

ВАНАДИЙ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ЭТОГО ЭЛЕМЕНТА-МЕТАЛЛА**В. Айгужин**

bushpulbek@gmail.com

SPIN-код: 9598-0085

А.Д. Вандюков

vandyuel00@gmail.com

SPIN-код: 5337-5464

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Выполнен обзор наиболее быстро развивающихся и Ванадий, ванадиевые редокс-перспективных отраслей, где могут применяться батареи, фармакология, диабет, ванадий и его соединения. Собранный информация реакторостроение, тройные сплавы, энергетика, космос подобрана таким образом, чтобы быть максимально доступной для понимания и усвоения широкому кругу читателей. Целью работы является сбор актуальных сведений о применении ванадия в современном мире для того, чтобы вызвать интерес у читателей к данной теме, а также, возможно, сподвигнуть нескольких из них к исследовательской деятельности. Данный обзор будет полезен как для людей, чьи исследования непосредственно связаны с ванадием, так и для тех, кто желает расширить свой кругозор. Результаты обзора позволяют оценить перспективность применения ванадия и его соединений в наше время, а также узнать о последних новостях и разработках, непосредственно связанных с металлом.

Ключевые слова

Поступила в редакцию 21.09.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Ванадий V — химический элемент с порядковым номером 23 Периодической системы элементов Д.И. Менделеева; открыт в 1801 г. и повторно в 1831 г.; назван в честь древнескандинавской богини красоты Vanadis из-за красивого цвета своих солей; располагается в V группе (побочной) четвертого периода; представляет собой блестящий серебристый металл светло-серого цвета, похожий по внешнему виду на сталь; в чистом виде мягкий; устойчив к коррозии благодаря наличию на поверхности защитной оксидной пленки; обладает низким значением сечения захвата тепловых нейтронов (5,06 барн).

В свободном виде в природе ванадий не встречается, относится к сильно рассеянным элементам, сопутствует железу, поэтому основным источником ванадия являются железные руды, содержащие его как примесь. Применяется в основном как легирующий компонент конструкционных сталей и сплавов (включая сверхпроводящие). Авиация, космическая техника, морское судостроение — главные области применения этих материалов.

Другими очень перспективными областями применения ванадия в самом ближайшем будущем могут стать фармакология, реакторостроение, аэро-

космическая промышленность и исследование космоса, энергетика. Об этом свидетельствует все возрастающий интерес ученых к исследованиям и разработке новых технологий, связанных с этим металлом и его соединениями (рис. 1).

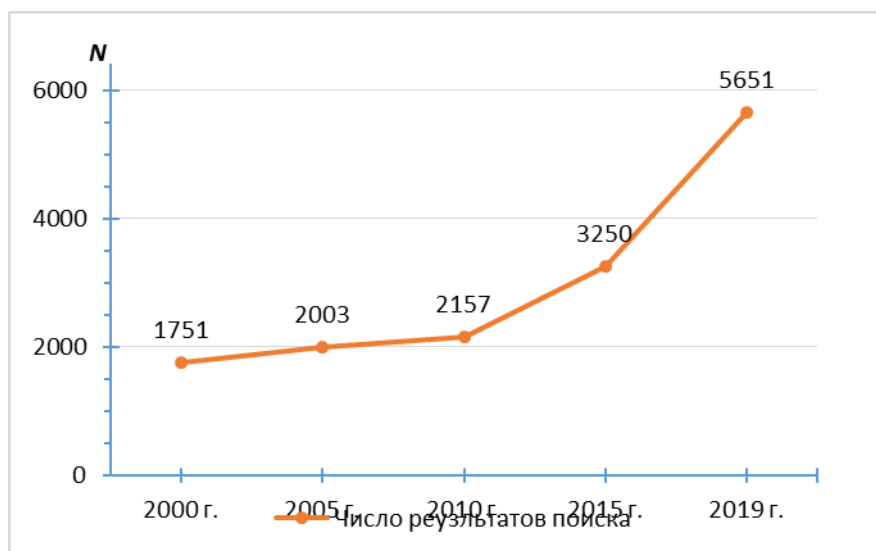


Рис. 1. Изменение числа N издаваемых в год материалов, содержащих слово “Vanadium” в базе данных Scopus, за 20 лет

