов для осушки углеводородного газа / О. С. Харитонов, В. В. Бронская, А. В. Клинов [и др.] // *Наука, технологии, общество: Экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий: сборник научных статей международной конференции (г. Красноярск, 09-10 ноября 2023 г.)*. – Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений, 2023. – С. 103-107.
7. Харитонов, О. С. Современные цеолиты / О. С. Харитонов, В. В. Бронская, Д. В. Башкиров, А. В. Клинов // *Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология: материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции (г. Казань, 28-30 мая 2024 г.)*. – Казань: ООО«Конверс», 2024. – С. 527-530.

8. Багиров, Р.А. Адсорбционные процессы осушки, очистки и разделения газов / Р.А. Багиров // Обз. информ. сер.: Подготовка и переработка газа и газового конденсата. – М.: ВНИИЭгазпром, 1983. – В. 7. – 44 с.
9. Ефимович, Д.О. Оптимизация адсорбционной осушки углеводородных газов / Д.О. Ефимович // Научный электронный журнал «Матрица научного познания». – 2018. – № 7. – С. 6-7.