

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ
НА ФОРМИРОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНОГО СЛОЯ
ИЗ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ВАНАДИЯ(V)
НА ПОВЕРХНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ МЕМБРАН**

О.В. Яровая¹

iarovaia.o.v@muctr.ru

Ю.М. Аверина¹

averinaJM@mail.ru

Р.Х. Магжанов²

ruh7899@gmail.com

Б.А. Кареткин¹

karetkin.b.a@muctr.ru

В.И. Панфилов¹

panfilov.v.i@muctr.ru

В.С. Болдырев^{1,3,4}

boldyrev.v.s@bmstu.ru

¹РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

²Московский Политех, Москва, Российская Федерация

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

⁴НПО «ЛКП», Хотьково, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Производство наночастиц и связанные с ними аддитивные процессы развиваются быстрыми темпами. Космическая промышленность, автомобилестроение, электроника, медицина и биотехнология — лишь краткий перечень потребителей наночастиц и их субпродуктов. Разработана технология нанесения слоя катализатора на основе наночастиц пентаоксида ванадия на мембранные керамические элементы, которые потенциально могут быть использованы как в процессах разделения биомассы, технологических газов и жидкостей, так и в производстве крупнотоннажных неорганических продуктов (например, серной кислоты). Установлено, что основное влияние на свойства образующихся покрытий (отсутствие трещин и высокую адгезию к подложке) оказывает концентрация наночастиц в растворе (золе). Получены образцы керамических мембран с нанесенными слоями наночастиц ванадия и толщиной слоя до 1 мкм. На основании данных о пористости поверхности сделано предположение о сохранении фильтрующих свойств мембранных элементов с увеличением рейтинга фильтрации за счет поверхностного слоя наночастиц.

Ключевые слова

Керамические мембраны, пентаоксид ванадия, наночастицы, водные дисперсии, каталитически активный слой

Сравнение полученного образца мембраны с аналогом показало, что предложенная технология нанесения наночастиц позволяет получать слой эквивалентной толщины, который содержит в 20 раз больше активного компонента. Эта технология нанесения и мембранный элемент позволят дополнительно расширить возможности в области биотехнологии и химических производств

Поступила 31.08.2022

Принята 17.10.2022

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-19-00367)

Введение. Рост промышленного производства диктует необходимость в поиске инновационных материалов. Спрос на редкоземельные, рассеянные и цветные металлы из года в год неуклонно возрастает, при этом развитие техники и технологии позволяет находить новые высокоэффективные направления применения, казалось бы, досконально изученным веществам.

Соединения ванадия находят широкое распространение в различных отраслях промышленного производства. Катализаторы окисления органических веществ [1, 2], процессы низкотемпературного восстановления оксида азота [3, 4], производство суперконденсаторов и емкостных элементов [5–7], ванадиевых редокс-батарей [8–10], катализатор процессов окисления красителя в водных средах [11], газовый сенсор [12] и производство серной кислоты по методу двойного контакта и двойной абсорбции [13, 14] — вот лишь краткий перечень применения ванадиевых катализаторов. Оксид ванадия обладает достаточно высокой токсичностью согласно паспорту безопасности, в соответствии с ГОСТ 30333–2007, что может повысить селективность при разделении биологических жидкостей, например, биомассы клеток и культуральной жидкости.

Не менее актуальным остается вопрос обеспечения эффективного контакта катализатора с другими компонентами системы, участвующими в реакциях. Применение золь и гетерогенных систем не всегда удобно с позиции технологии, при этом существенно возрастают потери катализатора и возникает вопрос эффективного улавливания наночастиц пентаоксида ванадия. Кроме экономической составляющей, серьезное опасение вызывает высокая токсичность пентаоксида ванадия и процессы биоаккумуляции или ингибирования биоценозов в случае попадания наночастиц в окружающую среду, что обуславливает актуальность новых способов нанесения ванадия.

В качестве основных направлений иммобилизации соединений ванадия можно выделить:

- 1) иммобилизацию на стекловолоконистых наполнителях с дополнительным поверхностным слоем диоксида кремния [15];
- 2) диатомитовую основу с добавкой оксидов калия [16, 17];
- 3) носители на основе оксида алюминия [18];
- 4) носители на основе диоксида кремния [19].

В отдельных источниках встречается информация о возможности использования в качестве носителя фторидов магния [20], однако эта технология не нашла широкого распространения.

В последнее время применяют керамические мембранные элементы на основе оксидов алюминия. Такие материалы нашли широкое распространение в процессах очистки воды [21–24] и за счет развитой поверхности и варьируемого размера пор могут стать носителем для ванадиевого катализатора, обеспечивая максимальную степень контакта среда–катализатор.

