

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ

УДК 54.08

АДСОРБЦИЯ КСЕНОНА И КРИПТОНА НА МИКРОПОРИСТЫХ  
УГЛЕРОДНЫХ АДСОРБЕНТАХ ИЗ ОБЕДНЕННЫХ  
ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

© 2022 г. А. А. Фомкин<sup>1</sup>\*, С. Д. Артамонова<sup>1</sup>, А. Л. Пулин<sup>1</sup>,  
А. В. Школин<sup>1</sup>, И. Е. Меньщиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,  
Ленинский проспект, 31/4, Москва, 119071 Россия

\*e-mail: fomkinaa@mail.ru

Поступила в редакцию 04.05.2022 г.

После доработки 14.05.2022 г.

Принята к публикации 20.05.2022 г.

На основе Теории объемного заполнения микропор М.М. Дубинина проведен анализ структурно-энергетических характеристик модельных углеродных адсорбентов для сорбции ксенона (Xe) и криптона (Kr) из обедненных газозвушных потоков. Обнаружено, что максимальная адсорбционная активность по Xe и Kr достигается при ширине микропор ~0.8–0.9 нм. Проведено исследование адсорбции Xe, Kr, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> на микропористом активном угле Т-3 с эффективной шириной микропор 0.94 нм при давлениях до 100 кПа и температуре 293 К. Показано, что такой адсорбент может быть эффективно использован для улавливания Xe и Kr из обедненных газозвушных потоков.

*Ключевые слова:* адсорбция, углеродный адсорбент, пористость, ксенон, криптон, селективная сорбция

DOI: 10.31857/S0044185622050072

ВВЕДЕНИЕ

Инертные газы ксенон и криптон являются продуктами атомных реакций, возникающими при делении ядер урана. Они образуются преимущественно в земной коре и диффундируют в воздух. В очень малых количествах они обнаруживаются также в составе атмосферного воздуха, в частности содержание ксенона (Xe) составляет порядка ~10<sup>-8</sup>, а криптона (Kr) ~10<sup>-10</sup>.

Значительно большие количества ксенона, могут содержаться в составе природного газа. В [1, 2] отмечается, что содержание ксенона может быть на четыре порядка выше чем в воздухе, до 0.15 об. % и выше. Несмотря на малое природное содержание Xe и Kr в газах, их востребованность в высокотехнологичных отраслях, велика. В частности Xe широко используется в светотехнике, производстве электронной техники, при создании ионных двигателей для космической техники, для анестезии и других применений в медицине [3–6].

Криптон также востребован в светотехнике, как компонент газовых смесей для специальной техники.

Существенными источниками инертных радиоактивных газов (ИРГ) Xe и Kr являются также

атомные электростанции (АЭС) и некоторые тепловые электростанции (ТЭС) [7, 8] оснащенные гидрофобными углеродными молекулярно-ситовыми адсорбентами. Использование углеродных адсорбентов для улавливания ксенона и криптона обусловлено значительными различиями начальных дифференциальных мольных теплот адсорбции газов  $q$  на активном угле Т-3 основных компонентов вентиляционных газов: азота (~8.3 кДж/моль), кислорода (~8.0 кДж/моль) [9] и радиоактивных Xe (23.5 кДж/моль), Kr (~15.5 кДж/моль) [10].

Как следует из этого сравнения, теплоты адсорбции Xe и Kr в 2–3 раза превышают теплоты адсорбции азота и кислорода, поэтому сорбционная очистка обедненных газозвушных вентиляционных смесей при малых содержаниях Xe и Kr может быть эффективным методом [11].

Величины теплот адсорбции газов существенно зависят как от химического состава поверхности адсорбента, так и от распределения пор по размерам. В соответствии с Теорией объемного заполнения микропор (ТОЗМ) [12] с ростом объема микропор увеличивается их ширина (радиус)  $x_0$  и падает характеристическая энергия адсорбции  $E$ . Таким образом эффективность этого процесса, его избирательность к компонентам газозвушной смеси сложным образом зависит от

параметров структуры микропористого сорбента – ширины и объема его микропор.

### МОДЕЛЬ

Для оптимизации пористой структуры адсорбента с целью повышения избирательной адсорбции Хе и Кг, на основе ТОЗМ провели моделирование адсорбционной активности на ряде модельных пористых углеродных адсорбентов, обладающих щелевидной микропористой структурой. В расчетах адсорбции использовали термическое уравнение адсорбции Дубинина–Радушкевича (Д–Р) [12]

$$a = a_0(T) \exp\left[-(A/E)^2\right], \quad (1)$$

где  $a$  – адсорбция, как абсолютное содержание адсорбата в микропорах;  $a_0(T) = W_0 \rho_a$  – предельная величина адсорбции паров адсорбата при заданной температуре  $T$  и давлении  $p$  равном давлению насыщенного пара  $p_s$ ;  $W_0$  – удельный объем микропор адсорбента;  $\rho_a$  – плотность адсорбата при температуре опыта при давлении насыщенного пара;  $E = \beta E_0$  – характеристическая энергия адсорбции паров адсорбтива;  $\beta = \Pi/\Pi_0$  – коэффициент аффинности, определяемый как отношение парадоров адсорбтива  $\Pi$  и стандартного пара бензола  $\Pi_0$  при температурах кипения;  $E_0$  – стандартная характеристическая энергия адсорбции по бензолу. В (1)

$$A = RT \ln(p_s/p), \quad (2)$$

дифференциальная мольная работа адсорбции;  $p_s$  – давление насыщенного пара адсорбтива;  $p$  – давление равновесной фазы,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

