**УДК** 533.583.2 : 544.478.32
**DOI** dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-1-4-11

# Влияние концентрации гидрогеля пентаоксида ванадия, нанесенного на алюминий марки АСД-4, на его структурно-адсорбционные свойства

© 2021 г. **А.В. Рябина, В.Г. Шевченко**

Институт химии твердого тела (ИХТТ) УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*Статья поступила в редакцию 23.09.19 г., доработана 20.11.19 г., подписана в печать 25.11.19 г.*

**Аннотация:** Методом низкотемпературной адсорбции азота изучено влияние концентрации гидрогеля пентаоксида ванадия ($V_2O_5$) в концентрациях 5 и 10 %, нанесенного на алюминий марки АСД-4, на его структурно-адсорбционные свойства. В качестве адсорбата использован азот особой чистоты. Были измерены изотермы адсорбции и рассчитаны удельная поверхность и пористость порошков, приведены результаты исследования морфологии. Поскольку графики БЭТ линейны в диапазоне относительных давлений от 0,05 до 0,35 $P/P_0$, модель БЭТ хорошо применима для определения удельной площади поверхности образцов. Для образца АСД-4, по нашим расчетам, она составила 0,65 м$^2$/г, для состава АСД-4 + 5 % $V_2O_5$ – 6 м$^2$/г, для АСД-4 + 10 % $V_2O_5$ – 16 м$^2$/г. То есть нанесение гидрогеля увеличивает удельную поверхность исходного АСД-4 более чем в десятки раз. Гранулометрический анализ показал, что после нанесения гидрогеля оба образца имеют достаточно узкое распределение частиц по размерам, что говорит о монодисперсности систем. Для АСД-4 средний размер частиц составил ~5÷7 мкм, для образца АСД-4 + 5 % $V_2O_5$ – около 9 мкм, для АСД-4 + 10 % $V_2O_5$ – 11 мкм. Установлено что благодаря слоистой структуре нанесенного ксерогеля в модифицированном образце появились мезопоры, радиус которых составил 35–40 Å. Показано, что наибольшей адсорбционной активностью обладает образец АСД-4 + 10 % $V_2O_5$.

*Ключевые слова:* адсорбция, пористость, пентаоксид ванадия, ксерогель, мезопоры.

**Рябина А.В.** – канд. хим. наук, науч. сотр. лаборатории физикохимии дисперсных систем Института химии твердого тела (ИХТТ) УрО РАН (620990, г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 91). E-mail: anna-ryabina@yandex.ru.

**Шевченко В.Г.** – докт. хим. наук, гл. науч. сотр., зав. лабораторией физикохимии дисперсных систем ИХТТ УрО РАН. E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru.

**Для цитирования:** *Рябина А.В., Шевченко В.Г.* Влияние концентрации гидрогеля пентаоксида ванадия, нанесенного на алюминий марки АСД-4, на его структурно-адсорбционные свойства. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. Т. 15. No. 1. С. 4–11. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-1-4-11.

# The effect of the concentration of vanadium pentoxide hydrogel applied on ASD-4 grade aluminum on its structural and adsorption properties

**A.V. Ryabina, V.G. Shevchenko**

Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSC UB RAS), Ekaterinburg, Russia

*Received 23.09.2019, revised 20.11.2019, accepted for publication 25.11.2019*

**Abstract:** The effect of the concentration of $V_2O_5$ vanadium pentoxide hydrogel applied in concentrations 5 and 10 % on ASD-4 grade aluminum, on its structural and adsorption properties was studied by the low-temperature nitrogen adsorption method. High-purity nitrogen was used as an adsorbate. Adsorption isotherms were measured with the specific surface area and porosity of powders calculated and results of morphology studies presented. Since BET diagrams are linear in the interval of relative pressures from 0.05 to 0.35 $P/P_0$, the BET model is well applicable for the calculation of the specific surface area of samples. According to our calculations, the specific surface area was 0.65 m$^2$/g for ASD-4 sample, 6 m$^2$/g for ASD-4 + 5 % $V_2O_5$ composition, and 16 m$^2$/g for ASD-4 + 10 % $V_2O_5$. Therefore, hydrogel application increases the specific surface area of initial ASD-4 tenfold and more. Grain size analysis showed that both samples have a rather narrow particle size distribution after hydrogel application, which indicates the monodispesity of the system. The average particle size was ~5÷7 μm for ASD-4, ~9 μm for

ASD-4 + 5 % $V_2O_5$, and ~11 μm for ASD-4 + 10 % $V_2O_5$. It was established that mesopores 35 to 40 Å in radius appeared in the modified sample due to the layered structure of xerogel applied. It was shown that the ASD-4 + 10 % $V_2O_5$ sample exhibits the greatest adsorption activity.

*Keywords:* adsorption, porosity, vanadium pentoxide, xerogel, mesopores.

**Ryabina A.V.** – Cand. Sci. (Chem.), research scientist of the Laboratory «Physical chemistry of disperse systems» of the Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSC UB RAS) (620990, Russia, Ekaterinburg, Pervomaiskaya str., 91). E-mail: anna-ryabina@yandex.ru.