Фармакология. Экспериментальные исследования показали, что ванадий и его соединения действуют на иммунную систему, а также оказывают различные фармакологические эффекты: антидиабетический, антигиперлипидемический, противоопухолевый, кардиотропный и антигипертензивный и противопаразитарный [1]. В основе этих эффектов лежат взаимодействия ванадия с ферментными системами, которые участвуют в ионном транспорте, передаче гормональных сигналов, в механизмах проводимости и возбудимости в нервной системе. Суточная потребность в ванадии практически полностью покрывается содержанием в пище. Пищевые продукты с наибольшим его содержанием показаны на рис. 2.

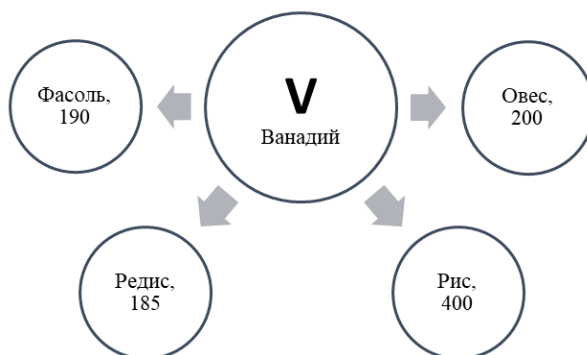


Рис. 2. Содержание ванадия в мкг на 100 г сырого продукта

В основном металл располагается в костной ткани, крови, в клетках тканей почек, сердца, селезенки, щитовидной железы, легких. Несмотря на наличие большого экспериментального материала о фармакологической активности ванадийсодержащих соединений, очень небольшое их число находится на стадии клинических испытаний. Самыми известными лекарственными препаратами, содержащими ванадий, в настоящее время являются сульфат ванадила и препараты, выпускаемые под торговыми наименованиями «Диабетекс Баланс», «Теравит Тоник», “Vanadyl Complex”.

Во всем мире соединения ванадия имеют потенциальную фармакологическую значимость для лечения диабета с условием, что его токсические побочные эффекты могут быть преодолены [2]. В последние годы усилия направлены на поиск и разработку комплексов ванадия, обладающих противоопухолевой активностью. Результаты доклинических и клинических испытаний дают понять, что ванадий может расцениваться как «уникальный многовалентный элемент с универсальным потенциалом к выявлению, предотвращению и лечению человеческого рака» [3].

Оказалось, что ванадий помогает обнаруживать рак на ранней стадии, а также подавляет рост и распространение существующих опухолей, не давая раковым клеткам делиться. Однако несмотря на превалирование положительных эффектов в случае с животными, говорить о 100%-ном положительном эффекте для людей еще рано: требуются дальнейшие исследования с другими менее токсичными органическими ванадийсодержащими лигандами.

Созданные в 2017 и 2018 гг. гетеролептические оксидованадиевые (IV) [4] и (V) [5] комплексы оказались эффективны в борьбе против человеческих паразитов, известных как трипаномы. Помимо этого первые комплексы имеют еще и антимагистатический эффект, поэтому могут расцениваться как перспективные в лечении раковых опухолей.

Доказано также действие соединений ванадия в клеточных линиях злокачественной меланомы [6]. Чтобы лучше охарактеризовать потенциал этого элемента в области онкологии ученые планируют рассмотреть механизмы его действия на молекулярном уровне.

Реакторостроение. На сегодняшний день в технике ванадий применяется в индивидуальном виде, в форме соединений, а также в составе различных сплавов. Так, из чистого ванадия изготавливают оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) и трубы. Хлорид ванадия VCl_3 используют при термохимическом разложении воды в атомно-водородной энергетике. Ванадиевые сплавы относятся к материалам с низкой активацией и поэтому являются перспективными для применения в ядерных и термоядерных реакторах. Это обусловлено одним характерным свойством, присущим ванадию, — низким сечением захвата быстрых нейтронов.

