

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ

УДК 541.183

МОЛЕКУЛЯРНО-СИТОВОЙ ЭФФЕКТ ПРИ АДСОРБЦИИ ЦИАНИДА ЗОЛОТА НА УГЛЕРОДНЫХ АДСОРБЕНТАХ

© 2023 г. С. Д. Артамонова¹, А. А. Фомкин¹, *, В. В. Гайдамович¹,
А. В. Школин¹, И. Е. Меньщиков¹

¹ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Ленинский проспект, 31, стр. 4, Москва, 119071 Россия

*e-mail: fomkuna@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2022 г.

После доработки 21.12.2022 г.

Принята к публикации 27.12.2022 г.

Исследованы структурно-энергетические характеристики ряда промышленных и опытных образцов микропористых углеродных адсорбентов для технологии цианидного извлечения золота. Из результатов анализа структурно-энергетических характеристик микропористых углеродных адсорбентов сделан вывод, что наиболее эффективными являются адсорбенты с шириной микропор около $\sim X_0 = 1.1\text{--}1.2$ нм. Адсорбционная селективность таких адсорбентов объясняется молекулярно – ситовыми эффектами по отношению к цианидному комплексу золота $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$.

Ключевые слова: адсорбция, углеродный микропористый адсорбент, цианид золота, $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$

DOI: 10.31857/S0044185623700122, **EDN:** SYAFJE

ВВЕДЕНИЕ

Углесорбционная технология переработки золотосодержащих руд является эффективным процессом получения благородных металлов [1]. Технологии “уголь в пульпе”, а также “кучного выщелачивания” получили широкое распространение в гидрометаллургии благородных металлов [2, 3]. В технологии “уголь в пульпе” активный уголь вводится в пульпу щелочного цианидного раствора тонко измельченной руды, содержащей золото. Для ускорения процесса сорбции цианида золота $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$ пульпа интенсивно перемешивается. При этом важно, чтобы адсорбент имел высокую прочность на истирание. По окончании процесса сорбции пульпа проходит через сита, на которых остаются гранулы адсорбента с сорбированным цианидом золота $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$. Десорбция цианида и получение золота проводятся термохимическими методами. После регенерации адсорбент возвращается в технологический процесс.

В технологии “кучного выщелачивания” золотосодержащая руда насыпается в виде кучи на специальной площадке с водонепроницаемым поддоном, имеющим уклон для слива раствора цианидов. Руда в виде тонко измельченного порошка, содержащего золото, распределяется по поддону и орошается водным раствором цианида, который по мере прохождения через слой вступает

в химическую реакцию с образованием $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$. Снизу кучи организуется отвод водного раствора, содержащего $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$, который затем подается на адсорбционную колонну с активным углем, где и происходит селективное выделение $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$. После насыщения активного угля $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$, проводится процесс десорбции и химическое выделение золота.

В получаемом растворе часто содержатся цианиды не только золота, но и других ценных металлов, в том числе серебра, платины, меди [4]. Основная проблема применения углеадсорбционной технологии заключается в относительно низкой адсорбционной активности и селективности существующих адсорбентов по $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$. В ряде работ рассматриваются подходы увеличения адсорбционной активности, основанные на изменении химического состояния поверхности [4, 5]. В то же время влиянию структурно-энергетических характеристик адсорбентов, эффектов селективности, не уделяется должного внимания. В связи с этим целью работы является определение оптимальных структурно-энергетических характеристик и причин молекулярно-ситовой селективности микропористых углеродных адсорбентов, используемых в углеадсорбционной технологии адсорбции $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$.