**Shevchenko V.G.** – Dr. Sci. (Chem.), chief scientific officer, head of the Laboratory «Physical chemistry of disperse systems» of the ISSC UB RAS. E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru.

**For citation:** *Ryabina A.V., Shevchenko V.G.* The effect of the concentration of vanadium pentoxide hydrogel applied on ASD-4 grade aluminum on its structural and adsorption properties. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2021. Vol. 15. No. 1. P. 4–11 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-1-4-11.

## Введение

Электронное строение ванадия позволяет варьировать валентность от 2 до 5. Возможность широкого набора валентных состояний атомов обусловлена наличием в атомах переходных элементов незавершенных *d*-электронных оболочек, благодаря чему оксиды ванадия могут проявлять основной характер (VO и $V_2O_3$), амфотерный ($VO_2$) и кислотный ($V_2O_5$) [1].

Благодаря своей высокой коррозионной стойкости в агрессивных химических средах ванадий является перспективным материалом для химического машиностроения. При окислении сернистого газа $SO_2$ в серный газ $SO_3$ при производстве серной кислоты в качестве катализатора используют оксид ванадия $V_2O_5$.

Как химический источник тока пентаоксид ванадия применяется в качестве положительного электрода (анода) в мощных литиевых батареях и аккумуляторах, ванадат серебра — в резервных батареях в качестве катода [2—5].

Алюмованадиевые системы относятся к наиболее широко распространенным представителям нанесенных оксидно-ванадиевых катализаторов, использующихся в процессах парциального окисления и дегидрирования углеводородов. Ксерогели оксида ванадия (V) обладают смешанной ионно-электронной проводимостью, благодаря чему могут применяться в качестве электрохромных материалов и катодов низкотемпературных источников тока [6, 7].

Также известно использование оксида ванадия $V_2O_5$ для активации процесса энерговыделения при сгорании алюминиевых порошков в топливных смесях. В работе [8] предложен способ активации порошка типа АСД путем пропитки оксидного слоя на его поверхности гидрогелем $V_2O_5$ без заметного изменения содержания металлического (активного) алюминия.

Чтобы правильно подобрать и применять адсорбенты и катализаторы для определенных целей, регулировать их физико-химические свойства, необходимо знать такие их свойства, как удельная поверхность, пористость, структура пор, адсорбционная способность и др. [9].

Настоящая работа посвящена исследованию адсорбционных свойств порошка алюминия марки АСД-4 — исходного и модифицированного гидрогелем $V_2O_5$ в концентрациях 5 и 10 % $V_2O_5$.

## Экспериментальная часть

В экспериментах был использован порошок алюминия марки АСД-4, полученный методом распыления расплавленного металла азотом (содержание активного металла составило 98,7 ± 0,5 %), а также порошок АСД-4, пропитанный гидрогелем $V_2O_5$ (5 и 10 %). Синтез и методика нанесения активатора на поверхность частиц описаны в работах [8, 10].

Адсорбционные измерения проводили на адсорбционном анализаторе «TriStar 3000V6.03» (фирма «Micromeritics», США), принцип действия которого основан на адсорбции и десорбции газа на внешней и внутренней поверхностях (в порах) исследуемых образцов дисперсных и пористых веществ и материалов при температуре жидкого азота. Азот является наиболее широко распространенным газом, который применяют для определения площади поверхности, так как в этом случае константа *C* имеет промежуточные значе-

ния (50—250) для большинства твердых поверхностей, предотвращая как локальную адсорбцию, так и поведение газа как двумерного в области значений относительного давления $P/P_0 = 10^{-3} \div 0{,}999$. Диапазон измерения этим методом удельной поверхности составляет от 0,01 до 4000 м$^2$/г, погрешность измерения — не более 5 %. Всю серию измерений проводили в одной и той же измерительной бюретке. Расчет удельной поверхности подробно описан в работе [11]. До и после эксперимента все образцы взвешивали на электронных весах высокой точности марки «Shimadzu AUW 120D» (Shimadzu, Япония).

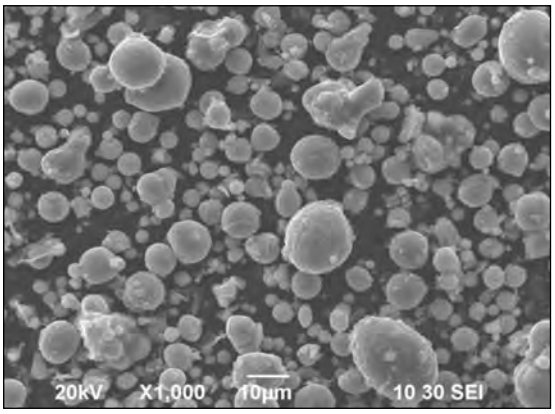


**Рис. 1.** Микрофотография порошка АСД-4
**Fig. 1.** ASD-4 powder micrograph

## Результаты и их обсуждение

Форма и размер частиц порошка являются важнейшими структурообразующими характеристиками. Знание распределения частиц по размерам важно для понимания физических и химических свойств материала. Размер частиц влияет на реакционную способность твердых тел, участвующих в химических реакциях, определяет величину удельной поверхности, а плотность их упаковки — объем и радиус пор. Морфологию частиц анализировали на растровом электронном микроскопе JSM-6390LA (JEOL, Япония) с энергодисперсионным рентгеновским анализатором (EDS), распределение частиц по размерам — на лазерном гранулометре «Horiba LA-950» (Horiba Jobin Yvon S.A.S., Франция). Электронно-микроскопическое исследование порошка показало, что образец АСД-4 состоит из сферических частиц практически правильной формы (рис. 1) со средним размером около 5—7 мкм.