В ТОЗМ [13] связь между эффективной полушириной (радиусом) микропор  $x_0$  (нм) и характеристической энергией адсорбции стандартного пара бензола  $E_0$  (кДж/моль), определяется уравнением:

$$x_0 = 12/E_0. \quad (3)$$

Из (1) следует, что в изобарно-изотермических условиях на зависимости адсорбции целевого компонента от ширины микропор возникает максимум адсорбционной активности, определяющий оптимальную пористую структуру адсорбента для данного газа. Возникновение максимума обусловлено антибатным влиянием на адсорбцию изменений объема микропор  $W_0$  и характеристической энергии адсорбции  $E$ . Этот прием оптимизации пористой структуры адсорбента с помощью ТОЗМ был использован в [14] при определении параметров структурно-энергетических характеристик энергонасыщенных адсорбционных систем аккумуляции метана.

Для моделирования адсорбции в микропорах углеродных адсорбентов использовали модель щелевидных пор, образующихся при последовательном выгорании слоев гексагонального углерода в процессе активации углеродного адсорбента [15–19].

Толщину стенок микропор адсорбента задавали исходя из трехслойности гексагональных плоскостей углерода, как наиболее технологически реализуем варианте образования пористой структуры в процессе активации [14–16, 19]. В модели углеродного адсорбента для анализа выбрани структуры с выгоранием последовательно одного из семи АУ 1 : 7, двух из восьми АУ 2 : 8 и так далее до семи выгоревших слоев углерода АУ 7 : 13.

Ширину микропор  $X_0 = 2x_0$  ограничивали условием  $X_0 < 3.0–3.2$  нм в соответствии с распределением микропор по размерам, принятом в классификации М.М. Дубинина [12]. В таких микропорах адсорбция газов и паров происходит по механизму объемного заполнения, когда адсорбированные молекулы находятся в потенциальном поле, создаваемом суперпозицией полей противоположных стенок пор.

Структурно-энергетические характеристики (СЭХ) таких адсорбентов, рассчитанных по ТОЗМ (1), представлены в табл. 1.

Исходя из СЭХ модельных адсорбентов (табл. 1), рассчитали по (1) адсорбцию ксенона с целью оценки параметров оптимальной пористой структуры адсорбента с максимальной адсорбционной активностью. Результаты представлены на рис. 1.

На рис. 1 заштрихованная область  $X_0 = 0.8–0.9$  нм соответствует максимуму адсорбционной активности для структуры АУ 2 : 8. Как следует из рис. 1, с ростом давления адсорбция ксенона растет. Адсорбция также растет при малых давлениях до 50 кПа с уменьшением ширины микропор адсорбента  $X_0$  и увеличением характеристической энергии адсорбции  $E$ . Однако, как следует из табл. 1, при этом происходит уменьшение объема микропор. В конечном итоге в изобарных условиях из-за антибатного влияния на адсорбцию объема микропор  $W_0$  и характеристической энергии адсорбции  $E$ , появляется максимум на адсорбционной активности по Хе при ширине  $X_0 \sim 0.8–0.9$  нм. При давлениях выше 100 кПа и  $X_0 < \sim 0.8–0.9$  нм адсорбция ксенона падает. Порам с  $X_0 \sim 0.8–0.9$  нм с максимальной активностью по Хе ближе всего соответствует структура АУ 2 : 8 или (2 : 8).

По (1) отсутствие максимумов адсорбционной активности на изобарных кривых при давлениях  $p < 50$  кПа и малых заполнениях микропор, обусловлено преимущественным вкладом роста характеристической энергии адсорбции.

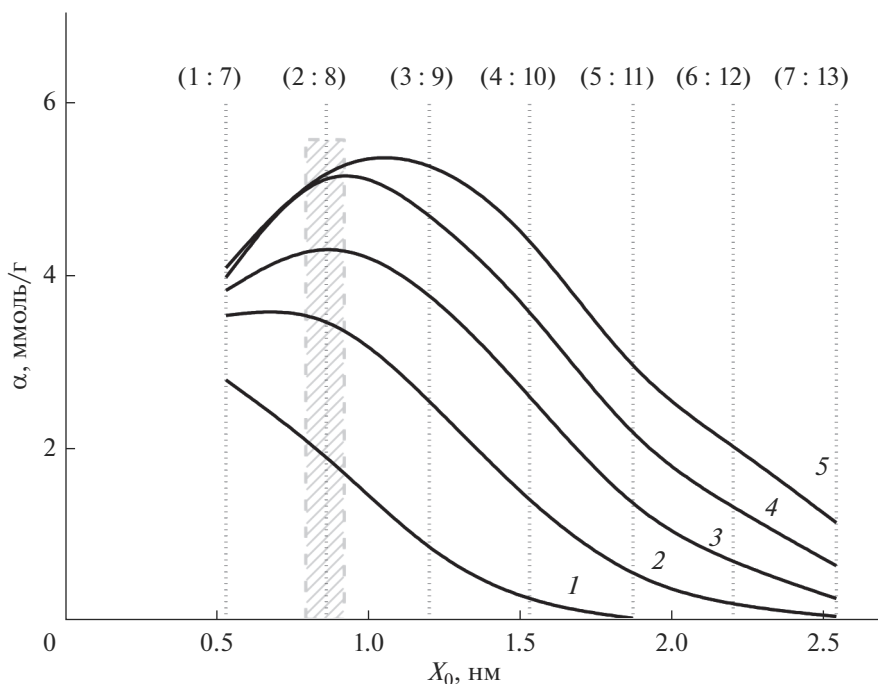
**Таблица 1.** Характеристики пористой структуры модельных адсорбентов с щелевидными микропорами, разделенными трехслойными углеродными стенками