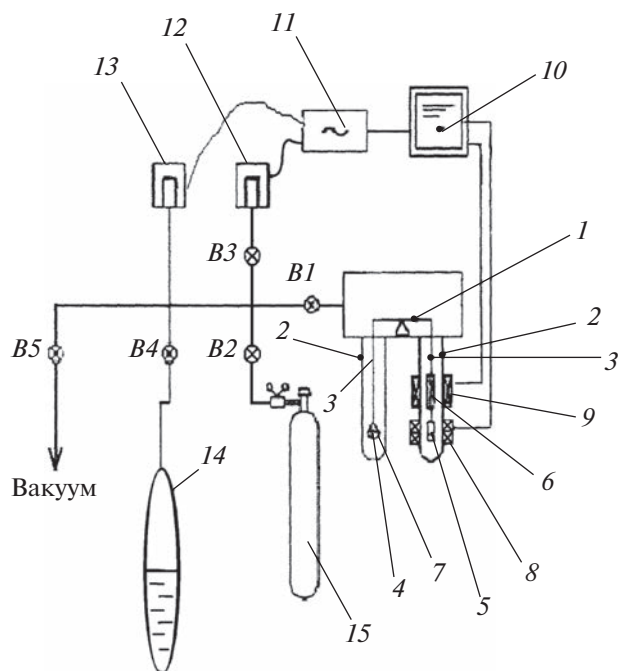


Рис. 1. Схема адсорбционной вакуумной установки: 1 – коромысло весов; 2 – стеклянные ампулы; 3 – тяги весов; 4 – чаша для адсорбента; 5 – противовес из железа Армко; 6 – противовес, магнитный сердечник; 7 – сорбент; 8 – катушка дифференциального индуктивного датчика перемещений; 9 – катушка электромагнитной компенсации; 10 – измерительный блок с аналогово-цифровым преобразователем; 11 – компьютер; 12 – манометр М10; 13 – манометр М1000; 14 – ампула с исследуемой жидкостью; 15 – баллон и система редукторов с исследуемым газом; В1–В5 – вакуумные вентили.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Адсорбенты

В работе исследовали промышленные и опытные образцы микропористых активных углей российского и зарубежного производства ФАД; МеКС; АГ-95; ИПИ-Т; АГ-90; ДАС; GW612В (Фатамура N); R2515 (Норит); GCN620G (Норит); R03515 (Норит); РНО 6 × 12 (Еврокарб), предназначенные для технологии углесорбционного извлечения ионов золота $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ из водных цианидных растворов [2].

Адсорбат

В работе использовали бензол (C_6H_6) марки “чистый для хроматографии”. По данным [6] бензол обладает следующими физико-химическими свойствами: молекулярная масса: $\mu = 78.108$ г/моль; нормальная температура кипения $T_b = 353.2$ К; критическая температура $T_c = 562.6$ К; критическое давление $P_c = 49.2$ бар.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Структурно-энергетические характеристики пористой структуры адсорбентов исследовали гравиметрическим методом по изотермам адсорбции стандартного пара бензола при 298 К в интервале давлений от ~ 0.01 Па до ~ 10 кПа на вакуумном стенде весового типа, разработанном и изготовленном в ИФХЭ РАН [7, 8]. Схема основных элементов стенда представлена на рис. 1. Механический блок с коромыслом весов 1 установлен в специальной вакуумируемой металлической камере, имеющей технологические отверстия с резьбовыми и фланцевыми соединениями для подключения к газовым магистралям стенда. На металлической камере находятся так же разъемные соединения, предназначенные для присоединения стеклянных ампул 2, в которых расположены тяги 3 коромысла 1 с чашей для адсорбента 4 и противовесами 5, 6, являющимися сердечниками электромагнитной системы компенсации изменения массы адсорбента при адсорбции.

Само коромысло весов 1 закреплено на специальном низкогистерезисном проволочном подвесе, смонтированном на базовой рамочной платформе.

Образец адсорбента 7 размещается в чаше 4, соединенной с помощью тяги 3 с коромыслом весов. Противовес 5 изготовлен из железа Армко и служит сердечником дифференциального индуктивного датчика перемещений 8, а магнитный противовес 6 – сердечником индуктивной электромагнитной системы компенсации изменения массы адсорбента с катушкой 9. Согласование работы этих систем осуществляется электронным блоком 10. В процессе работы блок 10 передает показания индукционного датчика на аналого-цифровой преобразователь и персональный компьютер 11. Такой принцип действия позволяет выводить электронные весы в область наибольшей чувствительности, и тем самым, повышать точность измерения адсорбции.