Известно, что ксерогели $V_2O_5 \cdot nH_2O$, полученные дегидратацией соответствующих гелей, имеют квазидвумерную слоистую структуру, позволяющую интеркалировать в межслоевое пространство молекулы воды и различных органических соединений, катионы металлов [10, 12—15], а также эффективно пропитывать высокодисперсные материалы, в том числе металлы, и формировать на их поверхности устойчивые пленки.

Сравнительные калориметрические эксперименты по ступенчатой адсорбции паров воды, проведенные в работе [16] при исследовании $V_2O_5$, нанесенного на $Al_2O_3$, показали высокую гетерогенность поверхности алюмованадиевых катализаторов. Авторы [16] сделали вывод, что при содержании до 10 мас.% $V_2O_5$ в алюмованадиевых катализаторах происходит образование монослоя $V_2O_5$ на поверхности носителя, наблюдаются значительные изменения гидрофильных свойств оксида алюминия; при этом исчезают преимущественно самые гидрофильные участки поверхности носителя. Но при дальнейшем увеличении концентрации ванадия заполнение поверхности протекает менее равномерно, остается заметная доля $Al_2O_3$, не покрытого оксидом ванадия, и на поверхности $Al_2O_3$, наряду с дегидратированными оксидно-ванадиевыми структурами, наблюдаются также частицы кристаллического $V_2O_5$.

На дифрактограммах обоих образцов, полученных с помощью энергодисперсионного рентгеновского анализатора, присутствуют линии, принадлежащие металлическому алюминию, что согласуется с рентгеноаморфным состоянием ксерогеля, который образуется вследствие частичной дегидратации гидрогеля на стадии просушивания. Так, в работе [17] был подробно исследован синтез наноструктур $V_2O_5 \cdot nH_2O$, чьи морфология, кристаллическая структура и количество молекул воды между слоистыми структурами регулировались строгим контролем гидротермальной обработки. Авторы [17] отмечали на рентгенограммах свежеприготовленных образцов уширенные рефлексы рентгеновской дифракции. Эти дифракционные пики были индексированы как моноклинная фаза $V_2O_5 \cdot nH_2O$, рассчитанные по дифракционному пику межслоевые расстояния составили ~13 Å, что может быть приписано большему количеству молекул $H_2O$ в структуре.

Порошки АСД-4 + $V_2O_5$ состоят из сферических частиц практически правильной формы. Степень агломерирования порошков не слишком вы-

сока и определяется количеством мелкой фракции. На изображении частиц (рис. 2) видны «микровыступы» чешуйчатого типа (нанесенный ксерогель ванадия), что вызвано избытком геля при увеличении его содержания выше необходимого для образования монослоя.

Авторы работы [18] с помощью электронографических исследований установили, что структуру $V_2O_5$-геля можно представить в виде плоских лент длиной 1000 Å и шириной 100 Å. Гидрогель $V_2O_5$ имеют слоистую структуру и образован спутанными волокнами цепочек молекул $V_2O_5$, соединенными молекулами воды. Кристаллическая структура в плоскости ленты аналогична орторомбическим кристаллам $V_2O_5$. В работе [19] изучили структуры оксида ванадия (различного содержания), нанесенного на $Al_2O_3$, с помощью хроматографического метода прямоугольных импульсов в сочетании с различными физико-химическими исследованиями, включая РФА, ИК- , ЭПР- и УФ-спектроскопию. Авторы [19] показали, что с повышением концентрации $V_2O_5$ на поверхности носителя появляются небольшие частицы $V_2O_5$, которые способствуют постепенному увеличению количества $V_2O_5$-слоев. Так, в образце состава 25 мол.% $V_2O_5/Al_2O_3$ 2—4-слойные пластинки $V_2O_5$ покрывают бóльшую часть поверхности $Al_2O_3$.

Ксерогель $V_2O_5 \cdot nH_2O$, благодаря своей матричной структуре, обладает высокой проникающей способностью, что по существу обеспечивает образование наноструктурированного покрытия на основе низкотемпературных оксидных и гидроксидных фаз барьерного слоя на поверхности исходных частиц АСД-4.

Гранулометрический анализ распределения частиц по размерам был выполнен на лазерном гранулометре «Horiba LA-950» с обработкой ультразвуком. Для тонкоизмельченных порошков характерна агрегация мелких частиц, в результате чего результаты гранулометрии отражают размеры агрегатов, а не самих частиц. Для решения этой проблемы исследуемые порошки были диспергированы ультразвуковой обработкой.

