

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА И СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ ПЕНТАОКСИДА ВАНАДИЯ

О.В. Яровая¹

Ю.М. Аверина¹

Р.Х. Магжанов²

Б.А. Кареткин¹

В.И. Панфилов¹

В.С. Болдырев^{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 РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

² Московский Политех, Москва, Российская Федерация

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

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

Аннотация

Изложены результаты исследования возможности синтеза водных дисперсий наночастиц оксида ванадия (V), сохраняющих агрегативную устойчивость в течение длительного периода времени. В результате проведенных экспериментов получены трубчатые наночастицы пентаоксида ванадия (V_2O_5) длиной 50 мкм и диаметром 5...10 нм. Толщина стенок полученных трубок составила 1,1 нм. Экспериментально установлено, что тип применяемой кислоты не влияет на размер получаемых наночастиц, однако оказывает существенное влияние на срок хранения. Для увеличения оптимального срока хранения наночастиц в качестве реагента-пептизатора предложено применять растворы соляной кислоты. Указанный метод позволил не только увеличить стабильность системы, но и повысить концентрацию наночастиц до 1 % (масс.). В рамках экспериментов по изучению поверхностных характеристик полученных частиц установлено, что в интервале значений pH = 3,0–4,2 наночастицы заряжены отрицательно, агрегативная устойчивость в основном определяется электростатическим фактором. Предложенная химическая технология может быть использована для промышленного получения наночастиц пентаоксида ванадия в различных отраслях промышленности

Ключевые слова

Синтез, пентаоксид ванадия, трубчатые наночастицы, водные дисперсии, агрегативная устойчивость

Поступила 22.06.2022

Принята 23.08.2022

© Автор(ы), 2023

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

Введение. Развитие промышленности, повышение уровня жизни и производительности диктуют необходимость в разработке и внедрении новых высокоэффективных материалов и технологий.

Металлургическая промышленность и производимый ей сортамент продукции являются наиболее весомым показателем развития практически любой страны. Именно по объемам добычи сырья, производства и потребления металлов и их соединений можно сделать вывод о состоянии экономики, науки и даже процессов, связанных с реализацией концепции устойчивого развития (экология).

Наиболее перспективное направление металлургии — аддитивное производство, а также работы, связанные с получением и применением наночастиц. Наночастицы металлов применяют для изготовления сверхтвердых покрытий, производства протезов, полупроводников, компонентов электроники, в медицине и других областях [1–6].

В последнее время значительно возрос интерес к наночастицам на основе соединений ванадия. Основные направления применения наночастиц пентаоксида ванадия: производство серной кислоты методом двойного контакта двойной абсорбции [7–8]; оптические (газовые сенсоры) [9]; органический синтез [10, 11]; процессы окисления и восстановления производных азота (экологические направления) [12–14]; ванадиевые проточные редокс-батареи [15–17]; производство полупроводников и суперконденсаторов [17–19]; процессы очистки сточных вод [21–31].

Несмотря на достаточно большой список направлений применения наночастиц пентаоксида ванадия до сих пор существуют проблемы, связанные с их синтезом с учетом заданных размеров или свойств.

Цель работы — исследование процесса синтеза наночастиц пентаоксида ванадия и оценка влияния отдельных параметров процесса на свойства получаемых наночастиц.

Материалы и методы исследования. За основу процесса синтеза золь наночастиц выбран метод Бильца [23]. Ванадат аммония (NH_4VO_3) марки «х.ч.» перетирали в присутствии незначительного количества воды и вводили 10 мл кислоты (пептизирующий агент). Образовавшийся красный осадок вместе с жидкостью переносили на фильтр, давали жидкости стечь и промывали водой. Отмытый осадок переносили с фильтра в колбу Эрленмейера и добавляли 100 мл воды. Через некоторое время осадок исчезал и образовывался прозрачный оранжево-красный золь пентаоксида ванадия V_2O_5 .