Цель работы — оценка возможности иммобилизации каталитически активного слоя из наночастиц оксида ванадия(V) на поверхности керамической мембраны для дальнейшего применения в биотехнологиях.

Материалы и методы исследования. Синтез золей осуществляли по методу Бильца [25]. Перетирали NH_4VO_3 в присутствии незначительного количества воды и добавляли 10 мл соляной кислоты. Образовавшийся осадок переносили на фильтр и промывали водой. Осадок перемещали с фильтра в колбу Эрленмейера и добавляли 100 мл воды. Полученный раствор пропускали через керамическую мембрану (прокачка через межтрубное пространство под вакуумом).

В качестве подложек использовали пористые трубчатые керамические микрофльтрационные мембраны на основе α -оксида алюминия с радиусом сквозных пор 2,7...3,7 мкм [26]. Микрофотографии керамической мембраны приведены на рис. 1.

Теоретическую массу частиц и толщину слоев пентаоксида ванадия рассчитывали по формулам

$$m_3 = V_3 \rho_3; \quad m_ч = \frac{C_ч V_3}{100 \%}; \quad V_ч = \frac{m_ч}{\rho_ч}; \quad V_{сл} = \frac{V_ч}{1 - \varepsilon}; \quad S_{п} = 2\pi r h; \quad h_{сл} = \frac{V_{сл}}{S_{п}},$$

где m_3 — масса золя, г; V_3 — объем золя, мл; ρ_3 — плотность золя, г/см³; $m_ч$ — масса частиц, г; $C_ч$ — концентрация частиц, % (масс.); $V_ч$ — объем частиц, см³; $\rho_ч$ — плотность частиц, г/см³; $V_{сл}$ — объем слоя, см³; ε — пористость, % (в расчетах $\varepsilon = 40$ %); $S_{п}$ — площадь поверхности мембраны, см²; r — радиус мембраны, см; h — длина мембраны, см; $h_{сл}$ — толщина слоя, мкм.

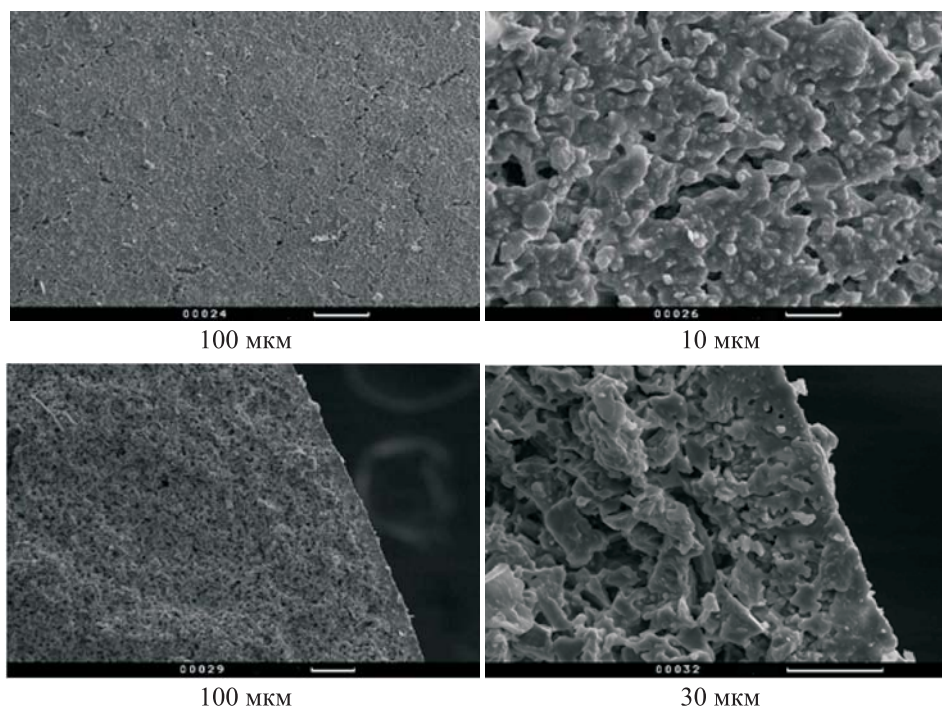


Рис. 1. Микрофотографии керамической мембраны на основе α -оксида алюминия

Размер пор на поверхности мембран рассчитывали методом пузырька [27].