Гранулометрический анализ показал, что оба образца имеют достаточно узкое распределение частиц по размерам (рис. 3). Кривые распределения

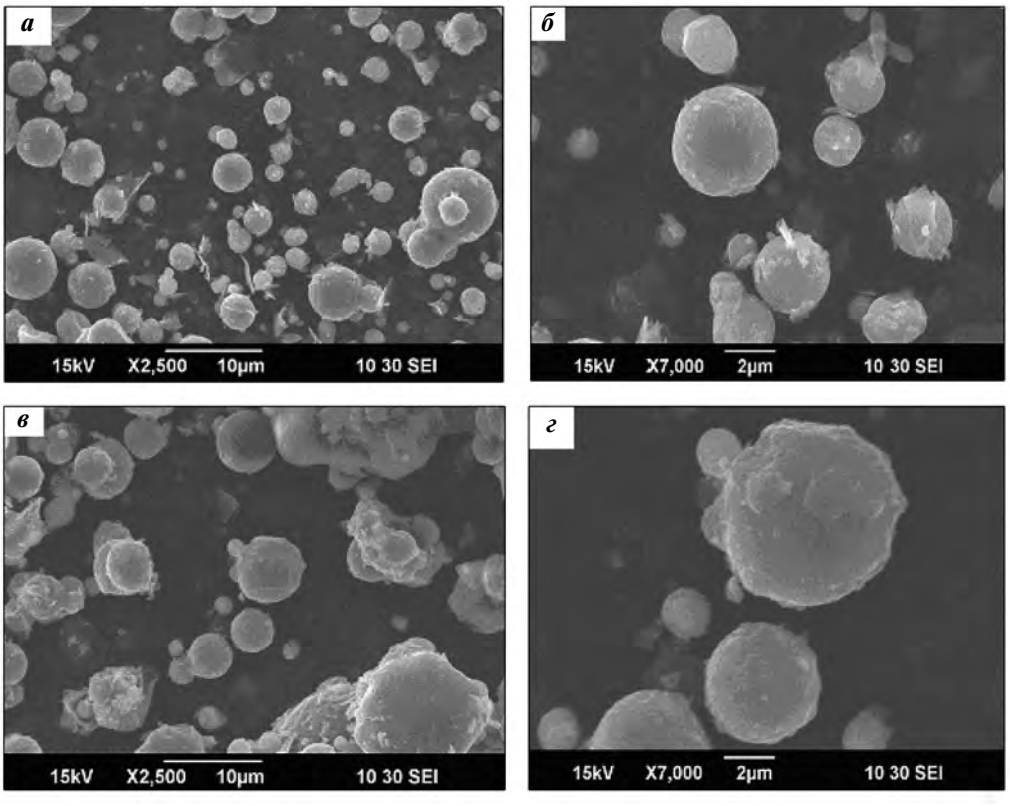


**Рис. 2.** Микрофотографии образца АСД-4, модифицированного гелем $V_2O_5 \cdot nH_2O$, при концентрации $V_2O_5$, равной 5 % (***а***, ***б***) и 10 % (***в***, ***г***)

**Fig. 2.** Micrographs of ASD-4 sample modified by $V_2O_5 \cdot nH_2O$ gel at $V_2O_5$ concentrations of 5 % (***а***, ***б***) and 10 % (***в***, ***г***)

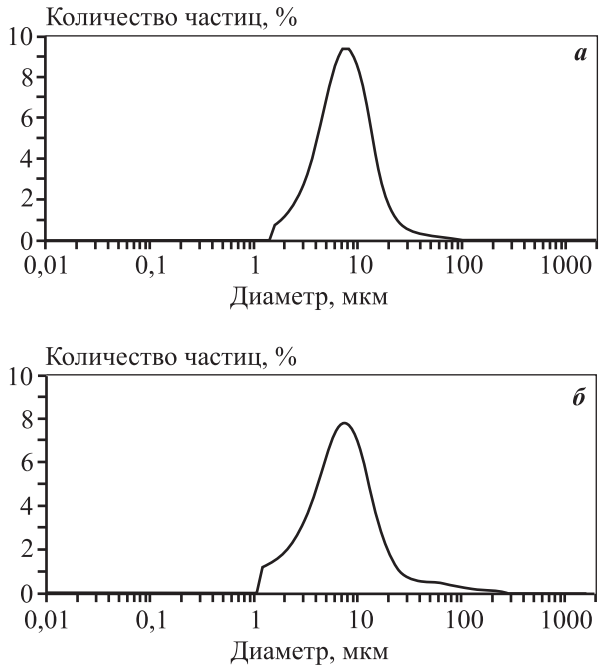


**Рис. 3.** Распределение частиц по размерам
***а*** – АСД-4 + 5 % $V_2O_5$, ***б*** – АСД-4 + 10 % $V_2O_5$

**Fig. 3.** Particle size distribution
***а*** – ASD-4 + 5 % $V_2O_5$, ***б*** – ASD-4 + 10 % $V_2O_5$

во всех случаях имеют хвост в сторону бóльших размеров, что связано с преобладанием процесса коагуляции. Для АСД-4 средний размер частиц составил ~5÷7 мкм, для образца АСД-4 + 5 % $V_2O_5$ — около 9 мкм, для АСД-4 + 10 % $V_2O_5$ — 11 мкм.