Наиболее изученными в настоящее время являются тройные сплавы: V–Cr–Ti. Их тестировали по 23 показателям в сравнении с традиционными коррозионно-стойкими реакторными сталями (ферритно-мартенситными и аустенитными).

ми) [7, 8]. Основными аргументами за применение ванадия и его сплавов в ядерной и термоядерной энергетике являются:

- хорошая прочность при высоких температурных нагрузках и более высокая жаропрочность по сравнению с нынешними реакторными сталями;
- способность выдерживать высокие тепловые нагрузки, высокая радиационная стойкость и быстрый спад наведенной активности;
- неплохие технологичность и ядерно-физические свойства, а также хорошая совместимость с жидкометаллическими теплоносителями.

После многих исследований материалом для повсеместного применения в рассматриваемой области стал сплав V–4Cr–4Ti [9]; в настоящее время технология его изготовления стандартизирована. Доказана его низкая активация и хорошая коррозионная стойкость по отношению к жидкому литию [10]. Несмотря на то что этот сплав по большинству показателей превосходит коррозионно-стойкие аустенитные и ферритно-мартенситные стали, у него имеется ряд недостатков, главным из которых является ограниченная верхняя рабочая температура (ниже 973 К). Считается, что этот недостаток обусловлен тепловой ползучестью и охрупчиванием ванадия гелием [9].

Известно, что старение сплавов приводит либо к выделению из них некоторых компонентов, либо к растворению примесей. И то, и другое сопровождается образованием осадков и служит отрицательным явлением. Однако в случае со сплавом V–4Cr–4Ti наличие осадков, наоборот, усиливает его, увеличивая прочность, ограничивает скорость роста дислокационных петель и облегчает увеличение радиационной стойкости [11]. В последние годы предпринимаются различные усилия для улучшения качеств этого и других сплавов с целью повышения их высокотемпературной прочности и сопротивления ползучести, низкотемпературной пластичности после облучения и коррозионной стойкости.

Космос. Использование ванадия в аэрокосмической промышленности, возможно, в скором времени существенно расширится. Об этом свидетельствует тот факт, что в последние годы огромный интерес вызывают термохромные материалы на основе VO₂. Они могут быть использованы для термоконтроля интеллектуальных космических аппаратов, примером которых служит так называемое пассивное интеллектуальное устройство радиационного контроля (*orig.* — Passive smart radiative thermal control device). Применение последнего способствует уменьшению массы и объема аппаратов и, таким образом, снижению стоимости космических полетов. Тем не менее у индивидуального VO₂ температура фазового перехода полупроводник — металл составляет 67 °С [12], что ограничивает его применение в оптоэлектронных устройствах как наземного, так и космического назначения, которые обычно эксплуатируются при температурах от -30 до 50 °С. Самая низкая температура перехода легированного VO₂, достигнутая к настоящему времени, составляет 0 °С [13]. В 2019 г. индийскими учеными в качестве альтернативы на подложках из сплава Al6061 (он же АД33 по ГОСТ 4784-97) были получены золь-гель-пленки из легированного VO [14]. Эти пленки демонстрировали обратимые и повторяемые переходы при темпе-

ратуре около $-23,3$ °С, что делает возможное их применение в PSRD для терморегулирования на спутниках более уместным по сравнению с термохромными VO_2 -материалами.

Помимо непосредственного применения в аэрокосмической промышленности ванадий может быть хорошим помощником и в изучении космоса, в целом. Так, результаты стабильных изотопных исследований лунных базальтов [15] свидетельствуют не только об изотопном родстве Луны и Земли, но и о степени неоднородности лунной мантии, о происхождении подмножеств лунных образцов и характере процессов дифференцировки Луны; было выяснено, что нет никаких доказательств различий между первичными V-изотопными составами Земли, Луны, хондритов и Марса; однако оказалось, что лунные базальты в основном изотопно легче наземных и демонстрируют высокую степень изменчивости; предполагается, что Fe является основным целевым элементом, важным для космогенных изотопных эффектов ванадия, а главной причиной изотопной изменчивости стали космогенные эффекты. Эти эффекты в изотопных отношениях ванадия проявляются сильнее, чем в изотопах Cr и Ti, поэтому изотопы ванадия потенциально могут быть полезнее для записи истории воздействия на внеземные материалы.