Для измерения абсолютного давления использовали оригинальные сильфонные манометры, разработанные и изготовленные в ИФХЭ РАН. Манометр 12 предназначен для измерения давлений от 0.1 до 1330 Па (тип М10, погрешность ± 0.066 Па); манометр 13 предназначен для измерения давлений от 13 Па до 0.15 МПа (тип М1000, погрешность ± 4.0 Па). При исследовании давлений больших 1300 Па измерительную линию с манометром М10 перекрывали при помощи вакуумного вентиля В3. Для повышения точности измерения манометры термостировали при 303 ± 0.1 К. Каждый из манометров имеет метрологический безгистерезисный сильфон из дисперсионно-твердеющего сплава 36ХНТЮ. Дно сильфона через шток связано с сердечником дифференциального трансформатора. Смещение дна сильфона под действием измеряемого давления преобразу-

ется с помощью индуктивного преобразователя в сигнал переменного тока, который регистрируется прецизионным цифровым вольтметром KEYSIGHT 34461A с разрешением не менее 1 мкВ на частоте 1 кГц. Сигнал с вольтметра передается на аналогово-цифровой преобразователь, который в свою очередь передает сигнал блоку управления на персональном компьютере 11. Калибровку манометров M10 и M1000 осуществляли с помощью манометров Baratron 626. Вакуумирование стенда производили форвакуумным насосом 2HBP-5DM с азотной ловушкой и диффузионным насосом СДН-9 при открытых вакуумных вентиллях B1, B3, B5.

При исследовании адсорбции анализируемое вещество подается порциями в установку на регенерированный подготовленный адсорбент 7 при заданной температуре. При этом вентиль B5 – закрыт, вентиль B1 – открыт, вентиль B3 – открыт или закрыт в зависимости от величины давления. Пары над жидкостью из ампулы 14 подаются порциями через вентиль B4; газ подается из баллона 14 через систему регуляторов давления и вакуумный вентиль B2. Для более плавной подачи газа в систему измерения, газовая магистраль от регулятора давления к вентилю B2 выполнена из капиллярной трубки внутренним диаметром 0.5 мм, длиной 1.5 м. В опытах используются жидкие адсорбтивы, дополнительно очищенные путем двойной вакуумной перегонки при 77 К.

Для термостатирования и регенерации адсорбента при температурах 360–673 К используется электрический термостат, позволяющий поддерживать температуру с погрешностью ± 0.2 К. Термостатирование ампулы с адсорбентом в интервале температур от 293 до 360 К осуществляется с помощью жидкостного циркуляционного термостата LOIP LT-411, с погрешностью ± 0.01 К. При температурах от 193 до 293 К используется жидкостный криотермостат сверхнизкого охлаждения LOIP FT-311-80 с погрешностью охлаждения ± 0.01 К. Измерение адсорбции при температуре 77 К производится с использованием жидкого азота.

До начала проведения экспериментов образец адсорбента взвешивали с точностью $\pm 0.5 \times 10^{-4}$ г и регенерировали в термовакуумных условиях при температуре 673 К в течение 24 ч до остаточного давления ~ 0.01 Па. Погрешность измерения адсорбции составляла $\pm 2\%$ с доверительной вероятностью 95%; погрешность измерения давления составила $\pm 0.01\%$; измерения температуры ± 0.1 К. Поправку на плавучесть образца определяли с использованием калибровки адсорбента по гелию на приборе “Ultracyc 5000”.

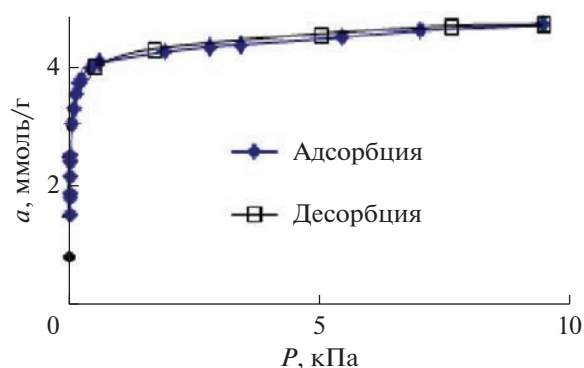


Рис. 2. Зависимость адсорбции стандартного пара бензола от давления на активном угле ФАД при температуре 298 К. Сплошные линии – аппроксимация, зачерненные значки – адсорбция, светлые значки – десорбция.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Адсорбцию, определяли как полное содержание адсорбата в микропорах (1)

$$a = (m_a - m_0)/m_0, \quad (1)$$

где m_a – масса адсорбента с адсорбированным веществом, m_0 – масса регенерированного адсорбента. В качестве примера на рис. 2 представлена изотерма адсорбции бензола на активном угле ФАД при 293 К.