Размеры частиц золь пентаоксида ванадия определяли по результатам анализа микрофотографий, полученных на просвечивающем элек-

тронном микроскопе *LEO 912AB Omega* (Германия) при ускоряющем напряжении 100 кВ. Определение размеров частиц проводили как на базе программного обеспечения микроскопа, так и с использованием программы *UTHSCSA ImageTool 3.0*.

Спектры поглощения водных растворов снимали на приборе марки *LEKI SS2110UV* в диапазоне значений длин волн 200...900 нм. Измерение электрофоретической подвижности выполняли на приборе *Photocor Compact Z*. Статистическую обработку проводили с помощью пакета программ *Origin 8.0*.

Результаты и их обсуждение. Спектры поглощения образцов золя пентаоксида ванадия, полученного с использованием в качестве пептизирующего агента соляной и азотной кислот, приведены на рис. 1. Использование серной кислоты не позволило получить стабильных зелей, поэтому ее не применяли в дальнейших экспериментах. Микрофотографии образцов приведены на рис. 2.

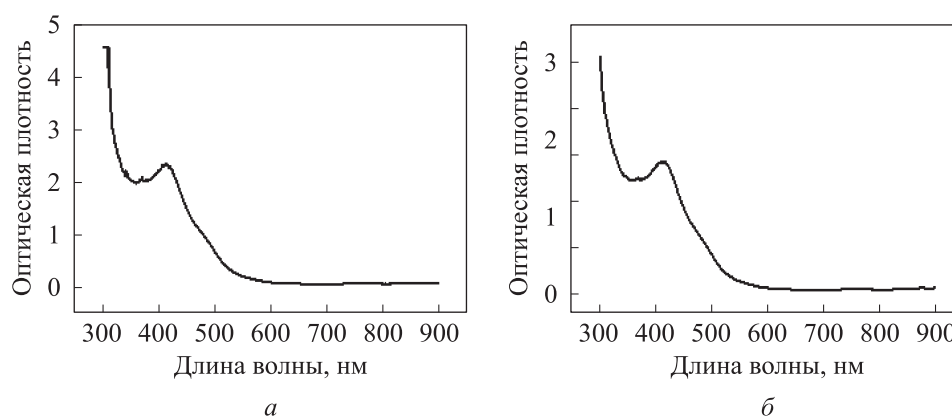


Рис. 1. Спектры поглощения зелей пентаоксида ванадия, синтезированных в присутствии соляной (а) и азотной (б) кислот

Согласно представленным на рис. 1 и 2 данным, тип применяемого пептизирующего агента существенно не влияет на морфологию частиц. Полученные золи наночастиц пентаоксида ванадия представляют собой нановолокна длиной более 50 мкм и толщиной 5...10 нм. Результаты расширенного анализа показали, что частицы являются не обычными нановолокнами, а нанотрубками, что хорошо согласуется с литературными данными, представленными в [24]. Толщина стенки составляет примерно 1,1 нм.

Несмотря на отсутствие воздействия типа пептизирующего агента на размер и форму наночастиц, отмечено влияние типа применяемой