Результаты и их обсуждение. На первом этапе экспериментов рассчитано теоретическое содержание пентаоксида ванадия на поверхности мембраны в зависимости от ее длины и условий нанесения. Полученные расчетные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментов по получению нанесенных слоев

Концентрация, % (масс.)			Объем филь- трата, мл	Масса частиц на всей поверхно- сти мембраны, мг	Толщина слоя, мкм
золя, взятого для нанесения	частиц V_2O_5	фильтрата			
0,028	0,012	0,016	25	3	0,473
			40	4,8	0,758
			50	6	0,948
			100	12	1,896
0,012	0,007	0,005	50	3,5	0,553
			25	1,8	0,276

В соответствии с расчетными данными в зависимости от объема пропускаемого золя наночастиц пентаоксида ванадия возможно варьирование толщины слоя, при этом теоретически в качестве параметров варьирования могут выступать как концентрация золя, так и объем пропускаемого раствора.

Микрофотографии керамической трубчатой мембраны с нанесенным слоем после обжига при температуре 500 °С приведены на рис. 2. Измеренная толщина слоя 0,3 мкм, что полностью согласуется с результатами расчета (см. табл. 1).

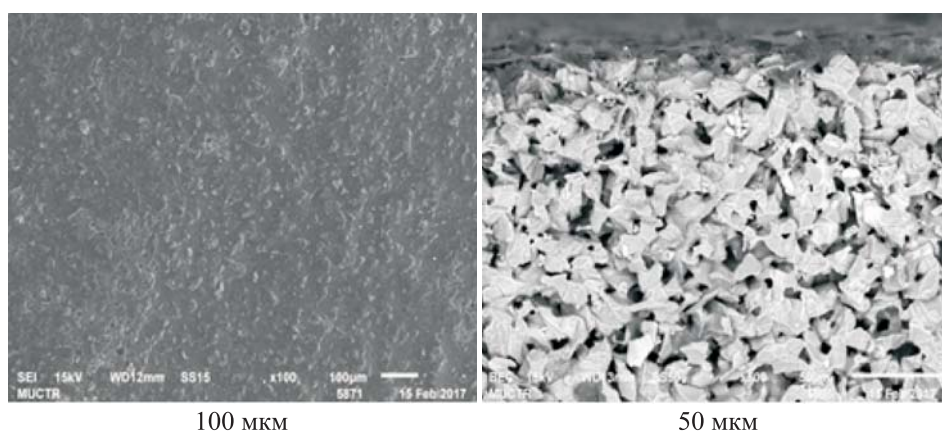


Рис. 2. Микрофотографии керамической трубчатой мембраны с нанесенным слоем пентаоксида ванадия

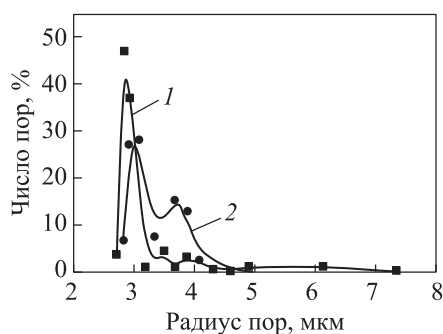


Рис. 3. Распределения пор по размерам до (1) и после (2) нанесения слоя пентаоксида ванадия

Для оценки влияния слоя пентаоксида ванадия на пористость керамических мембран проведены измерения радиуса пор до и после нанесения слоя пентаоксида ванадия на керамическую мембрану. Полученные результаты показаны на рис. 3.

Согласно зависимости на рис. 3, один слой пентаоксида ванадия, нанесенный на поверхность керамической мембраны, не оказывает существенного влияния на радиус пор.

На втором этапе проведена оценка влияния концентрации золя и объема пропускаемого раствора на параметры нанесенного слоя. Полученные данные приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Влияние концентрации золя на параметры слоя пентаоксида ванадия при объеме фильтрата 25 мл

Номер эксперимента	Концентрация, % (масс.)		Толщина слоя, мкм	Масса		
	золя, взятого для нанесения	ванадат-ионов в фильтрате		частиц на см ² (т), мг/см ²	частиц на всей поверхности мембраны, мг	частиц на см ² , мг/см ²
1	0,009	0,002	0,289	0,06	1,8	0,06
2	0,010	0,003	0,307	0,06	1,8	0,06
3	0,012	0,002	0,494	0,09	2,6	0,10
4	0,015	0,004	0,474	0,10	3,4	0,12
5	0,016	0,004	0,522	0,11	3,6	0,13

Таблица 3

Влияние объема пропускаемого фильтрата на параметры слоя пентаоксида ванадия (концентрация золя, взятого для нанесения, 0,008 % (масс.), концентрация ванадат-ионов в фильтрате 0,0039 % (масс.))

