

DOI: 10.25205/978-5-4437-1843-9-124

**ПРИМЕНЕНИЕ КЛЕТОК *PARACOCCUS YEEI* ВКМ В-3302
ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БИОГИБРИДНОГО КАТАЛИЗАТОРА^{*}**

**APPLICATION OF *PARACOCCUS YEEI* VKM B-3302 CELLS
FOR THE PREPARATION OF BIOHYBRID CATALYST**

П. В. Рыбочкин, В. Н. Соромотин, О. А. Каманина

Тульский государственный университет

P. V. Rybochkin, V. N. Soromotin, O. A. Kamanina

Tula State University

 rybochkin.pavel.vl@mail.ru

Аннотация

В настоящее время активно изучают применение бактерий для биотехнологического получения наночастиц Pd и создания катализаторов. Клетки бактерий *Paracoccus yeei* ВКМ В-3302 использовали для формирования наночастиц палладия и приготовления биогибридного катализатора. Полученный катализатор представляет собой наночастицы палладия на поверхности и внутри клеток бактерий и обеспечивает высокий выход продуктов реакций Мизороки — Хека и Сузуки — Мияуры.

Abstract

Currently, the utilization of bacteria for the biotechnological production Pd nanoparticles and create catalysts is being actively studied. *Paracoccus yeei* VKM B-3302 bacterial cells were used to form palladium nanoparticles and prepare a biohybrid catalyst. The resulting catalyst is palladium nanoparticles on the surface and inside the bacterial cells. The catalyst provides a high yield of the Mizoroki-Heck and Suzuki-Miyaura reaction products.

Катализаторы необходимы для промышленного производства. Доля применения гетерогенных катализаторов составляет около 80–90 %, что связано с возможностью их отделения от реакционной смеси и многократного применения. Высокой активностью обладают катализаторы, представляющие собой наночастицы металлов на носителе. Особое значение имеют наночастицы палладия, благодаря его высокой каталитической активности и большому набору катализируемых реакций. Носитель не только обеспечивает возможность многократного применения катализатора, но и стабилизирует наночастицы, препятствуя их агломерированию и росту.

В качестве носителей наночастиц палладия используют различные углеродные материалы, неорганические носители в виде оксидов элементов (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , MgO , CeO_2 и др.). Для формирования и нанесения наночастиц применяют физические (лазерная абляция, осаждение из паровой фазы, магнетронное распыление) и химические (пропитка, золь-гель-метод, электрохимическое осаждение, применение ультразвука, в сверхкритической жидкости и др.) методы [1].

Активно изучают биогибридные катализаторы, полученные биотехнологическим путем с использованием клеток микроорганизмов [2]. Такой катализатор представляет собой наночастицы палладия внутри или на поверхности клетки. Получение наночастиц палладия с использованием клеток бактерий отличается меньшими энергетическими затратами, мягкими условиями, экологичностью по сравнению с традиционными физическими и химическими методами. Большинство существующих работ направлены на получение наночастиц палладия с применением бактерий анаэробов или факультативных анаэробов.

В рамках работы клетки аэробных бактерий *Paracoccus yeei* ВКМ В-3302 (*P. yeei*), выделенные из сточных вод, применили для получения биотехнологическим путем катализатора Pd/*P. yeei*. Для приготовления катализатора использовали методику, подразумевающую подачу водорода к смеси бактерий и ацетата палладия в дистиллированной воде с последующей сушкой на воздухе в течение 48 ч [3]. Полученный катализатор представляет собой наночастицы Pd, находящиеся внутри и на поверхности клеток (рис. 1).

Перед тестированием в реакции катализатор изучали различными методами. Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой продемонстрировала, что при целевой загрузке палладия в 5 масс.% на бактериях находится 4,4 масс.% металла. Средний размер наночастиц 4 нм. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) показала, что в биогибридном катализаторе палладий присутствует в трех формах: Pd(0), PdO и неизвест-

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-73-10013).

© П. В. Рыбочкин, В. Н. Соромотин, О. А. Каманина, 2025

ная форма палладия $\text{Pd}(x)$ (рис. 2, а). Неизвестная форма палладия с пиком 3d5/2 при энергии связи в 338,0 эВ, возможно, представляет собой комплекс металла с компонентами клеток. Комплекс, по всей видимости, недостаточно окристаллизован, так как по методу рентгенофазового анализа (РФА) зафиксирован только палладий в гранецентрированной кубической сингонии (см. рис. 2, б).