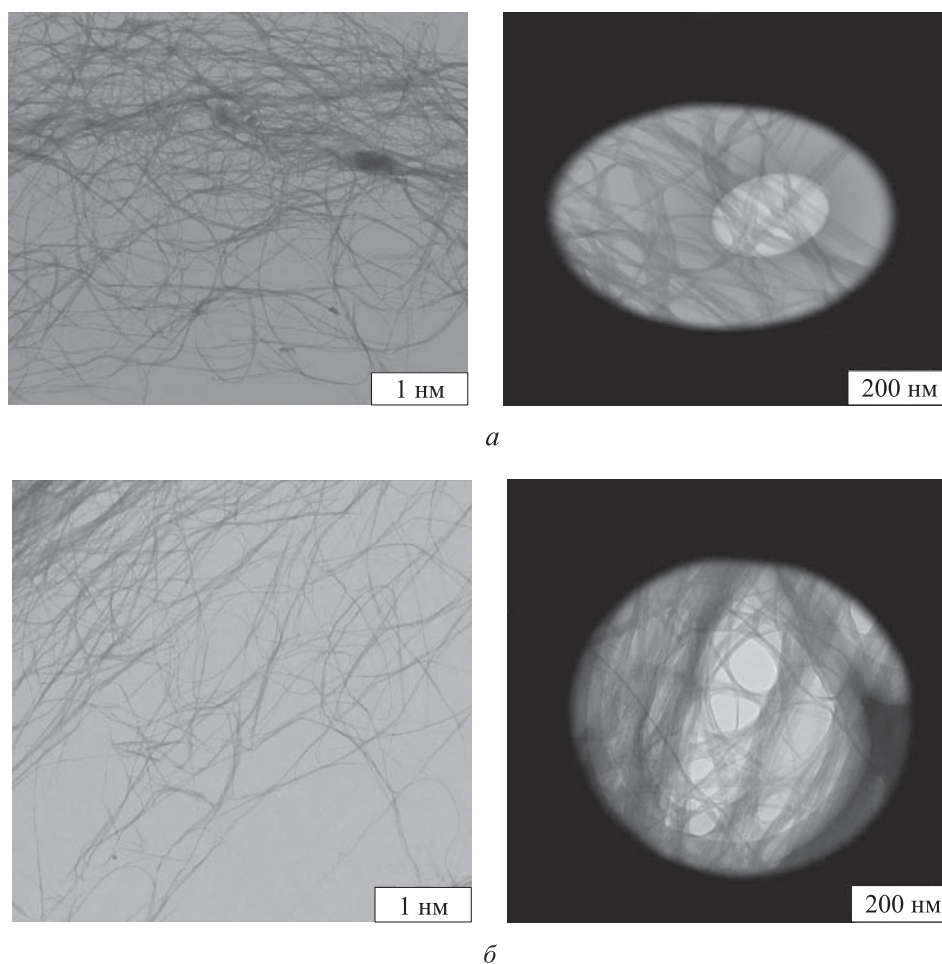


Рис. 2. Микрофотографии наночастиц пентаоксида ванадия, синтезированных в присутствии соляной (а) и азотной (б) кислот

кислоты на переход оксида ванадия (V) в коллоидную форму. Полученные при использовании соляной кислоты золи хорошо воспроизводятся, а их концентрация составляет 0,6...1,0 % (масс.). При этом золи, полученные при использовании азотной кислоты, плохо воспроизводимы и не превышали концентрацию 0,2 % (масс.). Для дальнейших экспериментов взяты золи, полученные при применении в качестве пептизирующего реагента соляной кислоты.

Далее была изучена агрегативная устойчивость водных дисперсий оксида ванадия (V). Полученные данные представлены на рис. 3.

Можно сделать вывод, что образованная пептизированными соляной кислотой наночастицами пентаоксида ванадия система подчиняется закону Ламберта — Бугера — Бера при концентрации золь до 0,04 % (масс.).

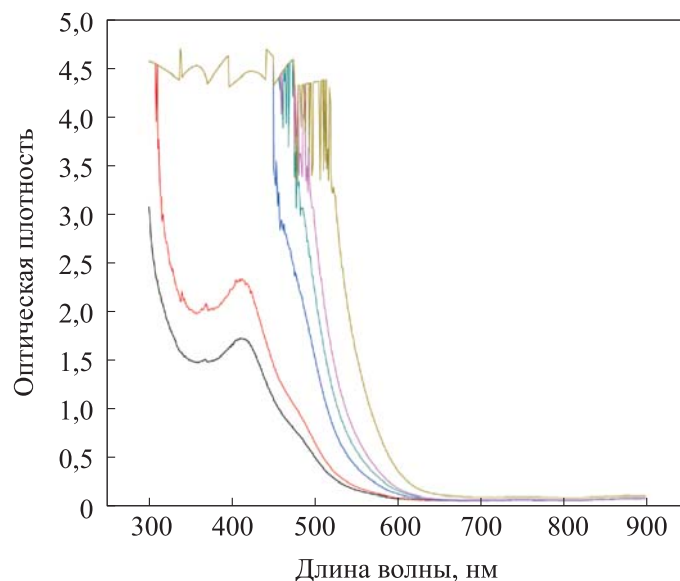


Рис. 3. Спектры поглощения образцов золя пентаоксида ванадия при концентрации 0,012 (—), 0,024 (—), 0,037 (—), 0,045 (—), 0,058 (—) и 0,132 % (масс.) (—)