Как следует из рис. 2, изотерма адсорбции бензола на образце ФАД обратима и имеет Г-образный вид, характерный для микропористых адсорбентов, с резко растущей адсорбцией при малых давлениях. Для определения структурно-энергетических характеристик (СЭХ) адсорбентов использовали уравнение Дубинина–Радушкевича теории объемного заполнения микропор Дубинина (ТОЗМ), выраженное в линейной форме.

$$\ln a = \ln a_0 - (A/E_0)^2, \quad (2)$$

где $A = RT \ln(p_s/p)$ – дифференциальная мольная работа адсорбции; $R = 8.314$ Дж К $^{-1}$ моль $^{-1}$ – универсальная газовая постоянная; T – температура; p – давление пара; p_s – давление насыщенного пара бензола. E_0 – стандартная характеристическая энергия адсорбции бензола.

Константы E_0 и a_0 определяли по линейной части изотермы адсорбции в координатах $\ln a = f(A^2)$ в давлениях до $p/p_s > 0.3$ [9]. Эффективную ширину микропор X_0 , для шелевидной модели, определяли с использованием соотношения: E_0 (кДж/моль) = $24/X_0$ (нм) [10]. При температуре 298 К плотность бензола в микропорах ρ_{ad} близка к плотности жидкости $\rho_l = 0.883$ г/см 3 [6], поэтому в (2) удельный объем микропор адсорбента определяли как $W_0 = a_0/\rho_l$. Результаты определения струк-

Таблица 1. Структурно-энергетические характеристики углеродных микропористых адсорбентов, используемых в углесорбционной технологии переработки золотосодержащих руд

Адсорбент	W_0 , см ³ /г	E_0 , кДж/моль	X_0 , нм	$S_{БЭТ}$, м ²
ФАД	0.54	20.8	1.16	1070
GW612B (Футамура N)	0.48	19.4	1.24	—
R2515 (Норит)	0.40	22.2	1.08	—
GCN620G (Норит)	0.36	16.3	1.48	650
ИПИ-Т	0.35	24.0	1.00	—
РНО 6 × 12 (Еврокарб)	0.34	24.7	0.98	664
R03515 (Норит)	0.34	25.2	0.96	710
MeKC	0.31	25.0	0.96	671
ДАС	0.28	18.8	1.28	540
АГ-90	0.27	20.5	1.16	—
АГ-95	0.13	16.8	1.42	275

турно-энергетических характеристик по экспериментальным данным адсорбции бензола на углеродных адсорбентах представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что используемые адсорбенты имеют развитую микропористую структуру. Средняя эффективная ширина микропор по Дубинину составляет $\langle X_0 \rangle = 1.16$ нм, что близко к оптимальной, согласно данным по энергии адсорбции [11, 12] для адсорбции линейных ионов $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$, имеющих размеры (0.801×0.27) нм.

В [11, 12] показано, что наибольшей энергии адсорбции соответствуют поры углеродного адсорбента с размером примерно в ~ 1.6 раза превосходящие размер адсорбируемых молекул. В нашем случае, этому соответствуют поры с размером ~ 1.26 нм в расчете на максимальный размер ионов, что близко к $\langle X_0 \rangle = 1.16$ нм – средней эффективной ширине микропор изученных адсорбентов (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что для исследованных углей средняя стандартная характеристическая энергия адсорбции по бензолу, $\langle E_0 \rangle = 21.2$ кДж/моль; средний удельный объем микропор, $\langle W_0 \rangle = 0.34$ см³/г. Эти оценки качественно совпадают с оценками, приведенными в [13–15] для активных углей, используемых в разных вариантах пульпосорбционной технологии.