| Структура  | АУ 1 : 7 | АУ 2 : 8 | АУ 3 : 9 | АУ 4 : 10 | АУ 5 : 11 | АУ 6 : 12 | АУ 7 : 13 |
|--|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Эффективная ширина микропор $X_0$ , нм   | 0.53     | 0.86     | 1.20     | 1.53      | 1.87      | 2.20      | 2.54      |
| Удельный объем микропор $W_0$ , см <sup>3</sup> г <sup>-1</sup>                  | 0.23     | 0.38     | 0.52     | 0.67      | 0.82      | 0.96      | 1.11      |
| Характеристическая энергия адсорбции бензола, $E_0$ , кДж моль <sup>-1</sup>     | 45.5     | 27.8     | 20.0     | 15.7      | 12.8      | 10.9      | 9.5       |
| Характеристическая энергия адсорбции ксенона, $E_{Xe}$ , кДж моль <sup>-1</sup>  | 20.47    | 12.51    | 9.00     | 7.06      | 5.76      | 4.90      | 4.27      |
| Характеристическая энергия адсорбции криптона, $E_{Kr}$ , кДж моль <sup>-1</sup> | 15.47    | 9.45     | 6.80     | 5.34      | 4.35      | 3.71      | 3.23      |
| Плотность адсорбента с микропорами, $\rho_{ад}$ , г см <sup>-3</sup>             | 1.515    | 1.137    | 0.909    | 0.758     | 0.649     | 0.568     | 0.505     |

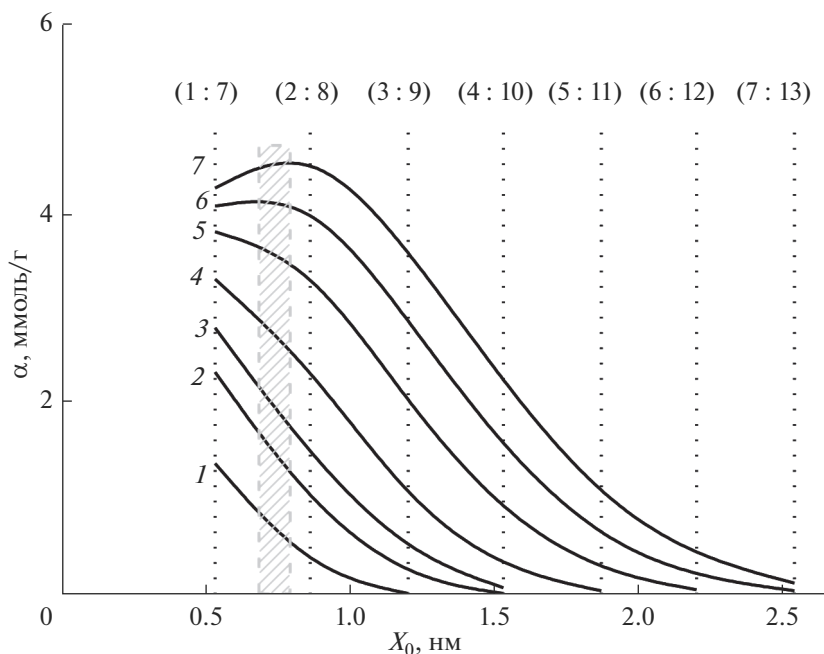
Аналогичные расчеты для адсорбции Кг представлены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, в начальной области давлений  $p < 400$  кПа и заполнения микропор, адсорбция Кг, как и Хе, растет с уменьшением ширины микропор адсорбента  $X_0$  и увеличением харак-

теристической энергии адсорбции  $E$ . Максимум адсорбционной активности в изобарных условиях проявляется при значительно больших давлениях, чем для Хе, выше 600 кПа. Эффективная ширина микропор для адсорбции Кг составляет около  $X_0 \sim 0.7-0.8$  нм. Она несколько меньше та-



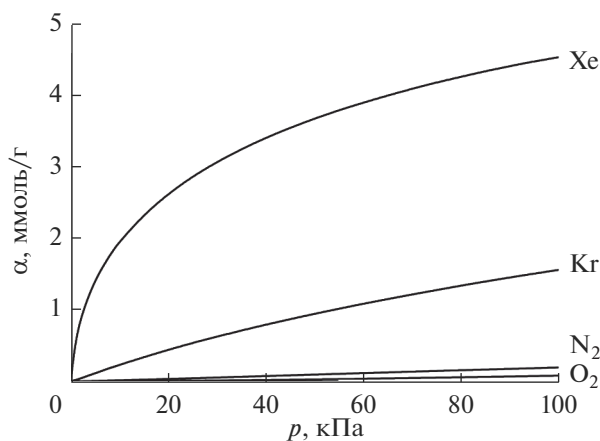
**Рис. 1.** Зависимость адсорбции ( $\alpha$ ) Хе на модельных микропористых углеродных адсорбентах с трехслойными гексагональными стенками от ширины микропор ( $X_0$ ) при температуре  $T = 293$  К и давлениях  $p$ , кПа: 1 – 10; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 150; 5 – 200. Пунктирами отмечены значения, относящиеся к модельным структурам, указанным в табл. 1.