Затем изучено влияние добавки электролита на устойчивость золь пентаоксида ванадия. Для оценки возможности использования турбидиметрического метода исследования получены спектры поглощения золь в присутствии хлорида натрия. Один из спектров приведен на рис. 4. Сделан вывод, что добавка электролита оказывает влияние на спектры поглощения золя пентаоксида ванадия при длине волны до 650 нм.

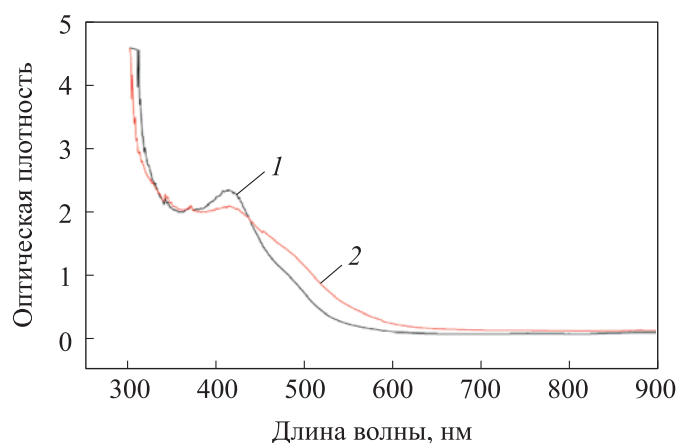


Рис. 4. Спектры поглощения образцов золя пентаоксида ванадия (0,024 % (масс.)) без электролита (—) и с электролитом 0,03 М NaCl (—)

Исследование дзета-потенциала полученных наночастиц пентаоксида ванадия показало, что в диапазоне значений концентрации 0,08...0,11 % (масс.) частицы заряжены отрицательно (-40 ± 1 мВ). Относительно высокое значение дзета-потенциала частиц может косвенно свидетельствовать об агрегативной устойчивости системы [25]. Вероятно, отрицательный заряд наночастиц связан с адсорбцией ванадат-ионов на поверхности частиц.

На заключительном этапе работы определили интервал pH, характерный для максимальной агрегативной устойчивости системы. Исследования проводили при длине волны 650 нм. Полученные в результате эксперимента данные представлены на рис. 5.

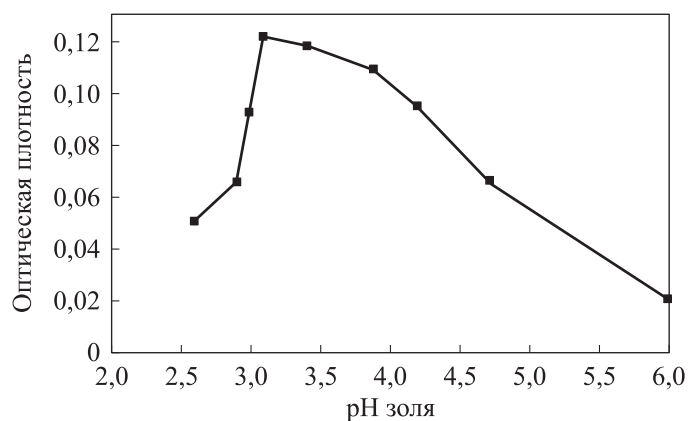


Рис. 5. Зависимость оптической плотности от pH золя

При снижении pH дисперсионной среды наблюдается агрегация частиц, тогда как увеличение значений pH сопровождается частичным растворением наночастиц. Отмечено, что оптимальный интервал pH, в котором золи сохраняли агрегативную устойчивость, составляет 3,0–4,2.