Номер эксперимента	Объем фильтрата, мл	Толщина слоя, мкм	Масса		
			частиц (т), мг	частиц на всей поверхности мембраны, мг	частиц на см ² , мг/см ²
1	50	0,333	1,9	2,1	0,07
2	60	0,400	2,3	2,6	0,09
3	70	0,467	2,7	2,9	0,10

Сопоставлением данных визуальных наблюдений и данных из табл. 2 установлено, что при концентрации золя 0,009...0,015 % (масс.) на поверхности мембраны формируются равномерные слои (рис. 4, а). При увеличении концентрации золя до 0,015 % (масс.) в слое наблюдаются трещины (рис. 4, б).

Третьим и заключительным этапом исследований стала оценка влияния процесса термообработки на качество и параметры слоя катализатора. Фотографии мембран с нанесенным слоем после термообработки при температуре 500 °С и после сушки на воздухе показаны на рис. 5.

На основании данных из табл. 3 был сделан вывод, что слои с аналогичными характеристиками можно получить, отфильтровывая больший объем золя с меньшей концентрацией.

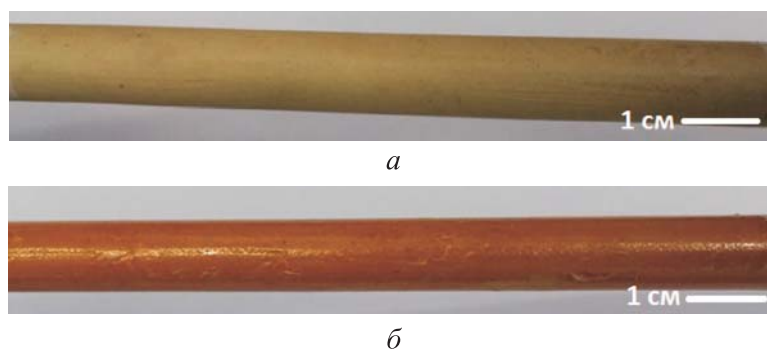


Рис. 4. Фотографии нанесенных слоев пентаоксида ванадия после сушки на воздухе

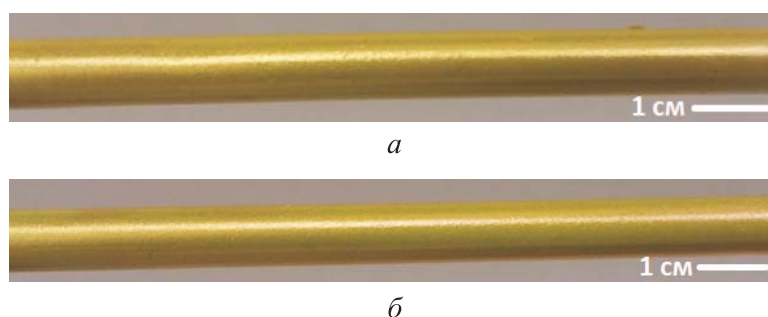


Рис. 5. Фотографии нанесенных слоев пентаоксида ванадия после термообработки при температуре 500 °С (а) и после сушки на воздухе (б)

Объем фильтрата для экспериментов 50 мл. Оцененная толщина слоя составляла около 1 мкм, а масса нанесенного слоя пентаоксида ванадия — около 0,2 мг/см². Влияние температуры на процесс спекания не оценивалось.

Заключение. Разработана технология нанесения катализатора на основе пентаоксида ванадия на мембранные керамические элементы.

Экспериментально установлено, что основным параметром, определяющим качество слоя (отсутствие трещин и высокую адгезию к подложке), является концентрация наночастиц в золе, используемом для нанесения каталитического покрытия.

Получены образцы мембран с нанесенными слоями толщиной до 1 мкм. Установлено, что распределение макропор по размерам после однократного нанесения ванадиевого покрытия изменяется в рамках погрешности метода определения, что косвенно свидетельствует о сохранении фильтрующих свойств у керамических мембранных элементов.

Сопоставление массы нанесенного слоя пентаоксида ванадия с массой слоя, полученного методом пропитки, показало, что по предлагаемой технологии нанесения получают слой толщиной до 1 мкм, содержащий в 2 раза больше активного компонента, чем аналогичные образцы с толщиной слоя 10 мкм.