Для физической адсорбции, в силу ее малой специфичности, величина удельной поверхности является одной из наиболее важных характеристик физико-химических свойств порошков, обусловливающих их активность. Удельная поверхность образца АСД-4, по нашим расчетам, составила 0,65 м2/г, для состава АСД-4 + 5 % $V_2O_5$ — 6 м$^2$/г, для АСД-4 + 10 % $V_2O_5$ — 16 м$^2$/г. Таким образом, нанесение гидрогеля увеличивает удельную поверхность исходного АСД-4 более чем в десятки раз.

На рис. 4 представлены изотермы адсорбции исследуемых образцов.

Образец АСД-4 можно отнести к непористым материалам. Изотерма адсорбции принадлежит ко 2-му типу по классификации БДДТ согласно рекомендациям Международного союза по теоретической и прикладной химии (IUPAC) [20], что соответствует непористому или макропористому телу. Этот тип изотерм представляет свободную моно-полислойную адсорбцию. Петля гистерези-

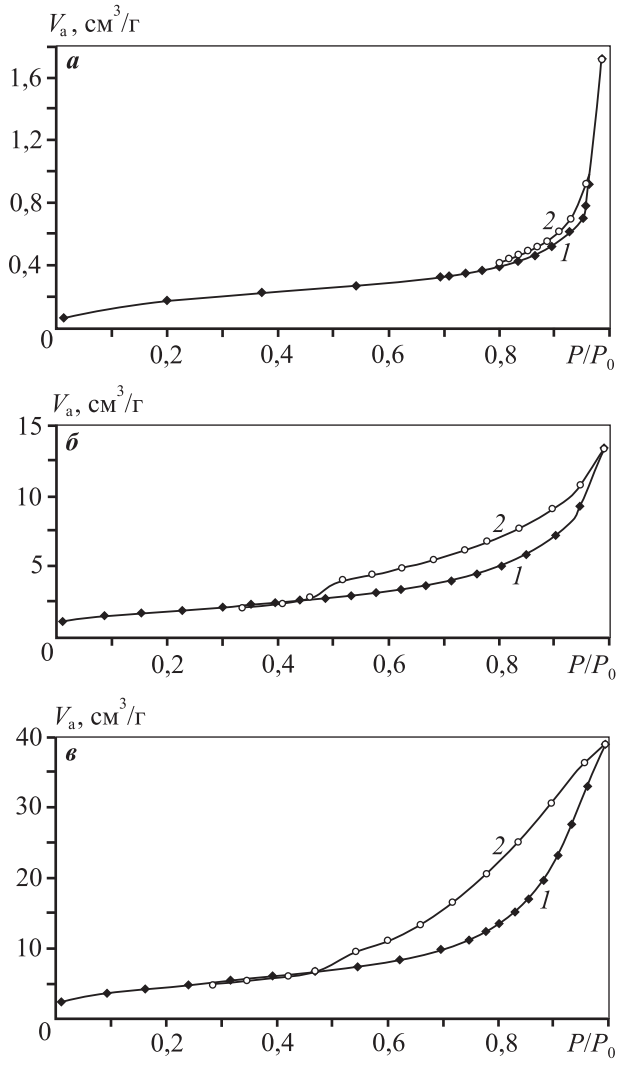


**Рис. 4.** Изотермы адсорбции/десорбции азота
***а*** – АСД-4; ***б*** – АСД-4 + 5 % $V_2O_5$; ***в*** – АСД-4 + 10 % $V_2O_5$
***1*** – адсорбционная кривая, ***2*** – десорбционная

**Fig. 4.** Nitrogen adsorption/desorption isotherms
***а*** – ASD-4; ***б*** – ASD-4 + 5 % $V_2O_5$; ***в*** – ASD-4 + 10 % $V_2O_5$
***1*** – adsorption curve, ***2*** – desorption curve

са смещена в область больших значений $P/P_0$, что указывает на макропористый образец. Как известно, увеличение размера частиц сдвигает петлю гистерезиса вправо и уменьшает ее величину. Слабый гистерезис говорит о капиллярной конденсации, вероятно, вблизи точек контакта соприкасающихся сферических частиц. Возможно, электростатическое взаимодействие между частицами порошка препятствует более плотной усадке частиц.

Изотермы адсорбции и десорбции АСД-4 + $V_2O_5$ (см. рис. 4, *б*, *в*) имеют выпуклый характер в начальной области, что говорит о сильном взаимодействии адсорбат-адсорбент. Видно, что в обла-

сти давлений выше диапазона БЭТ на изотермах присутствует ступенька, свидетельствующая о наличии мезопор. Она является довольно крутой у образца АСД-4 + 5 % $V_2O_5$, из чего следует, что его поры имеют узкое распределение по размерам. Петля гистерезиса на изотерме в процессе десорбции смыкается ранее, чем относительное давление достигнет величины 0,3, что показывает отсутствие микропор. Сделаем поправку на относительность метода БЭТ, тогда как в реальных телах, как правило, в той или иной степени наряду с мезопорами могут присутствовать как микропоры, так и макропоры. Очевидно, что изотермы относятся к IV типу [20]. Как известно, каждый тип петли гистерезиса связан с определенным типом пористой структуры, гистерезис адсорбции и десорбции говорит о наличии смешанного типа пор с преобладанием щелевидных (тип H3) [21]. Из рис. 4, *б*, *в* видно, что в области $P/P_0 = 1$ изотерма имеет характерный изгиб, обусловленный переходом полимолекулярной адсорбции в капиллярную конденсацию. Детальный анализ проблем капиллярной конденсации в промежутках между сферическими частицами проведен в работе [22], где показано, что сначала капиллярная конденсация происходит вблизи точек соприкосновения частиц, далее седлообразные мениски соединяются вместе.