Поиск внеземной цивилизации всегда был чрезвычайно важным и интригующим для человека. И тут на помощь может прийти ванадий. Применение одного из методов [16] позволяет получить сведения о содержании ванадия в сырой нефти, асфальте и черном сланце, образованных из признанных биологических источников. Новые методы, позволяющие отличить биологическую химию от небιологических химических структур, похожих на микрофоссилии (микроскопические ископаемые остатки микроорганизмов), имеют первостепенное значение в поиске доказательств ранней жизни на Земле. Это также важно и для поиска существования жизни, например, на Марсе посредством анализа образца на месте или миссий по их возврату и последующего анализа на Земле. Для доказательства ученые проверили акритархов — земных органических микрофоссилий, которые могут быть схожи с марсианскими следами жизни, — на наличие ванадия и получили положительный результат.

Энергетика. В 1987 г. Марией Скайлас-Казакос, инженером-химиком из Австралии была изобретена ванадиевая редокс-батарея (ВРБ) (рис. 3), которая известна еще и как ванадиевая проточная батарея [17]. В основе ее функционирования лежит способность ванадия сохраняться в растворе в четырех разных степенях окисления (V^{5+} , V^{4+} , V^{3+} , V^{2+}). В качестве электролита используется либо раствор серной кислоты, либо чистая вода. Во время зарядки внешнее напряжение заставляет ионы ванадия терять электроны на положительно заряженной части. Последние перетекают по внешней цепи в отрицательно заряженную часть, где накапливаются и хранятся. Во время функционирования ВРБ хранящиеся электроны высвобождаются, перемещаясь по внешней цепи обратно на положительную часть.

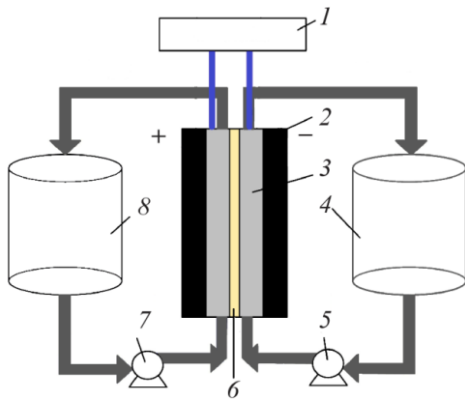


Рис. 3. Схематическое представление ВРБ:

1 — источник питания; 2 — установка;
3 — электрод; 4, 8 — резервуары
с отрицательно и положительно
заряженными электролитами
соответственно; 5, 7 — насосы;
6 — мембрана

Одной из ключевых частей этой батареи является мембрана, которая не дает положительно и отрицательно заряженным жидкостям-электролитам смешиваться. При этом она позволяет беспрепятственно переходить электронам из одной части в другую.

Ванадиевая редокс-батарея имеет следующие главные достоинства:

- высокий КПД зарядки/разрядки, составляющий 75...80 %, и недостижимая для других батарей энергоемкость, что делает их отличными емкостями для хранения энергии, получаемой от возобновляемых источников: солнечные батареи, ветрогенераторы и др.;

- способность без последствий переносить длительные периоды в разряженном состоянии, отсутствие ущерба в случае смешения электролитов, безопасность и невоспламеняемость (когда электролит — вода);

- быстрый отклик на изменение нагрузки (менее половины миллисекунды при 100%-ном ее изменении) и высокая перегрузочная способность (до 400 % длительностью выше 10 с).

Несмотря на все перечисленные достоинства ванадиевая проточная батарея имеет два существенных недостатка, не позволяющих использовать ее повсеместно:

- высокая цена (314...690 долл. США за мегаватт в час у ВРБ против 267...561 долл. США у традиционной ионно-литиевой батареи);

- малый уровень удельной энергии: 20...35 (Вт·ч)/кг у ВРБ против 30...40 (Вт·ч)/кг у свинцово-кислотной и 80...200 (Вт·ч)/кг у ионно-литиевой батареи.