Заключение. Предложены методики синтеза агрегативно устойчивых водных дисперсий наночастиц оксида ванадия (V), сохраняющих агрегативную устойчивость в течение нескольких месяцев, с использованием соляной и азотной кислот. Получены наночастицы, представляющие собой нанотрубки длиной более 50 мкм и диаметром 5...10 нм с толщиной стенки 1,1 нм. Установлено, что природа кислоты не влияет на форму и размер частиц.

Использование соляной кислоты обеспечивает лучшую воспроизводимость свойств синтезированных зольей, также возможно получение зольей более высоких концентраций (до 1 % (масс.)). Определены основные коллоидно-химические свойства агрегативно устойчивых водных

дисперсий наночастиц оксида ванадия (V). Показано, что в интервале рН = 3,0–4,2 наночастицы заряжены отрицательно и агрегативная устойчивость в основном определяется электростатическим фактором.

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность ЦКП им. Д.И. Менделеева за предоставленное оборудование и плодотворное обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Medhi R., Marquez M.D., Lee T.R. Visible-light-active doped metal oxide nanoparticles: review of their synthesis, properties, and applications. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2020, vol. 3, no. 7, pp. 6156–6185. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01035>
- [2] Воробьева С.А., Ржеусский С.Э. Применение в наномедицине и фармакологии наночастиц металлов и их неорганических соединений, полученных межфазным и контактным взаимодействием. *Вестник РГМУ*, 2018, № 6, с. 111–115. DOI: <https://doi.org/10.24075/vrgmu.2018.076>
- [3] Тучина Е.С., Гвоздев Г.А., Кособудский И.Д. Изучение антибактериальных свойств покрытий на основе наночастиц металлов (Ag, Zn) в матрице диоксида кремния. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология*, 2018, т. 18, № 2, с. 211–215. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2018-18-2-211-215>
- [4] Сайфуллин Р.С., Фомина Р.Е., Мингазова Г.Г. и др. Влияние наночастиц диоксида алюминия на коррозионную стойкость никелевых покрытий. *Вестник Казанского технологического университета*, 2010, № 11, с. 358–362.
- [5] Irshad M.A., Nawaz R., Rehman M.Z., et al. Synthesis, characterization and advanced sustainable applications of titanium dioxide nanoparticles. A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2021, vol. 212, art. 111978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111978>
- [6] Crane J.K. Metal nanoparticles in infection and immunity. *Immunol Invest.*, 2020, vol. 49, no. 7, pp. 794–807. DOI: <https://doi.org/10.1080/08820139.2020.1776724>
- [7] Hosseini-Ardali S., Fattahi M., Kazemeini M., et al. Preparation, physicochemical and kinetic investigations of V₂O₅/SiO₂ catalyst for the sulfuric acid production. *Int. J. Eng.*, 2016, vol. 29, no. 11, pp. 1478–1488.
- [8] 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>
- [9] Alrammouz R., Lazerges M., Pironon J., et al. V₂O₅ gas sensors. *Sens. Actuator A: Phys.*, 2021, vol. 332-2, art. 113179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113179>
- [10] Schimmoeller B., Schulz H., Pratsinis S.E., et al. Ceramic foams directly-coated with flame-made V₂O₅/TiO₂ for synthesis of phthalic anhydride. *NSTI-Nanotech*, 2007, vol. 4, pp. 222–225.