**Рис. 2.** Зависимость адсорбции ( $\alpha$ ) Кг на модельных микропористых углеродных адсорбентах с трехслойной углеродной стенкой от ширины микропор ( $X_0$ ) при температуре  $T = 293$  К и давлениях,  $p$ , кПа: 1 – 10; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 400; 6 – 600; 7 – 800. Пунктирами отмечены значения, относящиеся к модельным структурам, указанным в табл. 1.

ковой для Хе. Это означает, что для эффективно-го выделения Хе и Кг из обедненной газовой смеси может быть использован единый адсорбент с пористой структурой АУ 2 : 8.

Отсутствие максимумов адсорбционной активности по Кг на изобарных кривых при малых давлениях и заполнениях микропор обусловлено, в основном существенным влиянием характеристической энергии адсорбции Кг и слабой зависимостью адсорбции от объема микропор адсорбента.



**Рис. 3.** Зависимость адсорбции Хе, Кг,  $N_2$  и  $O_2$  на модельной структуре АУ 2 : 8 с трехслойными углеродными стенками от давления,  $p$ , при температуре  $T = 293$  К. Расчет по ТОЗМ.

Отмеченные выше факты для адсорбции Хе и Кг на модельной структуре микропористого углеродного адсорбента с щелевидными микропорами АУ 2 : 8, приводят к различию в поведении их изотерм адсорбции.

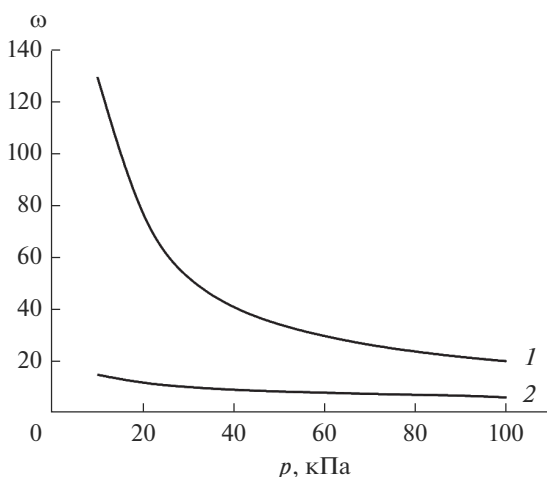
Как следует из рис. 3, адсорбция Хе и Кг на адсорбенте со структурой АУ 2 : 8 значительно выше адсорбции  $N_2$  и  $O_2$ . Кроме того, относительная адсорбционная активность Хе/ $N_2$  и Кг/ $N_2$  возрастает по мере понижения давления (рис. 4).

Как следует из рис. 4 относительная адсорбционная активность  $\omega_{(Хе/Н_2)}$  возрастает с понижением давления и достигает 130 при  $p < 5$  кПа. Поскольку время жизни молекул в адсорбированном состоянии зависит от теплоты адсорбции [20], то при адсорбции Хе и Кг время удерживания радиоактивных молекул Хе в микропорах адсорбента будет существенно больше по сравнению с временем удерживания молекул Кг, что очень важно для работы СГО атомного реактора. Время полураспада изотопов Хе в несколько раз выше времени полураспада изотопов Кг, поэтому цикл очистки газовой смеси системой СГО атомного реактора определяется в основном адсорбцией и временем полураспада изотопов Хе.

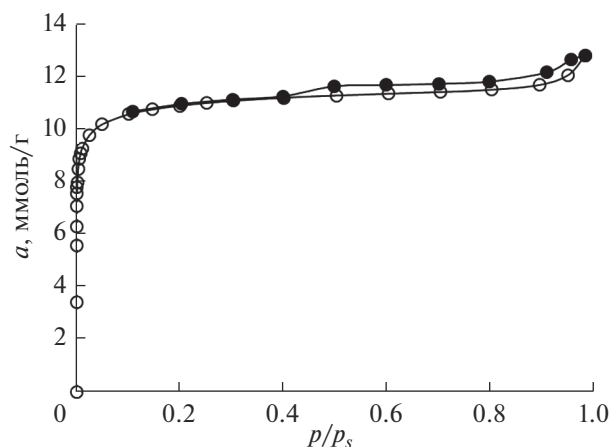
## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ: АДСОРБЕНТ

### Структура

Для проверки проведенных расчетов, провели исследование микропористого углеродного адсорбента Т-3 со структурными характеристиками,



**Рис. 4.** Зависимость относительной адсорбционной активности ( $\omega$ ) Xe/N<sub>2</sub> и Kr/N<sub>2</sub> от давления  $p$  при температуре 293 К на модельной структуре АУ 2 : 8 –  $\omega_{(Xe/N_2)} = a_{Xe}/a_{N_2}$  (1);  $\omega_{(Kr/N_2)} = a_{Kr}/a_{N_2}$  (2).