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность ЦКП РХТУ им. Д.И. Менделеева.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Schimmoeller B., Schulz H., Pratsinis S.E., et al. Ceramic foams directly-coated with flame-made V_2O_5/TiO_2 for synthesis of phthalic anhydride. *J. Catal.*, 2006, vol. 243, iss. 1, pp. 82–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2006.07.007>
- [2] Farzaneh F., Zamanifar E., Foruzin L.J., et al. Synthesis and characterization of V_2O_5/SiO_2 nanoparticles as efficient catalyst for aromatization 1,4-dihydropyridines. *J.Sci.I.R.I.*, 2012, vol. 23, no. 4, pp. 313–318. DOI: <https://doi.org/10.22059/JSCIENCES.2012.30551>
- [3] Lei Z., Long A., Wen C., et al. Experimental and kinetic study of low temperature selective catalytic reduction of NO with NH_3 over the V_2O_5/AC catalyst. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011, vol. 50, iss. 9, pp. 5360–5368. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie102110r>
- [4] Huang Z., Zhu Z., Liu Z. Combined effect of H_2O and SO_2 on V_2O_5/AC catalysts for NO reduction with ammonia at lower temperatures. *Appl. Catal. B*, 2002, vol. 39, iss. 4, pp. 361–368. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(02\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(02)00122-4)
- [5] Boukhalifa S., Evanoff K., Yushin G. Atomic layer deposition of vanadium oxide on carbon nanotubes for high-power supercapacitor electrodes. *Energy Environ. Sci.*, 2012, vol. 5, iss. 5, pp. 6872–6879. DOI: <https://doi.org/10.1039/C2EE21110F>
- [6] Chen X., Pomerantseva E., Banerjee P., et al. Ozone-based atomic layer deposition of crystalline V_2O_5 films for high performance electrochemical energy storage. *Chem. Mater.*, 2012, vol. 24, iss. 7, pp. 1255–1261. DOI: <https://doi.org/10.1021/cm202901z>
- [7] Peng C., Jin M., Han D., et al. Structural engineering of V_2O_5 nanobelts for flexible supercapacitors. *Mater. Lett.*, 2022, vol. 320, art. 132391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132391>
- [8] Петров М.М., Пичугов Р.Д., Локтионов П.А. и др. Ячейка для тестирования мембранно-электродного блока ванадиевой проточной редокс-батареи. *Доклады РАН. Химия, науки о материалах*, 2020, т. 491, № 1, с. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2686953520020077>
- [9] Loktionov P., Kartashova N., Konev D., et al. Fluoropolymer impregnated graphite foil as a bipolar plates of vanadium flow battery. *Int. J. Energy Res.*, 2022, vol. 46, iss. 8, pp. 10123–10132. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.7088>

- [10] Loktionov P., Pichugov R., Konev D., et al. Promising material based on paraffin-impregnated graphite foil with increased electrochemical stability for bipolar plates of vanadium redox flow battery. *Chemistry Select*, 2021, vol. 6, iss. 46, pp. 13342–13349. DOI: <https://doi.org/10.1002/slct.202103996>
- [11] Abdullah T.A., Juzsakova T., Rasheed R.T., et al. V₂O₅ nanoparticles for dyes removal from water. *Chem. J. Mold.*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 102–111. DOI: <http://dx.doi.org/10.19261/cjm.2021.911>
- [12] Alrammouz R., Lazerges M., Pironon J., et al. V₂O₅ gas sensors: a review. *Sens. Ac-tuator A Phys.*, 2021, vol. 332, part 2, art. 113179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113179>
- [13] Hosseini-Ardali S., Fattahi M., Kazemeini M., et al. Preparation, physiochemical and kinetic investigations of V₂O₅/SiO₂ catalyst for the sulfuric acid production. *Int. J. Eng.*, 2016, vol. 29, no. 11, pp. 1478–1488. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.11b.01>
- [14] Vo P.N.X., Le-Phuc N., Tran T.V., et al. Oxidative regeneration study of spent V₂O₅ catalyst from sulfuric acid manufacture. *Reac. Kinet. Mech. Cat.*, 2018, vol. 125, no. 2, pp. 887–900. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11144-018-1442-9>
- [15] Микенин П.Е., Цырульников П.Г., Котолевич Ю.С. и др. Ванадийоксидные катализаторы на основе структурированных микроволокнистых носителей для селективного окисления сероводорода. *Катализ в промышленности*, 2015, № 1, с. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0387-2015-1-64-69>
- [16] Мухленов И.П., ред. Технология катализаторов. Л., Химия, 1989.
- [17] Лаврищева С.А., Нефедова Л.А., Кузнецова С.М. и др. Сернокислотный ванадиевый катализатор на основе природных силикатных носителей. *Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология*, 2005, т. 48, № 1, с. 105–109.
- [18] Гришин А.Н., Лаврищева С.А., Нефедова Л.А. Формирование тонкослойного ванадийсодержащего покрытия блочных катализаторов очистки сбросных газов от диоксида серы. *Известия СПбГТИ (ТУ)*, 2011, № 12, с. 21–23.
- [19] Харламова Т.С., Уразов Х.Х., Водянкина О.В. Влияние модифицирования лантаном на состояние и структурные особенности ванадия в нанесенных V₂O₅/SiO₂-катализаторах. *Кинетика и катализ*, 2019, т. 60, № 4, с. 499–508. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0453881119040075>
- [20] Wojciechowska M., Nowinska K., Kania W., et al. Magnesium fluoride as a support for vanadium catalysts. *React. Kinet. Catal. Lett.*, 1975, vol. 2, no. 3, pp. 229–236. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02068195>
- [21] Averina J.M., Subcheva E.N., Cherednichenko A.G., et al. Nanofiltration composite membranes using layered double hydroxides for water treatment. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2020, vol. 3.1, pp. 273–280. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2020/3.1/s12.036>