- [11] Farzaneh F. Synthesis and characterization of V_2O_5/SiO_2 nanoparticles as efficient catalyst for aromatization 1,4-dihydropyridines. *Journal of Sciences*, 2012, vol. 23, no. 4, pp. 313–318.
- [12] 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, no. 9, pp. 5360–5368. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie102110r>
- [13] 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: Environ.*, 2002, vol. 39, no. 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)
- [14] Martín-Martín J.A., Gallastegi-Villa M., González-Marcos M.P., et al. Bimodal effect of water on V_2O_5/TiO_2 catalysts with different vanadium species in the simultaneous NO reduction and 1,2-dichlorobenzene oxidation. *Chem. Eng. J.*, 2021, vol. 417, art. 129013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129013>
- [15] Петров М.М., Пичугов Р.Д., Локтионов П.А. и др. Ячейка для тестирования мембранно-электродного блока ванадиевой проточной редокс-батареи. *Доклады Академии Наук. Химия, науки о материалах*, 2020, т. 491, № 1, с. 39–44. DOI: <http://doi.org/10.31857/S2686953520020077>
- [16] 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>
- [17] 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. *ChemistrySelect*, 2021, vol. 46, iss. 6, pp. 13342–13349. DOI: <https://doi.org/10.1002/slct.202103996>
- [18] 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>
- [19] 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. 4, no. 7, pp. 1255–1261. DOI: <https://doi.org/10.1021/cm202901z>
- [20] 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>
- [21] Thamer A.A., Juzsakova T., Rasheed R.T., et al. V_2O_5 nanoparticles for dyes removal from water. *Chem. J. Mold.*, 2021, vol. 16, iss. 2, pp. 102–111. DOI: <http://doi.org/10.19261/cjm.2021.911>
- [22] Peng G., Tai M.H., Sun D.D. Hierarchical TiO_2/V_2O_5 multifunctional membrane for water purification. *Chem. Plus. Chem.*, 2013, vol. 78, iss. 12, pp. 1475–1482. DOI: <http://doi.org/10.1002/cplu.201300264>
- [23] Брауэр Г., ред. Руководство по неорганическому синтезу. Т. 5. М., Мир, 1985.

- [24] Vernardou D. State-of-the-art of chemically grown vanadium pentoxide nanostructures with enhanced electrochemical properties. *Adv. Mater. Lett.*, 2013, vol. 4, iss. 11, pp. 798–810. DOI: <https://dx.doi.org/10.5185/amlett.2013.5485>
- [25] Гетманцев С.В., Нечаев И.А., Гандурина Л.В. Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. М., АСВ, 2008.
- [26] Bogoslovskii S.Y., Kuznetsov N.N., Boldyrev V.S. Parameter optimization of electrolytic process of obtaining sodium hypochlorite for disinfection of water. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 918, no. 1, art. 0120228. DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/918/1/012028>
- [27] Аверина Ю.М., Калякина Г.Е., Меньшиков В.В. и др. Проектирование процессов нейтрализации хромо- и цианосодержащих сточных вод на примере гальванического производства. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 3 (84), с. 70–80. DOI: <http://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-3-70-80>
- [28] Богомоллов Б.Б., Болдырев В.С., Зубарев А.М. и др. Интеллектуальный логико-информационный алгоритм выбора энергоресурсоэффективной химической технологии. *Теоретические основы химической технологии*, 2019, т. 53, № 5, с. 483–492. DOI: <http://doi.org/10.1134/S0040357119050026>
- [29] Болдырев В.С., Аверина Ю.М., Меньшиков В.В. и др. Технологически-организационный инжиниринг окрасочных производств. *Теоретические основы химической технологии*, 2020, т. 54, № 3, с. 299–303. DOI: <https://doi.org/10.31857/S004035712003001X>
- [30] Болдырев В.С., Кузнецов С.В., Меньшиков В.В. Инновационное развитие малотоннажных научно-производственных предприятий лакокрасочной отрасли. М., Пэйнт-Медиа, 2021.
- [31] Kuzin E., Kruchinina N., Averina Yu., et al. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes*, 2022, vol. 10, no. 3, art. 440. DOI: <http://doi.org/10.3390/pr10030440>

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, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий отделом «Инжиниринг 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); студент магистратуры факультета цифровых технологий и химического инжиниринга РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9); 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 процесса синтеза и свойств наночастиц пентаоксида ванадия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 2 (107), с. 126–139.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-2-126-139>

STUDY OF THE SYNTHESIS PROCESS AND PROPERTIES OF THE VANADIUM PENTOXIDE NANOPARTICLES

O.V. Yarovaia¹

iarovaia.o.v@muctr.ru

Yu.M. Averina¹

averinajm@mail.ru

R.Kh. Magzhanov²

ruh7899@gmail.com

B.A. Karetkin¹

karetkin.b.a@muctr.ru

V.I. Panfilov¹

panfilov.v.i@muctr.ru

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

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

The paper presents results of studying the possibility of synthesizing aqueous dispersions of the vanadium (V) oxide nanoparticles that retain aggregative stability for a long period. The experiments performed resulted in obtaining tubular nanoparticles of the vanadium pentoxide (V₂O₅) 50 μm long and 5–10 nm