Близость значений оценки ширины пор и эффективной ширины микропор по методу Дубинина, позволяет сделать вывод о том, что ионы $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$ наиболее активно и селективно сорбируются в микропорах именно таких активных углей. Здесь уместно отметить, что адсорбция в общем случае зависит не только от характеристической энергии E_0 химического состояния поверхности, ширины микропор X_0 , но и от удельного объема микропор W_0 (2). Поэтому применение адсорбента ДАС, имеющего близкие размеры

микропор $X_0 = 1.28$ нм, но небольшой объем микропор $W_0 = 0.28$ см³/г и малую характеристическую энергию, менее предпочтительно.

Причина, вызывающая проявление селективности сорбции ионов цианидов золота и серебра, может быть связана с повышением плотности ионов цианида золота, связанной с ориентацией адсорбированных ионов в порах оптимальной ширины. Для обоснования этого вывода провели численное моделирование адсорбции методом молекулярной динамики, линейных молекул *n*-пентана, схожих по геометрии и имеющих близкие размеры (0.728×0.49) нм, в щелевидных порах углеродных адсорбентов с шириной микропор 1.1 нм.

Исследована адсорбция единичной молекулы *n*-пентана в щелевидных микропористых углеродных структурах. Численное моделирование проводили в каноническом (N, V, T) ансамбле. Ячейка моделирования, представляла собой куб, с гранями 10 нм, края которого ограничены периодическими граничными условиями. Температура эксперимента составляла 293 К. В вычислениях использовали термостат Андерсена [16]. Для всех систем проводили исследования молекулярно-динамической траектории с временем 2×10^{-9} с. Элементарный шаг интегрирования уравнения движения составил 10^{-15} с. Усреднение параметров системы для обработки результатов численного эксперимента проводили каждые 10^{-12} с. Время достижения равновесных состояний исследованных систем оценивали по изменению полной энергии системы во времени. Оно составляло не более 1×10^{-9} с. Использовали программный пакет *TINKER* [17] и, для уменьшения затрат машинного времени, универсальное атом-атомное силовое поле *OPLSAA* [18], моделирующее общий потенциал взаимодействия.

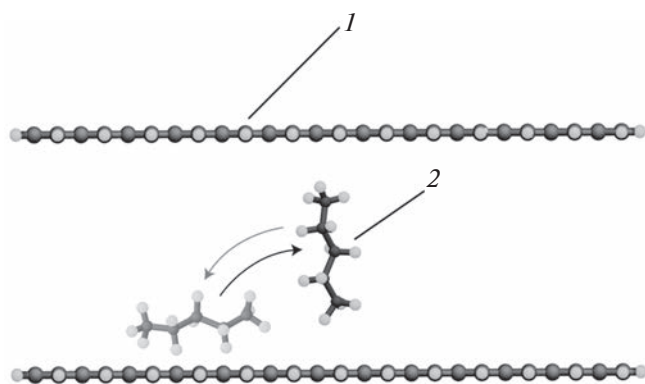


Рис. 3. Ориентация молекулы *n*-пентана в щелевидной графеновой микропоре при 293 К. 1 – графены, темные кружки – атомы углерода на переднем плане, светлые – атомы водорода; 2 – молекула *n*-пентана, темные кружки – атомы углерода, светлые – атомы водорода. Стрелками указаны менее выраженные ориентации *n*-пентана. Преимущественное положение изображено более насыщенным цветом.

Модель адсорбента представляла собой два графена квадратной формы со стороной около 1.5 нм, находящихся на расстоянии друг от друга, равном 1.1 нм при определении по центрам атомов углерода, размещенные в центре ячейки моделирования. Свободные связи атомов углерода на краях графенов были скомпенсированы атомами водорода. В ячейке моделирования вне поры находилась одна молекула *n*-пентана. Для случаев, когда молекула попадала в пору, производился расчет плотности вероятности распределения и ее пространственной ориентации.

Для достижения статистической достоверности определения положения молекул *n*-пентана в графеновой микропоре усредняли результаты расчеты адсорбции из 30 случайных позиций молекулы в ячейке моделирования.

При ширине поры 1.1 нм молекула *n*-пентана преимущественно ориентирована нормально к ее стенкам (рис. 3).

Имеется также вероятность разворота молекулы в плоскость, планарную к стенкам пор. Плотность вероятности ориентации молекулы *n*-пентана в полярных координатах в модельной микропоре представлена на рис. 4.