[22] Averina Y.M., Subcheva E.N., Kurbatov A.Yu., et al. Study of the oxidation process of divalent iron in aqueous solutions during aeration through ceramic membranes modified by layered double hydroxides. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 815, no. 1, art. 012018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/815/1/012018>

[23] Nyan H.L., Aung K.Z., Yarovaya O.V., et al. Catalytically active membranes for decomposition of organic compounds in aqueous solutions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 815, no. 1, art. 012022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/815/1/012022>

[24] Kuzin E., Averina Yu., Kurbatov A., et al. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes*, 2022, vol. 10, iss. 3, art. no. 440. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10030440>

[25] Брауэр Г., Глемзер О., Грубэ Г.Л. и др. Руководство по неорганическому синтезу. Т. 5. М., Мир, 1985.

[26] Аверина Ю.М., Курбатов А.Ю., Сахаров Д.А. и др. Разработка технологии получения наночистот керамических мембран. *Стекло и керамика*, 2020, № 3, с. 22–27.

[27] Аверина Ю.М., Аснис Н.А., Ваграмян Т.А. и др. Исследование скорости окисления ионов Fe^{2+} в воде при барботировании воздуха. *Теоретические основы химической технологии*, 2018, т. 52, № 1, с. 79–82. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040357118010104>

Яровая Оксана Викторовна — канд. хим. наук, доцент кафедры коллоидной химии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Аверина Юлия Михайловна — канд. техн. наук, доцент кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Магжанов Рушан Халитович — преподаватель кафедры «ХимБиоТех» Московского Политеха (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38).

Кареткин Борис Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры биотехнологии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Панфилов Виктор Иванович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнологии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Болдырев Вениамин Станиславович — канд. техн. наук, студент магистратуры факультета цифровых технологий и химического инжиниринга РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9); доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий отделом «Инжини-

ринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); советник директора НИИ НПО «ЛКП» (Российская Федерация, 141370, Московская обл., Хотьково, Художественный проезд, д. 2е).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Яровая О.В., Аверина Ю.М., Магжанов Р.Х. и др. Исследование влияния параметров нанесения на формирование каталитически активного слоя из наночастиц оксида ванадия(V) на поверхности керамических мембран. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 1 (112), с. 118–132.

EDN: HPAHEU

STUDYING THE DEPOSITION PARAMETERS EFFECT ON FORMATION OF THE VANADIUM(V) OXIDE NANOPARTICLES CATALYTICALLY ACTIVE LAYER ON THE CERAMIC MEMBRANES SURFACE

O.V. Yarovaia¹

Yu.M. Averina¹

R.Kh. Magzhanov²

B.A. Karetkin¹

V.I. Panfilov¹

V.S. Boldyrev^{1,3,4}

iarovaia.o.v@muctr.ru

averinaJM@mail.ru

ruh7899@gmail.com

karetkin.b.a@muctr.ru

panfilov.v.i@muctr.ru

boldyrev.v.s@bmstu.ru

¹ **Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
Moscow, Russian Federation**

² **Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation**

³ **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

⁴ **NPO “Lakokraspokrytie”, Khotkovo, Moscow Region, Russian Federation**

Abstract

Nanoparticles production and the related additive processes are being developed at a rapid pace. Space industry, automotive industry, electronics, medicine and biotechnology are just a short list of the nanoparticles and their by-products consumers. A technology was developed for applying a catalyst layer based on the vanadium pentoxide nanoparticles onto the membrane ceramic elements, which could potentially be used both in the biomass, technological gases and liquids separation processes, and in manufacture of the large-scale inorganic products (for example, the sulfuric acid). It was established that main influence on the resulting coating properties (no cracks and