Keywords

Synthesis, vanadium pentoxide, tubular nanoparticles, aqueous dispersions, aggregative stability

in diameter. Wall thickness of the obtained tubes was 1.1 nm. It was experimentally established that type of the acid used was not affecting the resulting nanoparticles size, but was significantly effecting the shelf life. To increase the nanoparticles optimal shelf life, it is proposed to use the hydrochloric acid solutions as the peptizing agent. This method made it possible not only to increase the system stability, but also to raise the nanoparticles concentration up to 1 % of the mass. In the framework of experiments on studying the obtained particles surface characteristics, it was found that nanoparticles in the range of pH = 3.0–4.2 were negatively charged, and aggregation stability was mainly determined by the electrostatic factor. The proposed chemical technology could be used in industrial production of the vanadium pentoxide nanoparticles in various industries

Received 22.06.2022

Accepted 23.08.2022

© Author(s), 2023

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

REFERENCES

- [1] Medhi R., Marquez M.D., Lee T.R. Visible-light-active doped metal oxide nanoparticles: review of their synthesis, properties, and applications. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2020, vol. 3, no. 7, pp. 6156–6185. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnm.0c01035>
- [2] Vorobyeva S.A., Rzheusskiy S.E. Nanoprticles of metals and their inorganic compounds obtained through interphase and redox-transmetalation interaction: application in medicine and pharmacology. *Vestnik RGMU [Bulletin of RSNU]*, 2018, no. 6, pp. 111–115 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24075/brsmu.2018.076>
- [3] Tuchina E.S., Gvozdev G.A., Kosobudskiy I.D. The study of antibacterial properties of coatings based on metal (Ag, Zn) nanoparticles in silicon dioxide matrix. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Khimiya. Biologiya. Ekologiya [Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology]*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 211–215 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2018-18-2-211-215>
- [4] Sayfullin R.S., Fomina R.E., Mingazova G.G., et al. Effect of aluminium dioxide nanoparticles on the corrosion resistance of nickel coatings. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2010, no. 11, pp. 358–362 (in Russ.).
- [5] Irshad M.A., Nawaz R., Rehman M.Z., et al. Synthesis, characterization and advanced sustainable applications of titanium dioxide nanoparticles. A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2021, vol. 212, art. 111978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111978>
- [6] Crane J.K. Metal nanoparticles in infection and immunity. *Immunol Invest.*, 2020, vol. 49, no. 7, pp. 794–807. DOI: <https://doi.org/10.1080/08820139.2020.1776724>

- [7] Hosseini-Ardali S., Fattahi M., Kazemeini M., et al. Preparation, physiochemical and kinetic investigations of V_2O_5/SiO_2 catalyst for the sulfuric acid production. *Int. J. Eng.*, 2016, vol. 29, no. 11, pp. 1478–1488.
- [8] Vo P.N.X., Le-Phuc N., Tran T.V., et al. Oxidative regeneration study of spent V_2O_5 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>
- [9] Alrammouz R., Lazerges M., Pironon J., et al. V_2O_5 gas sensors. *Sens. Actuator A: Phys.*, 2021, vol. 332-2, art. 113179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113179>
- [10] 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. *NSTI-Nanotech*, 2007, vol. 4, pp. 222–225.
- [11] Farzaneh F. Synthesis and characterization of V_2O_5/SiO_2 nanoparticles as efficient catalyst for aromatization 1,4-dihydropyridines. *Journal of Sciences*, 2012, vol. 23, no. 4, pp. 313–318.
- [12] 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, no. 9, pp. 5360–5368. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie102110r>
- [13] 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: Environ.*, 2002, vol. 39, no. 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)
- [14] Martín-Martín J.A., Gallastegi-Villa M., González-Marcos M.P., et al. Bimodal effect of water on V_2O_5/TiO_2 catalysts with different vanadium species in the simultaneous NO reduction and 1,2-dichlorobenzene oxidation. *Chem. Eng. J.*, 2021, vol. 417, art. 129013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129013>
- [15] 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>
- [16] 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>
- [17] 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. *ChemistrySelect*, 2021, vol. 46, iss. 6, pp. 13342–13349. DOI: <https://doi.org/10.1002/slct.202103996>
- [18] 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>
- [19] 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. 4, no. 7, pp. 1255–1261. DOI: <https://doi.org/10.1021/cm202901z>