Как следует из рис. 4, молекула *n*-пентана преимущественно (с вероятностью 73%) располагается в среднем под углом 80.5° относительно слоев графена, образующих пору. Также молекула может располагаться параллельно стенкам пор (графенам) с вероятностью 27%.

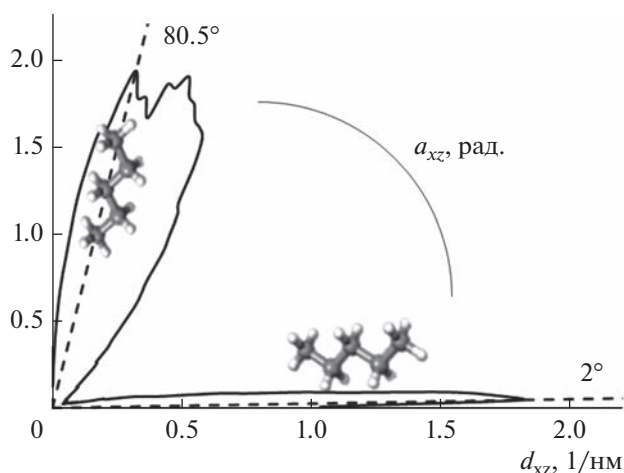


Рис. 4. Плотность вероятности пространственной ориентации *n*-пентана в плоскости *xz* (нормально к стенкам пор) и в плоскости *xу* (планарно к графеновой стенке) в поре шириной 1.1 нм в полярных координатах.

На рис. 5 представлена плотность вероятности расположения молекулы *n*-пентана по оси *z* (ширине поры) в поре шириной 1.1 нм.

Эти выводы подтверждаются также результатами определения плотности вероятности нахождения центра масс молекулы *n*-пентана по ширине поры (ось *z*). Пунктиром указана поверхность поры, отсчитанная по периферической поверхности атомов углерода. Из рис. 5 следует, что наибольшая плотность адсорбированного *n*-пентана характерна для центральной части микропоры. С меньшей вероятностью молекула *n*-пентана

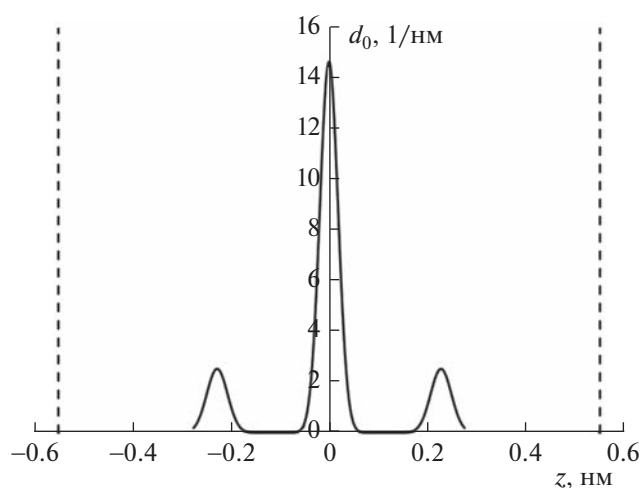


Рис. 5. Плотность вероятности расположения молекулы *n*-пентана по оси *z* (ширине поры) в поре шириной 1.1 нм. Пунктирные линии – границы графеновой микропоры.

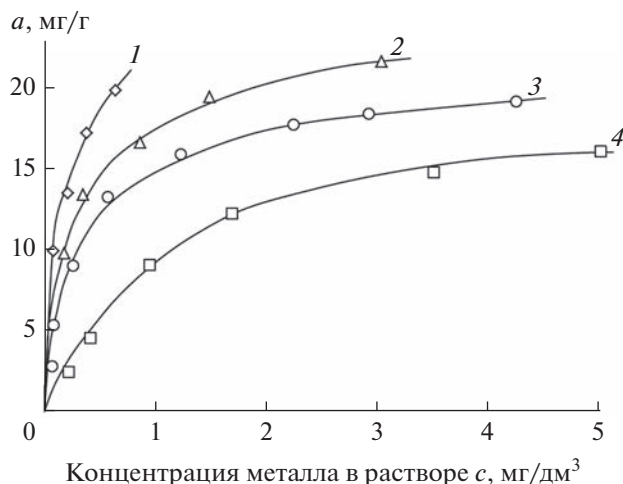


Рис. 6. Зависимость адсорбции золота из индивидуальных цианистых растворов $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$ углеродными микропористыми адсорбентами при 293 К: 1 – R2515 (Норит); 2 – GW612B (Футамуре N); 3 – ИПИ-Т; 4 – ИГИ-С.