Поскольку мезопоры в образцах могут иметь различные строение и форму, вычисление распределения пор по размерам по адсорбционной ветви и по десорбционной будет приводить к различным результатам. Стоит отдать предпочтение десорбционной ветви изотермы, поскольку изотерма десорбции ближе к истинному термодинамическому равновесию [22]. Для пор, представляющих пустоты между сферическими частицами, как показал анализ [22], также проще использовать десорбционную ветвь гистерезиса. Поскольку при обратном процессе (испарении) мениск имеет сферическую форму, для расчетов структуры подходит уравнение Кельвина [20].

С использованием уравнения Кельвина размер пор рассчитывается как

$$d = \frac{4\sigma V_m}{RT\ln(P_0/P)},$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости, пар которой адсорбируется; $V_m$ — молярный объем жидкого азота; $T$ — температура кипения азота (77 K); $P_0/P$ — относительное давление азота; $d$ — диаметр пор по Кельвину.

На основе модели Кельвина, с учетом толщины адсорбированного слоя, можно провести расчет распределения пор по размерам. Для этого используется метод Баррета—Джойнера—Халенды (BJH) (Barrett—Joyner—Halenda) [20], который основан на теории, сформулированной Дж. Уилером (J.A. Wheeler) для объяснения феномена адсорбции. Метод BJH позволяет получить распределение по размерам для мезопор и самых мелких макропор. Авторы [20] проанализировали взаимозависимость между изотермами десорбции при температуре жидкого азота и распределениями пор по радиусам. Отправные гипотезы этого анализа следующие: поры имеют цилиндрическую форму; количество адсорбата при равновесии с газовой фазой определяется физической адсорбцией на внешней части поры и капиллярной конденсацией в глубине. Поскольку при $P/P_0$, соответствующем началу капиллярной конденсации, на внутренней поверхности пор при опорожнении имеется некоторый адсорбированный слой молекул толщиной $t$, величина $d$ не является истинным диаметром пор.

Истинный диаметр пор вычисляется по уравнению

$$D = d + 2t,$$

где $t$ — толщина адсорбированного слоя.

Толщина $t$ является одним из основных свойств адсорбированного слоя, зависит от состава поверхности, на которой происходит адсорбция, и состава адсорбируемого вещества:

$$t = aV_m/S,$$

где $a$ — количество адсорбированного вещества, $V_m$ — его молярный объем, $S$ — величина удельной поверхности.

Для вычисления объема пор достаточно перевести объем адсорбированного газа при давлении насыщения в объем жидкости. Общий объем сорбирующих пор — объем всех пор, заполняемых в процессе адсорбции и капиллярной конденсации при упругости насыщенного пара, был рассчитан исходя из данных по молярному объему ($V_m$) и количеству вещества, адсорбированного при насыщении адсорбента парами жидкости ($a$):

$$V_s = aV_m.$$

Вычисления проводят для радиусов с размерами от 3 нм до 50—100 нм. Нижний предел ограничен областью применимости уравнения Кельвина, поскольку давно известно, что для очень тонких