Основные потери производительности связаны с деградацией системы батареи, которая вызвана разложением электролита, мембраны, электрода и bipolarной пластины из-за перекрестного перехода, различных побочных реакций и других причин [18].

В настоящее время проводятся многочисленные исследования с целью избавления от указанных недостатков и улучшения уже существующих характеристик ВРБ. Большая часть этих исследований направлена на разработку новых видов мембран, например, полимерных электролитных мембран (*orig.* — Polymer electrolyte membranes) на основе оксида графена [19]. Энергетические устройства с мембранами указанного типа демонстрируют хорошую производительность в лабораторном масштабе.

Другая достаточно дорогая и важная часть ВРБ — электролит. Одной из современных проблем, связанных с ним, является так называемый электролитный дисбаланс. Последний заключается в изменении активных частиц в электролите из-за перекрестного загрязнения и побочных реакций. Проблема электролитного дисбаланса решается его регенерацией различными методами [20]. Для достижения эффективной работы сконструирована специальная система управления электролитом.

Увеличение плотности мощности и продление срока службы цикла эффективно снижают капитальные затраты на ВРБ и, таким образом, имеют решающее значение для обеспечения ее широкого применения для крупномасштабного накопления энергии. В июле 2019 г. ученые из Китая сосредоточили свои силы именно на этом аспекте. Они проанализировали источники потерь напряжения и адаптации конструкции батареи с целью минимизировать омическое сопротивление, максимизировать транспорт электролитов и увеличить площадь поверхности и активность электродов; были подробно обсуждены стратегии повышения производительности и методы оценки производительности батареи. Как результат, характеристики, о которых сообщается в работе [21], соответствуют наилучшим характеристикам заряда-разряда, самой высокой плотности мощности и самому длительному сроку службы для проточных аккумуляторов.

В настоящее время ВРБ используются на фабриках гигантского масштаба, где требуется хранение больших объемов энергии; где батареи должны храниться долгое время с минимальным обслуживанием и состоянием готовности; где батареи должны начинать день пустыми и заряжаться в зависимости от загрузки и других условий, при этом не выходя из строя долгое время; где требуется источник бесперебойного питания; где присутствуют сильные скачки энергии и поэтому требуется оптимизирование и уравнивание объема производства и КПД за счет смещения времени отклика. ВРБ очень неприхотливы: так, по словам исполнительного директора компании по производству ВРБ “CellCube Energy Storage Systems” Штефана Шаусса (Stefan Schauss), данные батареи работают и в Сибири при температуре $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$, и в Абу-Даби при температуре $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, и на островах Северного моря, где каждый день подвергаются воздействию солей [22].

О важности и перспективности применения ванадия в энергетической промышленности свидетельствует и существование некоммерческой международной членской организации “Vanitec”, цель которой заключается в содействии использованию ванадийсодержащих материалов. В ее состав входят все крупнейшие мировые производители ванадия. У данной организации имеется отдельный комитет, специализирующийся на наблюдении за развитием событий на рынке энергетической промышленности для ванадия, — The Energy Storage Committee of “Vanitec” (ESC). В его состав входят производители, химические переработчики, исследователи и компании, занимающиеся производством аккумуляторов.

Заключение. Согласно приведенным данным можно утверждать, что ванадий имеет хорошую перспективу развития в медицине как один из компонентов

в составе антидиабетических препаратов, а также в лечении и предупреждении раковых заболеваний; на сегодняшний день применение металла в составе конструкционных материалов, предназначенных для ядерных и термоядерных реакторов, также является достаточно многообещающим; в космическом секторе ванадий хотя только начинает наращивать свой потенциал, в частности, в аэрокосмической промышленности, тем не менее уже смог привнести весомый вклад в исследование космических тел; применение ванадия в аккумуляторах с каждым днем приобретает все более массовый характер и является самой перспективной областью развития этого металла.