**Рис. 5.** Изотерма адсорбции-десорбции азота при 77 К на микропористом углеродном адсорбенте Т-3. Светлые значки – адсорбция, затемненные значки – десорбция.  $p$  – равновесное давление;  $p_s$  – давление насыщенного пара азота при температуре эксперимента.

близкими к модельной структуре АУ 2 : 8. Адсорбент Т-3 синтезирован на основе торфа методом термохимической активации сернистым калием при температуре 900°С.

Для расчета СЭХ использовали изотерму адсорбции–десорбции паров азота при 77 К, полученную на установке *Autosorb-iQ* (Quantachrome Instr., США).

Расчет структурно-энергетических характеристик (СЭХ) адсорбентов проводили с помощью Теории объемного заполнения микропор М.М. Дубинина (ТОЗМ) [21], а также с применением уравнения БЭТ [22] и Кельвина [23].

Расчет распределения объема микропор по размерам проводили методом нелинейного функционала плотности (NLDFT) для щелевидной модели микропор. Результаты представлены на рис. 6.

Как следует из рис. 6, на кривой зависимости объема микропор  $W_0$  от ширины микропор  $D$  (растущая кривая) явно выделяется область изме-

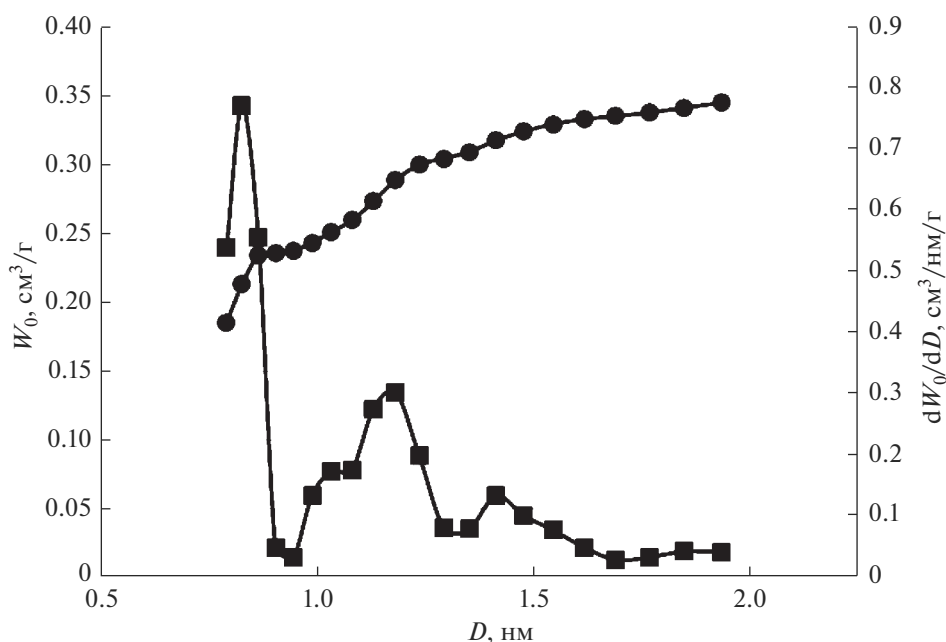
нения кривизны, связанная с особенностями пористой структуры адсорбента. На кривой распределения пор по размерам ( $dW_0/dD = f(D)$ ) наблюдаются два максимума, основной при  $D = 0.7$  нм и слабо выраженный при  $D = 1.2$  нм. Усреднение распределения объема пор по размерам  $\langle D \rangle = 0.95$  нм позволяет сделать вывод о близости полученной оценки к значению ширины микропор, полученному по ТОЗМ в табл. 2.

*Морфология и химический состав*

Морфологию и химический состав поверхности активного угля Т-3 определяли методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью микроскопа *Quanta 650 FEG* (FEI, США), оснащенного датчиком EDX. Характерная морфология поверхности активного угля Т-3 представлена на рис. 7.

**Таблица 2.** Структурно-энергетические характеристики микропористого углеродного адсорбента Т-3

| Параметр  | Значение |
|---|----------|
| Объем микропор, $W_0$ , см <sup>3</sup> /г                                    | 0.36     |
| Стандартная характеристическая энергия адсорбции по бензолу, $E_0$ , кДж/моль | 25.5     |
| Эффективная ширина микропор $X_0$ , нм  | 0.94     |
| Удельная поверхность по БЭТ, $S_{БЭТ}$ , м <sup>2</sup> /г                    | 900      |
| Объем пор, $W_s$ , см <sup>3</sup> /г   | 0.44     |
| Поверхность мезопор, $S_{ме}$ , м <sup>2</sup> /г                             | 28.0     |
| Удельный объем мезопор, $W_{ме}$ , см <sup>3</sup> /г                         | 0.08     |



**Рис. 6.** Зависимость удельного объема микропор  $W_0$  (кружки) и распределение пор по размерам  $dW_0/dD$  (квадраты) от ширины  $D$  микропор для адсорбента Т-3. Расчет по методу NLDFT.