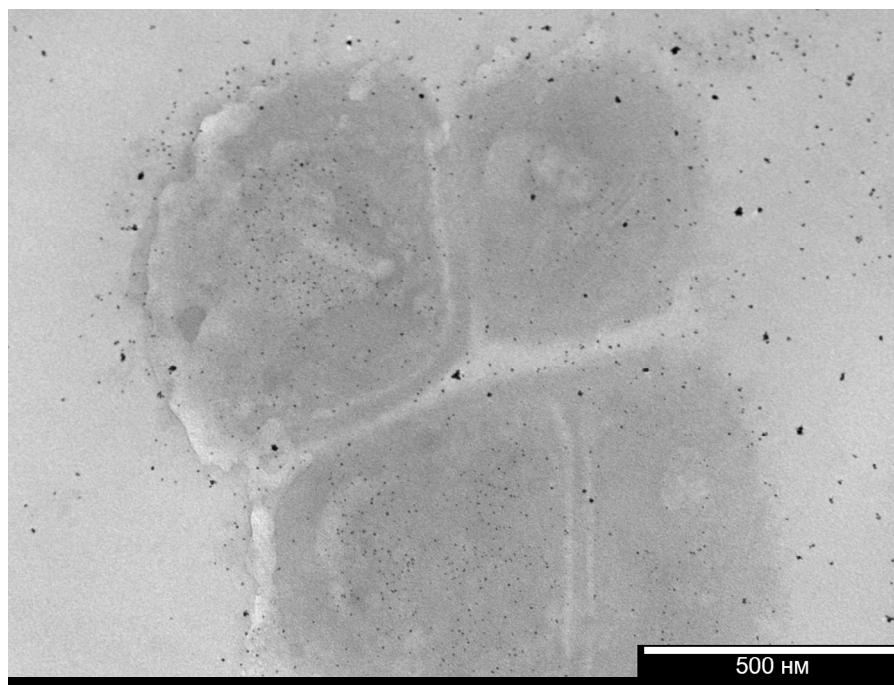


Рис. 1. Клетки *P. yeei* с наночастицами Pd после приготовления катализатора

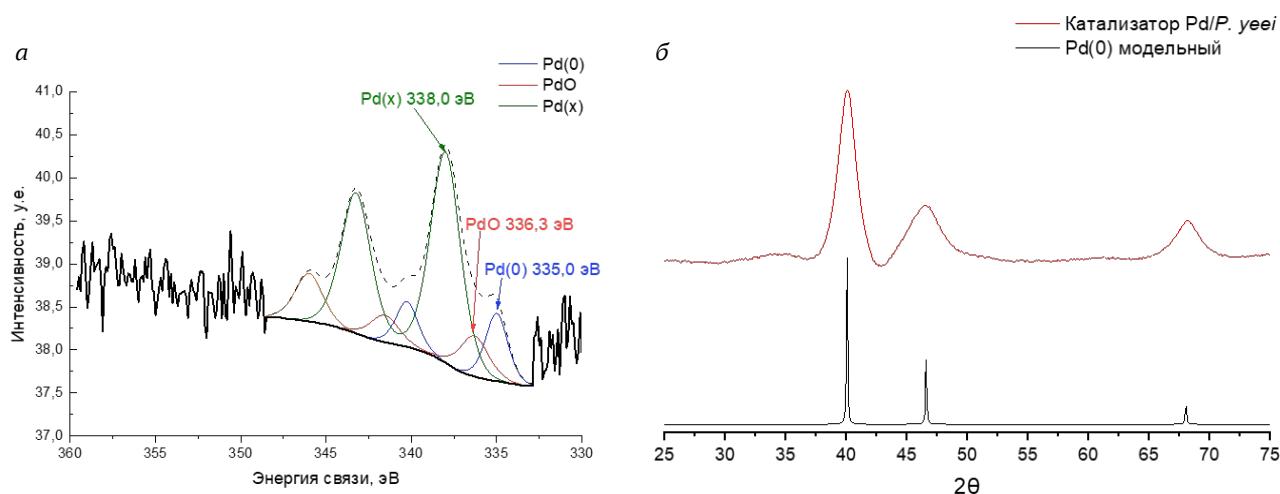


Рис. 2. Результаты исследования катализатора Pd/*P. yeei* рентгеновскими методами анализа:
а — спектр РФЭС; б — дифрактограммы РФА

Катализатор испытывали в реакциях Мизороки — Хека и Сузуки — Мияуры с различными субстратами в сравнении с коммерчески доступным катализатором палладием на активированном угле (Pd/C). Полученный биотехнологическим путем катализатор обеспечивает высокий выход продукта реакции, сопоставимый с коммерческим катализатором Pd/C. При этом Pd/*P. yeei* можно использовать не менее чем в 5 последовательных циклах с незначительным падением выхода продукта [4].

Таким образом, была показана возможность применения аэробных бактерий *Paracoccus yeei* BKM B-3302 для биотехнологического получения наночастиц палладия и приготовления катализатора Pd/*P. yeei*, который способен эффективно катализировать реакции сочетания C–C.

Литература

1. Joudeh N., Saragliadis A., Koster G. et al. Synthesis methods and applications of palladium nanoparticles: A review // Frontiers in Nanotechnology. 2022. Vol. 4. P. 1–24.
2. Egan-Morriss C., Kimber R. L., Powell N. A., Lloyd J. R. Biotechnological synthesis of Pd-based nanoparticle catalysts // Nanoscale Advances. 2022. Vol. 4, No. 3. P. 654–679.
3. Kamanina O. A., Rybochkin P. V., Borzova D. V. et. al. Sustainable catalysts in a short time: harnessing bacteria for swift palladium nanoparticle production // Nanoscale. 2025. Vol. 17. P. 5289–5300.
4. Rybochkin P. V., Perchikov R. N., Karlinskii B. Ya. et. al. Aerobic bacteria-supported biohybrid palladium catalysts for efficient cross-coupling reactions // Journal of Catalysis. 2024. Vol. 429. P. 115238.