Литература

- [1] Воробьева Н.М., Федорова Е.В., Баранова Н.И. Ванадий: биологическая роль, токсикология и фармакологическое применение. *Биосфера*, 2013, т. 5, № 1, с. 77–96.
- [2] Pessoa J.C., Etcheverry S., Gambino D. Vanadium compounds in medicine. *Coord. Chem. Rev.*, 2015, vol. 301-302, pp. 24–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2014.12.002>
- [3] Bishayee A., Waghray A., Patel M.A., et al. Vanadium in the detection, prevention and treatment of cancer: the in vivo evidence. *Cancer Lett.*, 2010, vol. 294, no. 1, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2010.01.030>
- [4] Scalese G., Mosquillo M.F., Rostán S., et al. Heteroleptic oxidovanadium (IV) complexes of 2-hydroxynaphthylaldimine and polypyridyl ligands against *Trypanosoma cruzi* and prostate cancer cells. *J. Inorg. Biochem.*, 2017, vol. 175, pp. 154–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2017.07.014>
- [5] Scalese G., Machado I., Fontana C., et al. New heteroleptic oxidovanadium(V) complexes: synthesis, characterization and biological evaluation as potential agents against *Trypanosoma cruzi*. *J. Biol. Inorg. Chem.*, 2018, vol. 23, no. 8, pp. 1265–1281. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00775-018-1613-1>
- [6] Rozzo C., Sanna D., Garribba E., et al. Antitumoral effect of vanadium compounds in malignant melanoma cell lines. *J. Inorg. Biochem.*, 2017, vol. 174, pp. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2017.05.010>
- [7] Никулин С.А., Вотинов С.Н., Рожнов А.Б. Ванадиевые сплавы для ядерной энергетики. М., МИСиС, 2014.
- [8] Калинин Б.А., Стальцов М.С., Тищенко А.Г. и др. Сплавы ванадия на пороге широкого применения в энергетике. *Цветные металлы*, 2016, № 11(887), с. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.08>
- [9] Muroga T., Chen J.M., Chernov V.M., et al. Present status of vanadium alloys for fusion applications. *J. Nucl. Mater.*, 2014, vol. 455, no. 1-3, pp. 263–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.06.025>
- [10] Sakai K., Satou M., Fujiwara M., et al. Mechanical properties and microstructures of high-chromium V-Cr-Ti type alloys. *J. Nucl. Mater.*, 2004, vol. 329-333, part A, pp. 457–461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.04.089>
- [11] Jiang S.-N., Xu L.-Q., Wan F.-R. Effect of precipitates on high-temperature strength and irradiation behavior of vanadium-based alloys. *J. Iron Steel Res. Int.*, 2018, vol. 25, no. 12, pp. 1270–1277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-018-0167-3>
- [12] Шадрин Е.Б., Ильинский А.В. О природе фазового перехода металл-полупроводник в диоксиде ванадия. *Физика твердого тела*, 2000, т. 42, № 6, с. 1092–1099.