Как следует из рис. 7, поверхность активного угля Т-3 представлена неупорядоченными углеродными фрагментами с размерами 0.1–10 мкм.

Атомный состав поверхности активного угля Т-3 усредненный по 5 измерениям, представлен в табл. 3.

Как следует из табл. 3 активный уголь Т-3 состоит в основном из углерода С ~ 81.6 ат. % и не-

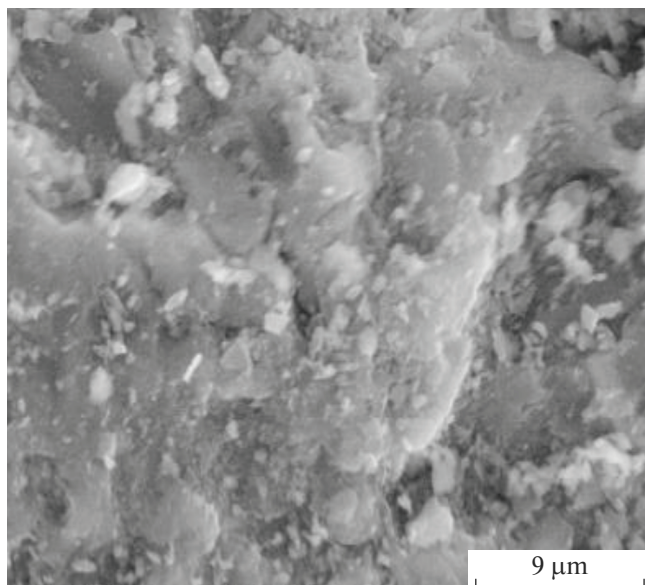
больших примесей: О ~ 13.2 ат. %; Si ~ 1.6 ат. %; S ~ 1.08; Fe ~ 0.84 ат. %; Ca ~ 0.59 ат. % и др. Это означает, что адсорбционное взаимодействие компонентов газовой смеси в основном определяется взаимодействием с углеродом поверхности адсорбента.

#### Фазовый состав

Измерения проводили с использованием рентгеновского порошкового дифрактометра *Empyrean Panalytical* в области углов рассеяния  $2\theta$  от  $10^\circ$  до  $120^\circ$ . Перед измерением исследуемые образцы истирали в порошок и укладывали на пластину, которую затем устанавливали на столик дифрактометра. Съемку проводили с применением геометрии фокусировки Брэгг–Брентано и использованием фильтрованного Ni–Cu $K_\alpha$ -излучения ( $\lambda_{Cu} = 0.1542$  нм). Качественный анализ образцов производили по характерным рефлексам гексагонального графита – (002), (100), (101) и (110).

На рис. 8 представлена дифрактограмма адсорбента Т-3. Здесь же указаны линии (002), (100), (101), (110) гексагонального графита.

Дифрактограмма адсорбента Т-3 содержит довольно четкий, но более диффузный по сравнению с графитом рефлекс (002), смещенный к меньшим углам  $2\theta = 22$ , а также хорошо выраженные двумерные рефлексы (10) и (11), соответствующие линиям графита (100) и (110). Кроме рефлексов, относящихся к графитовым отражени-



**Рис. 7.** Морфология поверхности активного угля Т-3. Планка размерности – 9 мкм.



ям, виден ряд посторонних линий, среди которых можно выделить очень интенсивные рефлексы графита и, вероятно, SiO<sub>2</sub>, что соответствует элементному составу (табл. 3). Возрастание фона к малым углам указывает на наличие крупных неоднородностей и аморфного углерода. Присутствие на дифрактограмме рефлексов (002), (10) и (11) характерно для графитоподобных турбостратных структур углеродных адсорбентов, особенностью которых является наличие упорядоченного расположения атомов в плоскости графитовых слоев, составляющих кристаллы, и наличие порядка в чередовании слоев при отсутствии их взаимной ориентации [17].

Поэтому использование модели щелевидных микропор для расчетов адсорбции по ТОЗМ является правомерным и адекватным.

*Адсорбция Xe, Kr, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> на активном угле Т-3*

Адсорбцию газов измеряли гравиметрическим методом [24], как полное содержание вещества в микропорах. Поправку на Архимедову силу вводили с использованием объема адсорбента с микропорами, определяемого как сумму объемов, «скелета» адсорбента, определенного калибровкой по гелию и объема микропор по ТОЗМ.

Результаты измерений адсорбции Xe, Kr, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> на микропористом активном угле Т-3 при 293 К представлены на рис. 9.