Keywords

*Ceramic membranes,
vanadium pentoxide,
nanoparticles, aqueous
dispersions, catalytically
active layer*

high adhesion to the substrate) was exerted by the nanoparticles concentration in the solution (ash). Samples of the ceramic membranes with deposited layers of vanadium nanoparticles and a layer thickness of up to 1 μm were obtained. Based on data on the surface porosity, an assumption was made on maintaining filtering properties of the membrane elements with an increase in filtration rating due to the nanoparticles surface layer. Comparison of the resulting membrane sample with an analogue showed that the proposed technology for applying the nanoparticles and the resulting layer of equivalent thickness contained 20 times more of the active component. This application technology and the membrane element would further expand capabilities in biotechnologies and chemical production

Received 31.08.2022

Accepted 17.10.2022

© Author(s), 2024

This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-19-00367)

REFERENCES

- [1] Schimmoeller B., Schulz H., Pratsinis S.E., et al. Ceramic foams directly-coated with flame-made $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ for synthesis of phthalic anhydride. *J. Catal.*, 2006, vol. 243, iss. 1, pp. 82–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2006.07.007>
- [2] Farzaneh F., Zamanifar E., Foruzin L.J., et al. Synthesis and characterization of $\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ nanoparticles as efficient catalyst for aromatization 1,4-dihydropyridines. *J.Sci.I.R.I.*, 2012, vol. 23, no. 4, pp. 313–318. DOI: <https://doi.org/10.22059/JSCIENCES.2012.30551>
- [3] Lei Z., Long A., Wen C., et al. Experimental and kinetic study of low temperature selective catalytic reduction of NO with NH_3 over the $\text{V}_2\text{O}_5/\text{AC}$ catalyst. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011, vol. 50, iss. 9, pp. 5360–5368. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie102110r>
- [4] Huang Z., Zhu Z., Liu Z. Combined effect of H_2O and SO_2 on $\text{V}_2\text{O}_5/\text{AC}$ catalysts for NO reduction with ammonia at lower temperatures. *Appl. Catal. B*, 2002, vol. 39, iss. 4, pp. 361–368. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(02\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(02)00122-4)
- [5] Boukhalfa S., Evanoff K., Yushin G. Atomic layer deposition of vanadium oxide on carbon nanotubes for high-power supercapacitor electrodes. *Energy Environ. Sci.*, 2012, vol. 5, iss. 5, pp. 6872–6879. DOI: <https://doi.org/10.1039/C2EE21110F>
- [6] Chen X., Pomerantseva E., Banerjee P., et al. Ozone-based atomic layer deposition of crystalline V_2O_5 films for high performance electrochemical energy storage. *Chem. Mater.*, 2012, vol. 24, iss. 7, pp. 1255–1261. DOI: <https://doi.org/10.1021/cm202901z>
- [7] Peng C., Jin M., Han D., et al. Structural engineering of V_2O_5 nanobelts for flexible supercapacitors. *Mater. Lett.*, 2022, vol. 320, art. 132391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132391>