- [13] Burkhardt W., Christmann T., Franke S., et al. Tungsten and fluorine co-doping of VO₂ films. *Thin Solid Films*, 2002, vol. 402, no. 1-2, pp. 226–231. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01603-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01603-0)
- [14] Mukherjee D., Dey A., Mukhopadhyay A.K. Vanadium oxide thin films on quartz and Al6061 with reduced phase transition temperature and low solar absorptance for advanced thermal control application in space. *Ceram. Int.*, 2019, vol. 45, no. 18, part B, pp. 25097–25107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.168>
- [15] Hopkins S.S., Prytulak J., Barling J., et al. The vanadium isotopic composition of lunar basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2019, vol. 511, pp. 12–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.01.008>
- [16] Marshall C.P., Marshall A.O., Aitken J.B., et al. Imaging of vanadium in microfossils: a new potential biosignature. *Astrobiology*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 1069–1076. DOI: <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1709>
- [17] Rychcik M., Skyllas-Kazacos M. Characteristics of a new all-vanadium redox flow battery. *J. Power Sources*, 1988, vol. 22, no. 1, pp. 59–67. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(88\)80005-3](https://doi.org/10.1016/0378-7753(88)80005-3)
- [18] Yuan X.-Z., Song C., Platt A., et al. A review of all-vanadium redox flow battery durability: degradation mechanisms and mitigation strategies. *Int. J. Energy Res.*, 2019, vol. 43, no. 13, pp. 6599–6638. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4607>
- [19] Gahlot S., Kulshrestha V. Graphene based polymer electrolyte membranes for electrochemical energy applications. *Int. J. Hydrog. Energy.*, 2020, vol. 45, no. 34, pp. 17029–17056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.047>
- [20] Jirabovornwisut T., Arpornwichanop A. A review on the electrolyte imbalance in vanadium redox flow batteries. *Int. J. Hydrog. Energy.*, 2019, vol. 44, no. 45, pp. 24485–24509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.106>
- [21] Jiang H.R., Sun J., Wei L., et al. A high power density and long cycle life vanadium redox flow battery. *Energy Storage Mater.*, 2020, vol. 24, pp. 529–540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.07.005>
- [22] Is vanadium the energy storage solution of the future? — Part 3. *investingnews.com: веб-сайт*. URL: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/vanadium-investing/vanadium-energy-storage-solution-3/> (дата обращения: 20.12.2019).

Айгужин Валихан — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Вандюков Александр Дмитриевич — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Гуров Александр Алексеевич, кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Айгужин В., Вандюков А.Д. Ванадий: настоящее и будущее этого элемента-металла. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 09(51). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-09-645>

VANADIUM: THE PRESENT AND FUTURE OF THIS METAL ELEMENT

V. Ayguzhin

bushpulbek@gmail.com

SPIN-code: 9598-0085

A.D. Vandyukov

vandyuel00@gmail.com

SPIN-code: 5337-5464

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper reviews the most rapidly developing and promising industries where vanadium and its compounds can be used. The collected information is selected to be as accessible as possible for understanding and assimilation by a wide range of readers. The aim of the work is to collect relevant information about the use of vanadium in the modern world in order to arouse the interest of readers in this topic, and to encourage several of them to research activities. This review will be useful both for people whose research is directly related to vanadium and for those who wish to broaden their horizons. The results of the review allow us to assess the prospects of using vanadium and its compounds in our time, as well as learn about the latest news and developments directly related to the metal.

Keywords

Vanadium, vanadium redox batteries, pharmacology, diabetes, reactor building, ternary alloys, energy, space

Received 21.09.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Vorob'yeva N.M., Fedorova E.V., Baranova N.I. Vanadium: its biological role, toxicology, and pharmacological applications. *Biosfera*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 77–96 (in Russ.).
- [2] Pessoa J.C., Etcheverry S., Gambino D. Vanadium compounds in medicine. *Coord. Chem. Rev.*, 2015, vol. 301-302, pp. 24–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2014.12.002>
- [3] Bishayee A., Waghay A., Patel M.A., et al. Vanadium in the detection, prevention and treatment of cancer: the in vivo evidence. *Cancer Lett.*, 2010, vol. 294, no. 1, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2010.01.030>
- [4] Scalese G., Mosquillo M.F., Rostán S., et al. Heteroleptic oxidovanadium (IV) complexes of 2-hydroxynaphthylaldimine and polypyridyl ligands against *Trypanosoma cruzi* and prostate cancer cells. *J. Inorg. Biochem.*, 2017, vol. 175, pp. 154–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2017.07.014>
- [5] Scalese G., Machado I., Fontana C., et al. New heteroleptic oxidovanadium(V) complexes: synthesis, characterization and biological evaluation as potential agents against *Trypanosoma cruzi*. *J. Biol. Inorg. Chem.*, 2018, vol. 23, no. 8, pp. 1265–1281. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00775-018-1613-1>
- [6] Rozzo C., Sanna D., Garrriba E., et al. Antitumoral effect of vanadium compounds in malignant melanoma cell lines. *J. Inorg. Biochem.*, 2017, vol. 174, pp. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2017.05.010>