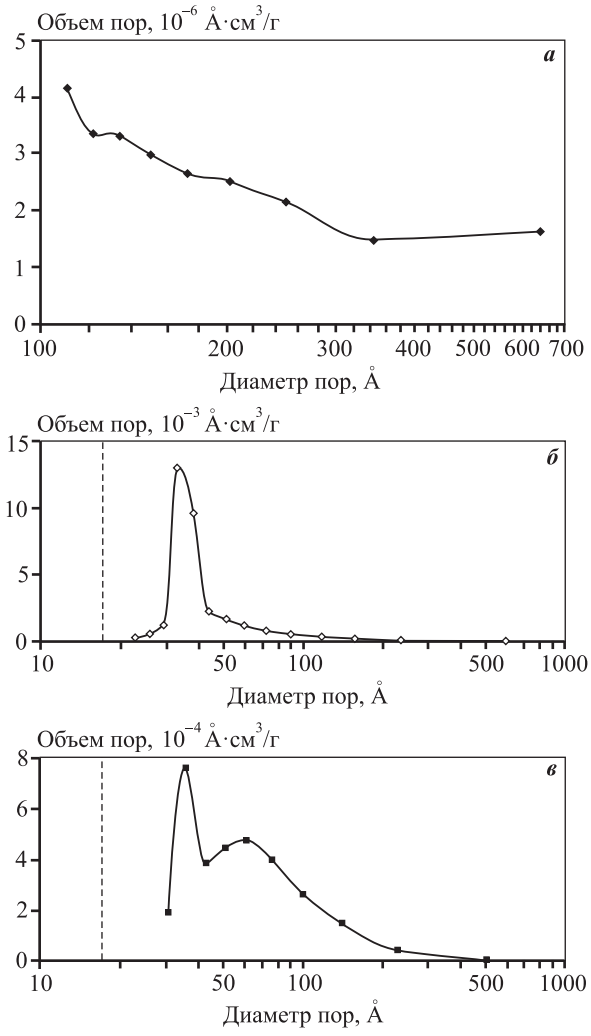


**Рис. 5.** Дифференциальные кривые распределения объема пор по их эффективным диаметрам

***а*** – АСД-4; ***б*** –АСД-4 + 5 % $V_2O_5$; ***в*** – АСД-4 + 10 % $V_2O_5$

**Fig. 5.** Differential curves of pore volume distribution by effective diameters of pores

***а*** – ASD-4; ***б*** –ASD-4 + 5 % $V_2O_5$; ***в*** – ASD-4 + 10 % $V_2O_5$

пор, ширина которых составляет всего несколько молекулярных диаметров, уравнение Кельвина перестает быть справедливым — само понятие мениска теряет смысл. Верхний предел указанного диапазона обусловлен погрешностями измерения давления вблизи $P/P_0$ ~ 1,0 и низкой скоростью установления равновесия в этой зоне, поскольку значение $P/P_0$ настолько здесь близко к единице, что даже небольшие колебания температуры образца окажут несоизмеримо большое влияние на вычисляемую величину радиуса, что особенно важно для такого адсорбата, как азот [23].

Для образца АСД-4 поры в образце практически отсутствуют, что согласуется и с адсорбционными данными (рис. 5, *а*).

Для образца АСД-4 + 5 % $V_2O_5$ характерно узкое распределение пор по размерам с хвостом на графике в сторону их больших диаметров (рис. 5, *б*). В случае АСД-4 + 10 % $V_2O_5$ наблюдаются мезопоры в широком интервале размеров, бимодальное распределение с выраженным максимумом, уширение в сторону пор больших размеров, отсутствие микропор (рис. 5, *в*). Величина пористости для образца АСД-4 + 5 % $V_2O_5$ составила 0,02 см$^3$/г, для АСД-4 + 10 % $V_2O_5$ — 0,06 см$^3$/г. Совокупная площадь поверхности пор для АСД-4 — 0,024 м$^2$/г, АСД-4 + 5 % $V_2O_5$ — 10,5 м$^2$/г, АСД-4 + 10 % $V_2O_5$ — 29,4 м$^2$/г. Средний радиус пор для АСД-4 + 5 % $V_2O_5$ равен 35 Å, для АСД-4 + 10 % $V_2O_5$ — 40 Å. Погрешность измерения объема пор и диаметра пор составляет ±7 %.

## Заключение

Слоистая структура $V_2O_5$ с частично упорядоченной высокоразвитой структурой обусловливает увеличение удельной поверхности модифицированного порошка алюминия в десятки раз.

Благодаря островково-слоистой структуре нанесенного ксерогеля в модифицированных образцах появились мезопоры. Установлено, что при увеличении концентрации гидрогеля адсорбционная активность в изучаемых образцах возрастает. Таким образом, управлять морфологией и размером частиц $Al_2O_3$ можно, меняя концентрацию гидрогеля ванадия.

*Работа выполнена по госбюджетной теме № АААА-А19-119031890028-0.*

**Acknowledgments:** *The research was carried out on State-Funded Topic No. AAAA-A19-119031890028-0.*

## Литература/References

1. *Моррисон С.* Химическая физика поверхности твердого тела. М.: Мир, 1980.
   *Morrison S.* Chemical physics of solid state surface. Moscow: Mir, 1980 (In Russ.).
2. *Петров И.Я., Трясунов Б.Г.* Структура и каталитические свойства нанесенных оксидно-молибденовых, оксидно-ванадиевых и оксидно-хромовых катализаторов дегидрирования углеводородов. VII. Приготовление и фазовый состав нанесенных оксидно-ванадиевых катализаторов. *Вестн. КузГТУ.* 2007. No. 3. С. 84—93.

*Petrov I.Ya., Tryasunov B.G.* The structure and catalytic properties of supported molybdenum oxide, vanadium oxide and chromium oxide catalysts of hydrocarbon dehydration. VII. Preparation and phase composition of supported vanadium oxide catalysts. *Vestnik KuzGTU.* 2007. No. 3. P. 84—93 (In Russ.).