- [20] 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>
- [21] Thamer A.A., Juzsakova T., Rasheed R.T., et al. V_2O_5 nanoparticles for dyes removal from water. *Chem. J. Mold.*, 2021, vol. 16, iss. 2, pp. 102–111.
DOI: <http://doi.org/10.19261/cjm.2021.911>
- [22] Peng G., Tai M.H., Sun D.D. Hierarchical TiO_2/V_2O_5 multifunctional membrane for water purification. *Chem. Plus. Chem.*, 2013, vol. 78, iss. 12, pp. 1475–1482.
DOI: <http://doi.org/10.1002/cplu.201300264>
- [23] Brauer G., ed. *Handbuch der Präparativen Anorganischen Chemie*. Vol. 5. Stuttgart, F. Enke, 1981.
- [24] Vernardou D. State-of-the-art of chemically grown vanadium pentoxide nanostructures with enhanced electrochemical properties. *Adv. Mater. Lett.*, 2013, vol. 4, iss. 11, pp. 798–810. DOI: <https://dx.doi.org/10.5185/amlett.2013.5485>
- [25] Getmantsev S.V., Nechaev I.A., Gandurina L.V. *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod koagulyantami i flokulyantami* [Industrial wastewater treatment with coagulants and flocculants]. Moscow, ASV Publ., 2008.
- [26] Bogoslovskii S.Y., Kuznetsov N.N., Boldyrev V.S. Parameter optimization of electrolytic process of obtaining sodium hypochlorite for disinfection of water. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 918, no. 1, art. 0120228.
DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/918/1/012028>
- [27] Averina Yu.M., Kalyakina G.E., Menshikov V.V., et al. Neutralisation process design for electroplating industry wastewater containing chromium and cyanides. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 3 (84), pp. 70–80 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-3-70-80>
- [28] Bogomolov B.B., Boldyrev V.S., Zubarev A.M., et al. Intelligent logical information algorithm for choosing energy- and resource-efficient chemical technologies. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2019, vol. 53, no. 5, pp. 709–718.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579519050270>
- [29] Boldyrev V.S., Averina Yu.M., Menshikov V.V., et al. Technological and organizational engineering of paint processing. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2020, vol. 54, no. 3, pp. 420–424. DOI: <https://doi.org/10.1134/S004057952003001X>
- [30] Boldyrev V.S., Kuznetsov S.V., Menshikov V.V. *Innovatsionnoe razvitie malotonnazhnykh nauchno-proizvodstvennykh predpriyatii lakokrasochnoy otrasli* [Innovative development of small-tonnage scientific and production enterprises of paint and coating industry]. Moscow, Peynt-Media Publ., 2021.
- [31] Kuzin E., Kruchinina N., Averina Yu., et al. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes*, 2022, vol. 10, no. 3, art. 440. DOI: <http://doi.org/10.3390/pr10030440>

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

Magzhanov R.Kh. — Lecturer, 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 (Miuskaya 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.), 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); Master Student, Faculty of Digital Technology and Chemical Engineering, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation); Director's Adviser, Research Institute, NPO "Lakokraspokrytie" (Khudozhestvennyy proezd 2e, Khotkovo, Moscow Region, 141370 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Yarovaya O.V., Averina Yu.M., Magzhanov R.Kh., et al. Study of the synthesis process and properties of the vanadium pentoxide nanoparticles. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 2 (107), pp. 126–139 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-2-126-139>