- [7] Nikulin S.A., Votinov S.N., Rozhnov A.B. Vanadievye splavy dlya yadernoy energetiki [Vanadium alloys for nuclear energetics]. Moscow, MISiS Publ., 2014 (in Russ.).
- [8] Kalin B.A., Stal'tsov M.S., Tishchenko A.G., et al. Vanadium alloys on the threshold of wide application in energetics. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 11(887), pp. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.08> (in Russ.).
- [9] Muroga T., Chen J.M., Chernov V.M., et al. Present status of vanadium alloys for fusion applications. *J. Nucl. Mater.*, 2014, vol. 455, no. 1-3, pp. 263–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.06.025>
- [10] Sakai K., Satou M., Fujiwara M., et al. Mechanical properties and microstructures of high-chromium V-Cr-Ti type alloys. *J. Nucl. Mater.*, 2004, vol. 329-333, part A, pp. 457–461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.04.089>
- [11] Jiang S.-N., Xu L.-Q., Wan F.-R. Effect of precipitates on high-temperature strength and irradiation behavior of vanadium-based alloys. *J. Iron Steel Res. Int.*, 2018, vol. 25, no. 12, pp. 1270–1277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-018-0167-3>
- [12] Shadrin E.B., Il'inskiy A.V. On nature of metal-semiconductor phase transition in vanadium dioxide. *Fizika tverdogo tela* [Semiconductors Physics of the Solid State], 2000, vol. 42, no. 6, pp. 1092–1099 (in Russ.).
- [13] Burkhardt W., Christmann T., Franke S., et al. Tungsten and fluorine co-doping of VO₂ films. *Thin Solid Films*, 2002, vol. 402, no. 1-2, pp. 226–231. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01603-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01603-0)
- [14] Mukherjee D., Dey A., Mukhopadhyay A.K. Vanadium oxide thin films on quartz and Al6061 with reduced phase transition temperature and low solar absorptance for advanced thermal control application in space. *Ceram. Int.*, 2019, vol. 45, no. 18, part B, pp. 25097–25107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.168>
- [15] Hopkins S.S., Prytulak J., Barling J., et al. The vanadium isotopic composition of lunar basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2019, vol. 511, pp. 12–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.01.008>
- [16] Marshall C.P., Marshall A.O., Aitken J.B., et al. Imaging of vanadium in microfossils: a new potential biosignature. *Astrobiology*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 1069–1076. DOI: <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1709>
- [17] Rychcik M., Skyllas-Kazacos M. Characteristics of a new all-vanadium redox flow battery. *J. Power Sources*, 1988, vol. 22, no. 1, pp. 59–67. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(88\)80005-3](https://doi.org/10.1016/0378-7753(88)80005-3)
- [18] Yuan X.-Z., Song C., Platt A., et al. A review of all-vanadium redox flow battery durability: degradation mechanisms and mitigation strategies. *Int. J. Energy Res.*, 2019, vol. 43, no. 13, pp. 6599–6638. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4607>
- [19] Gahlot S., Kulshrestha V. Graphene based polymer electrolyte membranes for electrochemical energy applications. *Int. J. Hydrog. Energy.*, 2020, vol. 45, no. 34, pp. 17029–17056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.047>
- [20] Jirabovornwisut T., Arpornwichanop A. A review on the electrolyte imbalance in vanadium redox flow batteries. *Int. J. Hydrog. Energy.*, 2019, vol. 44, no. 45, pp. 24485–24509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.106>
- [21] Jiang H.R., Sun J., Wei L., et al. A high power density and long cycle life vanadium redox flow battery. *Energy Storage Mater.*, 2020, vol. 24, pp. 529–540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.07.005>
- [22] Is vanadium the energy storage solution of the future? — Part 3. *investingnews.com: website*. URL: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/vanadium-investing/vanadium-energy-storage-solution-3/> (accessed: 20.12.2019).

V. Ayguzhin — Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

A.D. Vandyukov — Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Gurov A.A., Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Ayguzhin V., Vandyukov A.D. Vanadium: the present and future of this metal element. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 09(51). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-09-645.html> (in Russ.).