- [8] Petrov M.M., Pichugov R.D., Loktionov P.A., et al. Test cell for membrane electrode assembly of the vanadium redox flow battery. *Dokl. Phys. Chem.*, 2020, vol. 491, no. 1, pp. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0012501620030021>
- [9] Loktionov P., Kartashova N., Konev D., et al. Fluoropolymer impregnated graphite foil as a bipolar plates of vanadium flow battery. *Int. J. Energy Res.*, 2022, vol. 46, iss. 8, pp. 10123–10132. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.7088>
- [10] Loktionov P., Pichugov R., Konev D., et al. Promising material based on paraffin-impregnated graphite foil with increased electrochemical stability for bipolar plates of vanadium redox flow battery. *Chemistry Select*, 2021, vol. 6, iss. 46, pp. 13342–13349. DOI: <https://doi.org/10.1002/slct.202103996>
- [11] Abdullah T.A., Juzsakova T., Rasheed R.T., et al. V₂O₅ nanoparticles for dyes removal from water. *Chem. J. Mold.*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 102–111. DOI: <http://dx.doi.org/10.19261/cjm.2021.911>
- [12] Alrammouz R., Lazerges M., Pironon J., et al. V₂O₅ gas sensors: a review. *Sens. Actuator A Phys.*, 2021, vol. 332, part 2, art. 113179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113179>
- [13] Hosseini-Ardali S., Fattahi M., Kazemeini M., et al. Preparation, physiochemical and kinetic investigations of V₂O₅/SiO₂ catalyst for the sulfuric acid production. *Int. J. Eng.*, 2016, vol. 29, no. 11, pp. 1478–1488. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.11b.01>
- [14] Vo P.N.X., Le-Phuc N., Tran T.V., et al. Oxidative regeneration study of spent V₂O₅ catalyst from sulfuric acid manufacture. *Reac. Kinet. Mech. Cat.*, 2018, vol. 125, no. 2, pp. 887–900. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11144-018-1442-9>
- [15] Mikenin P.E., Tsyurulnikov P.G., Kotolevich Yu.S., et al. The vanadium oxide catalysts on the base of the structured micro-fibrous support for selective oxidation of H₂S. *Kataliz v promyshlennosti*, 2015, no. 1, pp. 64–69 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0387-2015-1-64-69>
- [16] Mukhlenov I.P., ed. *Tekhnologiya katalizatorov [Catalyst technology]*. Leningrad, Khimiya Publ., 1989.
- [17] Lavrishcheva S.A., Nefedova L.A., Kuznetsova S.M., et al. Sulfur-acid vanadium catalyst based on natural silicate carriers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya [ChemChemTech]*, 2005, vol. 48, no. 1, pp. 105–109 (in Russ.).
- [18] Grishin A.N., Lavrishcheva S.A., Nefedova L.A. Formation of vanadium containing thin-layer of the covering of block catalysts of clearing of waste gases from the sulfur dioxide. *Izvestiya SPbGTI (TU) [Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)]*, 2011, no. 12, pp. 21–23 (in Russ.).
- [19] Kharlamova T.S., Urazov Kh.Kh., Vodyankina O.V. Effect of modification of supported V₂O₅/SiO₂ catalysts by lanthanum on the state and structural peculiarities of vanadium. *Kinet. Catal.*, 2019, vol. 60, no. 4, pp. 465–473. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0023158419040050>

[20] Wojciechowska M., Nowinska K., Kania W., et al. Magnesium fluoride as a support for vanadium catalysts. *React. Kinet. Catal. Lett.*, 1975, vol. 2, no. 3, pp. 229–236.

DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02068195>

[21] Averina J.M., Subcheva E.N., Cherednichenko A.G., et al. Nanofiltration composite membranes using layered double hydroxides for water treatment. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2020, vol. 3.1, pp. 273–280.

DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2020/3.1/s12.036>

[22] Averina Y.M., Subcheva E.N., Kurbatov A.Yu., et al. Study of the oxidation process of divalent iron in aqueous solutions during aeration through ceramic membranes modified by layered double hydroxides. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 815, no. 1, art. 012018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/815/1/012018>

[23] Nyan H.L., Aung K.Z., Yarovaya O.V., et al. Catalytically active membranes for decomposition of organic compounds in aqueous solutions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 815, no. 1, art. 012022.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/815/1/012022>

[24] Kuzin E., Averina Yu., Kurbatov A., et al. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes*, 2022, vol. 10, iss. 3, art. no. 440. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10030440>

[25] Brauer G. *Handbuch der Präparativen Anorganischen Chemie*. F. Enke, 1981.

[26] Averina Yu.M., Kurbatov A.Yu., Sakharov D.A., et al. Development of technology for nanofiltration ceramic membranes. *Steklo i keramika [Glass and Ceramics]*, 2020, no. 3, pp. 22–27 (in Russ.).

[27] Averina Yu.M., Asnis N.A., Vagramyan T.A., et al. Study of the oxidation rate of Fe²⁺ ions in water during air bubbling. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 74–77. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579518010013>

Yarovaya O.V. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Colloid Chemistry, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Averina Yu.M. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Innovative Materials and Corrosion Protection, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Magzhanov R.Kh. — Teacher, Department of Chemistry and Biotechnology, Moscow Polytechnic University (Bolshaya Semyonovskaya ul. 38, Moscow, 107023 Russian Federation).

Karetkin B.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Biotechnology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Panfilov V.I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Biotechnology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Boldyrev V.S. — Cand. Sc. (Eng.), Master Student, Faculty of Digital Technology and Chemical Engineering, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation); Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University, Head of the Department of Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Director's Adviser, Research Institute, NPO "Lakokraspokrytie" (Khudozhestvennyy proezd 2e, Moscow Region, Khotkovo, 141370 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Yarovaya O.V., Averina Yu.M., Magzhanov R.Kh., et al. Studying the deposition parameters effect on formation of the vanadium(V) oxide nanoparticles catalytically active layer on the ceramic membranes surface. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 1 (112), pp. 118–132 (in Russ.). EDN: HPAHEU