**Таблица 3.** Элементный химический состав поверхности пробы углеродного адсорбента Т-3

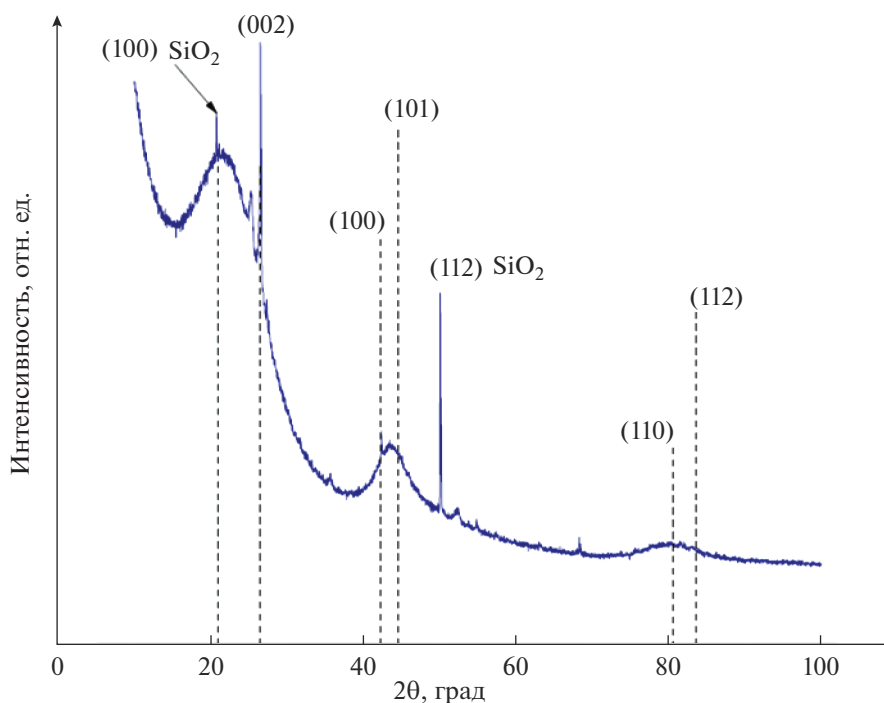
| Элемент | ат. % | вес. % |
|---------|-------|--------|
| C       | 81.6  | 71.3   |
| O       | 13.2  | 15.4   |
| Si      | 1.60  | 3.28   |
| S       | 1.08  | 2.53   |
| Fe      | 0.84  | 3.43   |
| Ca      | 0.59  | 1.71   |
| Al      | 0.41  | 0.80   |
| Mg      | 0.24  | 0.43   |
| K       | 0.22  | 0.62   |
| Cl      | 0.15  | 0.39   |

Как следует из рис. 9, адсорбция ксенона значительно превышает адсорбцию криптона и основных компонентов воздуха, азота и кислорода.

По [12] время жизни молекулы в адсорбированном состоянии  $\tau$  может быть определено таким образом

$$\tau = \tau_0 \exp[q/(RT)], \tag{4}$$

где  $\tau_0$  – период колебания адсорбированной молекулы на поверхности;  $q$  – дифференциальная теплота адсорбции.



**Рис. 8.** Дифрактограмма углеродного адсорбента Т-3. Пунктирные линии – рефлексы графита – (002), (100), (101), (110).

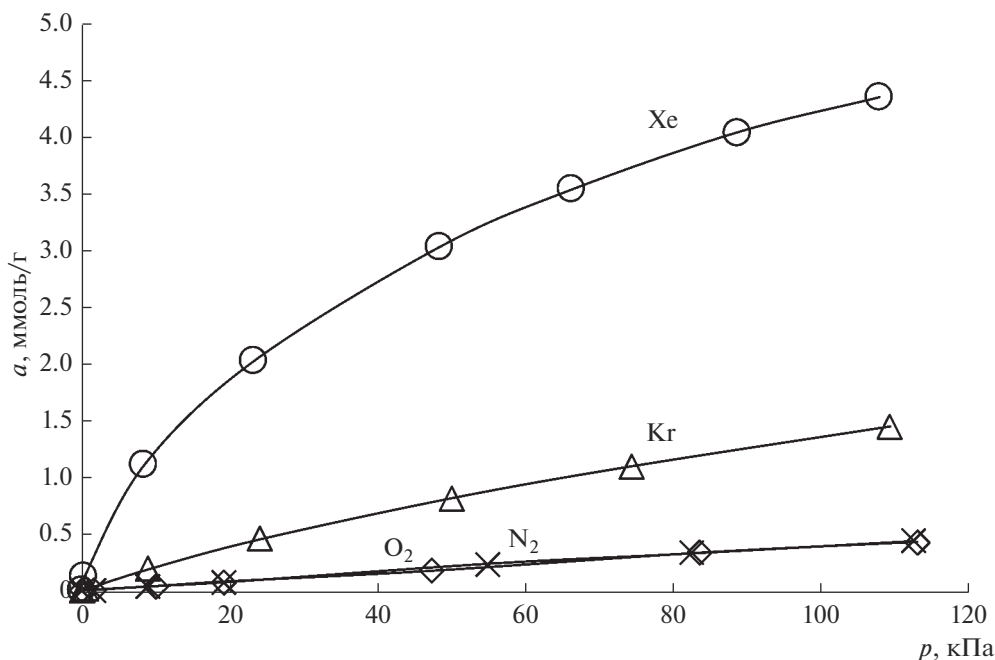


Рис. 9. Зависимость адсорбции Xe, Kr, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> на микропористом углеродном адсорбенте Т-3 при температуре 293 К от давления,  $p$ , кПа.