3. *Takahashi H., Shiotani M., Kobayashi H., Sohma J.* ESR study of $V_2O_5$ catalyst on carriers *J. Catal.* 1969. Vol. 14. No. 1. P. 134—141.
4. *Стайлз Элвин Б.* Носители и нанесенные катализаторы. Теория и практика. Пер. с англ. Под ред. А.А. Слинкина. М.: Химия, 1991.
   *Stayes Alvin B.* Catalyst supports and supported catalysts. Theoretical and applied concepts. Guildford: Butterworths Scientific Ltd., 1987.
5. *Воробьев Л.Н., Бадалова И.К., Талипов Г.Ш.* Изучение структуры алюмованадиевых катализаторов методом ЭПР. *Узбек. хим. журн.* 1976. No. 6. С. 20—22.
   *Vorob'ev L.N., Badalova I.K., Talipov G.Sh*. EPR study of the structure of alumo-vanadium catalysts. *Uzbek. khimicheskii zhurnal.* 1976. No. 6. P. 20—22 (In Russ.).
6. *Vernardou D.* State of the art of chemically grown vanadium pentoxide nanostructures with enhanced electrochemical properties. *Adv. Mater. Lett*. 2013. No. 4(11). P. 798—810.
7. *Chernova N.A*. Layered vanadium and molybdenum oxides: batteries and electrochromics. *J. Mater. Chem*. 2009. No. 19. P. 2526—2552.
8. *Шевченко В.Г., Еселевич Д.А., Конюкова А.В., Красильников В.Н.* Способ активации порошка алюминия: Пат. 2509790 (РФ). 2014.
   *Shevchenko V.G., Eselevich D.A., Konyukova A.V., Krasil'nikov V.N.* Method of activation of aluminum powder: Pat. 2509790 (RF). 2014 (In Russ.).
9. *Витязь П.А.* Классификация свойств пористых материалов. *Порошк. металлургия.* 1998. No. 12. С. 72—77.
   *Vityaz' P.A.* The classification of properties of porous materials. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1998. No. 12. P. 72—77 (In Russ.).
10. *Шевченко В.Г., Красильников В.Н., Еселевич Д.А., Конюкова А.В., Анчаров А.И., Толочко Б.П.* Влияние $V_2O_5$ на механизм окисления порошка АСД-4. *Физика горения и взрыва*. 2015. Т. 51. No. 5. С. 70—76.
    *Shevchenko V.G., Krasil'nikov V.N., Eselevich D.A., Konyukova A.V., Ancharov A.I., Tolochko B.P.* The effect of $V_2O_5$ on the mechanism of oxidation of ASD-4 powder. *Fizika goreniya i vzryva.* 2015. Vol. 51. No. 5. P. 70—76 (In Russ.).
11. *Рябина А.В., Кононенко В.И.* Удельная поверхность дисперсных материалов на основе алюминия. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2014. No. 2. С. 3—7.
    *Ryabina A.V., Kononenko V.I.* The specific surface of dispersed materials based on aluminum. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2014. No. 2. P. 3—7 (In Russ.).
12. *Волков В.Л.* Фазы внедрения на основе оксидов ванадия. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987.
    *Volkov V.L.* Interstitial phases based on vanadium oxides. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1987 (In Russ.).
13. *Zhao J., Wang G., Li X., Li C.* Intercalation of conducting poly (N-propane sulfonic acid aniline) in $V_2O_5$ xerogel. *J. Appl. Polymer Sci.* 2007. Vol. 103. P. 2569—2574.
14. *Lee C.-Y., Marschilok A.C., Subramanian A., Takeuchi K.J., Takeuchi E.S.* Synthesis and characterization of sodium vanadium oxide gels: The effects of water (n) and sodium (x) on the electrochemistry of $Na_xV_2O_5{\cdot}nH_2O$. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2011. Vol. 13. P. 18047—18054.
15. *Livage J.* Vanadium pentoxide gels. *Chem. Mater.* 1991. Vol. 3. No. 4. P. 578—593.
16. *Bailes M., Stone F.S.* Heterogeneity of $V_2O_5/Al_2O_3$ as studied by water vapour adsorption microcalorimetry. *Catal. Today.* 1991. Vol. 10. No. 3. P. 303—313.
17. *Avansi W., Ribeiro C., Leite E.R., Matelaro V.R.* Growth kinetics of vanadium pentoxide Nanostructures under hydrothermal conditions. *J. Cryst. Growth*. 2010. No. 312. P. 3555—3559.
18. *Legendre J.J.* Vanadium pentoxide nanostructures: An effective control of morphology and crystal structure in hydrothermal conditions. *J. Colloid. A. Interface Sci.* 1983. Vol. 94. No. 1. P. 75—83.
19. *Inomata M., Mori K., Murakami Y.* Structures of supported vanadium oxide catalysts. 1. Vanadium (V) oxide/titanium dioxide (anatase), vanadium (V) oxide/titanium dioxide (rutile), and vanadium (V) oxide/titanium dioxide (mixture of anatase with rutile). *J. Phys. Chem*. 1983. Vol. 87. No. 5. P. 761—768.
20. *Грег С., Синг К.* Адсорбция. Удельная поверхность. Пористость. Пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984.
    *Greg S., Sing K.* Adsorption. Specific surface. Porosity. 2-nd ed. Academic Press, 1982.
21. *Линсен Б.Г.* Строение и свойства адсорбентов и катализаторов. М.: Мир, 1973.
    *Linsen B.G.* Structure and properties of adsorbents and catalysts. Moscow: Mir, 1973 (In Russ.).
22. *Карнаухов А.П.* Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1999.
    *Karnaukhov A.P.* Adsorption. Texture of dispersed and porous materials. Novosibirsk: Nauka, Sib. otd., 1999 (In Russ.).
23. *Фенелонов В.Б.* Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов. 2-е изд., испр. и доп. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004.
    *Fenelonov V.B.* Introduction to physical chemistry of formation of supramolecular structure of adsorbents. 2-nd ed. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2004 (In Russ.).