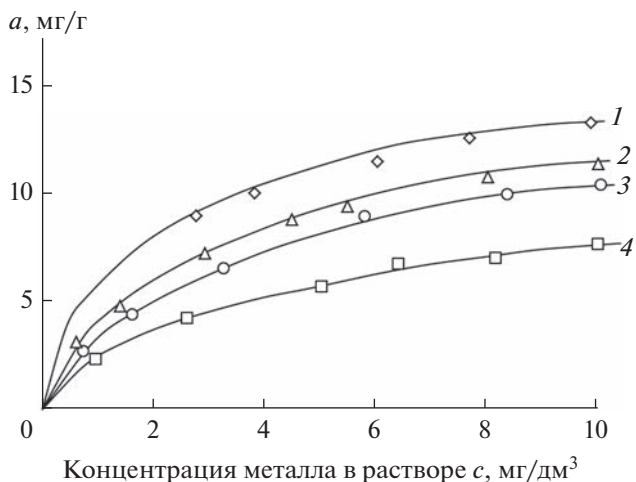


Рис. 7. Зависимость адсорбции серебра из индивидуальных цианистых растворов $[\text{Ag}(\text{CN}_2)]^-$ углеродными микропористыми адсорбентами при 293 К: 1 – R2515 (Норит); 2 – GW612B (Футамуре N); 3 – ИПИ-Т; 4 – ИГИ-С.

может располагаться планарно стенкам микропоры. По аналогии, вероятно такая же ориентация ионов цианида золота приводит к увеличению их числа в единице объема микропор, то есть к увеличению адсорбционной активности углеродного адсорбента.

Отсюда следует, что сорбируемость цианидных комплексов разных металлов на одном и том же адсорбенте должна существенно различаться. На рис. 6–8 представлены изотермы адсорбции $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$ и $[\text{Ag}(\text{CN}_2)]^-$ на микропористых углеродных адсорбентах, в том числе и на микропористом активном угле GW612B (Футамуре N), структуру, которого обсуждали выше [2].

Повышенная сорбция цианида золота $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$ по сравнению с цианидом серебра $[\text{Ag}(\text{CN}_2)]^-$ на микропористом углеродном адсорбенте GW612B вероятно обусловлена стерическими соотношениями размеров пор и иона $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$. В практическом плане это означает, что для увеличения селективности активных углей по конкретному цианиду металла необходимо, чтобы пористая структура адсорбента имела узкое распределение микропор по размерам, соответствующее оптимальному соотношению размера пор и размеров иона цианида. Для иона $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$ этому соответствуют поры с эффективным размером ~ 1.26 нм.

Этот эффект носит общий характер. В частности, в работах [20, 21] также обнаружены эффекты селективности, обусловленные специфичностью сорбции растворов тория, урана, нептуния и плу-

тония сорбентами, импрегнированными смесью фосфорилподанда кислотного типа и нитрата метилтриоктиламмония.

Таким образом, в заключение можно отметить, что для увеличения сорбции цианида золота $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$, селективности извлечения, необходимо использовать микропористые углеродные адсорбенты с оптимальной пористой структурой: узким распределением пор по размерам ~ 1.1 – 1.2 нм,