Таблица 4. Начальные дифференциальные молярные теплоты адсорбции газов на активном угле Т-3

| Газ            | $q$ , кДж/моль | Системы сравнения | $\Delta q$ , кДж/моль | $\ln(\tau_{\text{Xe}}/\tau_{\text{Kr}, \dots, \text{N}_2, \text{O}_2})$ |
|----------------|----------------|-------------------|-----------------------|---|
| Xe             | 23.5           | —                 | —                     | —   |
| Kr             | 15.5           | Xe/Kr             | 8.0                   | 3.29  |
| N <sub>2</sub> | 8.3            | Xe/N <sub>2</sub> | 15.2                  | 6.24  |
| O <sub>2</sub> | 8.0            | Xe/O <sub>2</sub> | 15.5                  | 6.37  |

При малых заполнениях микропор,  $\tau_0$  исследуемых газов Xe, Kr, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> близки и кинетика адсорбции каждого газа в основном определяется дифференциальной теплотой адсорбции  $q$  (табл. 4). Из (4) следует, что для пары, например (Xe/Kr), различие теплот адсорбции  $\Delta q$  определяется

$$(q_{\text{Xe}} - q_{\text{Kr}}) = \Delta q \approx RT \ln(\tau_{\text{Xe}}/\tau_{\text{Kr}}). \quad (5)$$

Отношения времен жизни молекул ксенона и криптона  $\ln(\tau_{\text{Xe}}/\tau_{\text{Kr}})$  и молекул, соответственно Xe/N<sub>2</sub>, Xe/O<sub>2</sub> приведены в табл. 4.

Как следует из табл. 4, дифференциальные теплоты адсорбции ксенона и криптона на микропористом углеродном адсорбенте Т-3 примерно в 2–3 раза превышают теплоты адсорбции азота и кислорода. Существенно, также различаются времена жизни в адсорбированном состоянии молекул Xe, Kr и N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, что позволяет использо-

вать микропористый углеродный адсорбент Т-3 для эффективной очистки обедненных газоздушных смесей АЭС от инертных радиоактивных газов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sergeeva M.S., Mokhnachev N.A., Shablykin D.N. et al.* // J. Natural Gas Science and Engineering. 2021. V. 86. № 2. P. 103740.
2. *Bennet G.A., Manuel O.K.* // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1970. V. 34. P. 593–610.
3. *Школин А.В., Фомкин А.А., Потапов С.В.* // Химическая технология. 2013. Т. 14. № 9. С. 528–535.
4. *Буров Н.Е., Потапов В.Н., Макеев Г.Н.* Ксенон в анестезиологии. М.: Пульс, 2000. 291 с.
5. Ксенон и инертные газы в отечественной медицине: Матер. второй конф. анестезиол.-реаниматол.



- мед. учрежд. МО РФ. М.: ГВКР им. Н.Н. Бурденко, 2010. 296 с.
6. Ксенон и инертные газы в отечественной медицине: Матер. третьей конф. анестезиол.-реаниматол. мед. учрежд. МО РФ. М.: ГВКР им. Н.Н. Бурденко, 2012. 136 с.
  7. Гордиенко В.А., Брыкин С.Н., Кузин Р.Е. и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2012. № 1. С. 123–130.
  8. Очкин Д.В., Алешин А.А., Казаков В.В. // Атомная энергия. 1982. Т. 52. Вып. 5. С. 350–351.
  9. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1976. 512 с.
  10. Кузнецова Т.А., Толмачев А.М., Крюченкова Н.Г. и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2013. Т. 49. № 4. С. 339–344.
  11. Очкин Д.В., Алешин А.А., Казаков В.В., Голиков И.В. О применении активированного угля СКТ-3С для радиохроматографической очистки газообразных радиоактивных отходов. Препринт П-1(36). М.: ЦНИИАтоминформ. 1984. С. 21.
  12. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость. М.: Изд. ВАНЗ. 1972. 127 С.
  13. Dubinin M.M., Stoeskli H.F. // J. Colloid Interface Sci., 1980. V. 75. P. 34.
  14. Меньщиков И.Е., Фомкин А.А., Школин А.В. и др. // Известия Академии наук. Серия химическая. 2018. Т. 67. № 10. С. 1814–1822.
  15. Яковлев В.Ю., Школин А.В., Фомкин А.А. и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2021. Т. 57. № 6. С. 563–567.
  16. Яковлев В.Ю., Школин А.В., Фомкин А.А., Меньщиков И.Е. // Журн. физической химии. 2018. Т. 92. № 3. С. 444–450.
  17. Дубинин М.М. Микропористые системы углеродных адсорбентов. В Сб. Углеродные адсорбенты и их применение в промышленности. М.: Наука. 1983. С. 100–115.
  18. Фенелонов В.Б. Пористый углерод. Новосибирск.: ИК СО РАН. 1995. 513 с.
  19. Яковлев В.Ю., Фомкин А.А. // Коллоидный журн. 2009. Т. 71. № 6. С. 860–864.
  20. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука. 1975. 592 с.
  21. Dubinin M.M. // Progress in Surface Membrane Science. 1975. V. 9. P. 1–70.
  22. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. // J. Am. Chem. Soc. 1938. V. 60. № 2. P. 309–319.
  23. Lowell S., Shields J.E., Thomas M.A., Thommes M. Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density. Dordrecht/Boston/London.: Kluwer Academic Publishers. 2004. P. 101.
  24. Школин А.В., Фомкин А.А. // Измерительная техника. 2018. № 4, С. 56–61.
  25. Frenkel J. // Z. Phys. Chem. 1924. V. 26. P. 117.