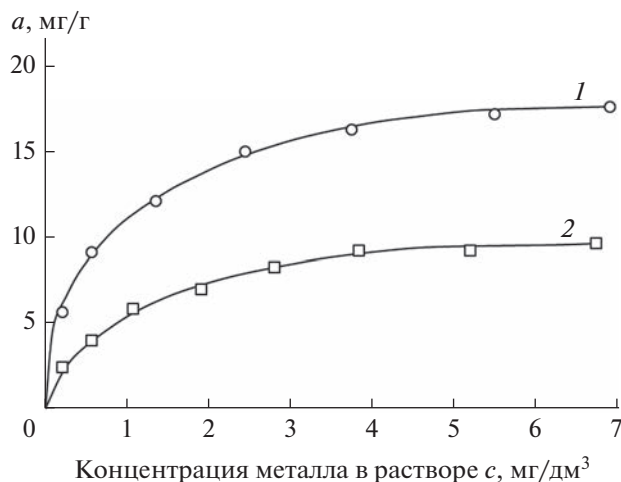


Рис. 8. Зависимость адсорбции золота и серебра из индивидуальных цианистых растворов $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$ и $[\text{Ag}(\text{CN}_2)]^-$ углеродным микропористым адсорбентом АГ-90 при температуре 293 К: 1 – $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$; 2 – $[\text{Ag}(\text{CN}_2)]^-$ [19].

соответствующем целевому цианиду и максимально возможным объемом микропор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлургия благородных металлов. Под ред. Чугаева Л.В. 2-е изд. М.: Изд-во "Металлургия", 1987.
2. Леонов С.Б., Елишин В.В., Дударев В.И., Голодков Ю.Э., Ознобихин Л.М. Получение и применение синтетических углеродных сорбентов для извлечения благородных металлов // Из-во ИГТУ, Иркутск, 1997.
3. Меретуков М.А. Активные угли и цианистый процесс. М.: Изд-во "Руда и металлы", 2007.
4. Зеликман А.Н., Вольдман Г.М., Беляевская Л.В. Теория гидрометаллургических процессов. М.: Изд-во "Металлургия", 1983.
5. Картель Н.Т. Адсорбция, адсорбенты и адсорбционные процессы в нанопористых материалах. Сборник материалов. Под ред. Цивадзе А.Ю. М.: Изд-во "Граница", 2011. С. 381–405.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, М.: Наука, 1972.
7. Школин А.В., Фомкин А.А. // Измерительная техника. 2018. № 4. С. 56–61.
8. Школин А.В., Фомкин А.А., Меньщиков И.Е., Харитонов В.М., Пулин А.Л. Патент РФ 2732199. Стенд для измерения адсорбции газов и паров гравиметрическим методом и способ его эксплуатации.
9. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость. М.: Изд-во ВАХЗ, 1972.
10. Дубинин М.М. Сб. Углеродные адсорбенты и их применение в промышленности. М.: Наука, 1983. с. 100–114.
11. Фенелонов В.Б. Пористый углерод. Новосибирск. Изд-во Института катализа СО РАН, 1995.
12. Walker P.L., Austin L.G., Nandi S.P. Chemistry and Physics of Carbon. Marcel Dekker. New York. NY. USA. 1966.
13. Ласкорин Б.Н., Гастева Н.Ю. // Цветные металлы 1992. № 7. С. 21–22.
14. Чернов В.К., Войлошников Г.И., Тихонова О.Н. // В сб. Современное состояние и перспективы развития угольно-сорбционных процессов в гидрометаллургии благородных металлов. Иркутск. Ирриредмет, 1990. С. 25.
15. Мухин В.М., Тарасов А.В., Клушин В.Н. Активные угли России. М.: Изд-во "Металлургия", 2000. С. 352.
16. Andersen H.C. // J. Chem. Phys. 1980. V. 72. P. 2384
17. Rackers J.A., Wang Z., Lu C., Laury M.L., Lagardère L., Schnieders M.J., Piquemal J.P., Ren P., Ponder J.W. // J. Chemical Theory and Computation. 2018. V. 14. № 10. pp. 5273–5289.
18. Jorgensen W.L., Maxwell D.S. Tirado-Rives J. // J. Am. Chem. Soc. 1996. V. 118. P. 11225.
19. Войлошников Г.И. Адсорбционное извлечение золота из цианистых растворов и пульп. Иркутск. Ирриредмет, 1989.
20. Чухланцева Е.В., Усолкин А.Н., Коваленко О.В., Неудачина Л.К., Баулин В.Е., Цивадзе А.Ю. // Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. № 2. С. 219.
21. Чухланцева Е.В., Усолкин А.Н., Баулин В.Е., Коваленко О.В., Неудачина Л.К., Цивадзе А.Ю. // Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. № 3. С. 314.