

УДК 661.183

*Д. А. Курносков, Е. А. Нескоромная, А. В. Бабкин,  
Э. С. Мкртчян, А. Е. Бураков\**

**КОМПОЗИЦИОННЫЙ АЭРОГЕЛЬ  
НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО  
НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА,  
ДЛЯ ЖИДКОФАЗНОЙ СОРБЦИИ  
ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛЛЮТАНТОВ**

Загрязнение окружающей среды промышленными предприятиями достигло угрожающего уровня. Сточные воды являются одним из основных источников экологических проблем. Существует множество

---

\* Работа выполнена под руководством канд. техн. наук, доц. ФГБОУ ВО «ПГТУ» И. В. Бураковой.

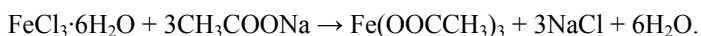
методов очистки водных сред от загрязнителей, однако наиболее эффективным является процесс сорбции. Наряду с традиционными сорбентами (активированный уголь, глина) широкую известность получили и наносорбенты: углеродные нанотрубки (УНТ) и графены.

Одним из возможных способов улучшения сорбционных характеристик поглотителей является модифицирование их поверхности веществами различной химической природы. Так, частицы оксидов и гидроксидов железа обладают способностью извлекать органические загрязнители.

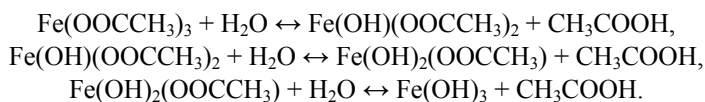
Вместе с тем, гидротермальные и сверхкритические методы обработки материалов, направленные на получение аэрогелей, позволяют получить каркасные наноструктуры с высокими показателями удельной поверхности.

Авторами разработана методика синтеза аэрогеля на основе графена, модифицированного наночастицами оксидов железа, являющегося высокоэффективным сорбционным материалом для удаления органических поллютантов из водных растворов.

Первым этапом синтеза модифицированного аэрогеля является получение графенового гидрогеля. Для этого суспензию оксида графена (ОГ) подвергают ультразвуковой обработке, а затем смешивают с раствором ацетата железа ( $\text{Fe}(\text{CH}_3\text{COO})_3$ ), который получают в результате химического взаимодействия хлорида железа (III) 6-водного ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) и ацетата натрия ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) в водной среде [1].



Далее следует трехступенчатый процесс гидролиза ацетата железа в воде с образованием уксусной кислоты ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ).



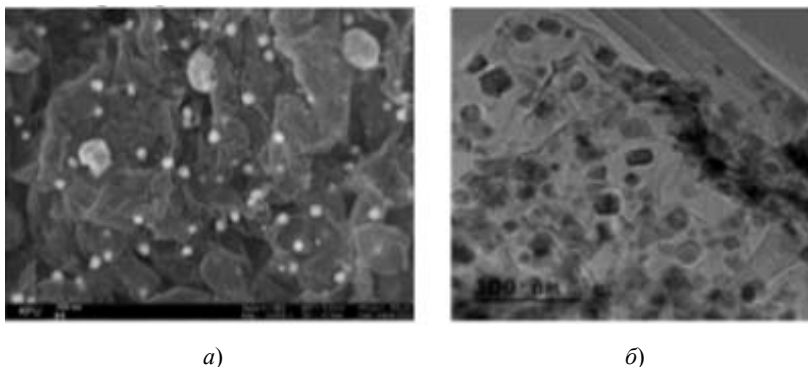
Образовавшийся густой гель перемешивают при постоянном нагреве, образовавшуюся в процессе реакции уксусную кислоту ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) нейтрализуют едким натром ( $\text{NaOH}$ ), а оксид графена восстанавливают до графена аскорбиновой кислотой ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ). В итоге, получают гидрогель графена, модифицированный гидроксидом железа.

Вторым этапом синтеза является замещение воды в структуре гидрогеля изопропиловым спиртом. Для этого в стакан помещают кар-

бонат калия ( $K_2CO_3$ ), заливают изопропиловым спиртом и опускают образец получаемого материала в стакан. В результате взаимодействия карбоната калия и воды образуется устойчивый гидрат [2], а пористое пространство образца гидрогеля заполняется изопропиловым спиртом и образуется алкоголь.

Заключительный этап синтеза аэрогеля заключается в сверхкритической обработке полученного алкоголя. Для этого алкогольный материал помещают в реактор высокого давления, заливают изопропиловым спиртом и создают в реакционной зоне условия для перехода изопропанола в сверхкритический флюид (для изопропилового спирта температура  $\geq 235,3$  °С и давление  $\geq 4,76$  МПа) [3]. После достижения необходимых сверхкритических условий, материал выдерживают в течение определенного времени (4...8 часов). В итоге получают графеновый аэрогель, модифицированный наночастицами оксидов железа.

На рисунке 1 представлены изображения полученного графенового аэрогеля, модифицированного наночастицами оксидов железа.



**Рис. 1. Изображения полученного графенового аэрогеля, модифицированного наночастицами оксидов железа:**  
а – СЭМ; б – ПЭМ изображение полученного графенового аэрогеля

Сорбционную эффективность синтезированного графенового аэрогеля проверяли в процессах извлечения из водных растворов органических красителей: метиленового синего (МС) и метилового оранжевого (МО). Для этого навели буферные растворы МС и МО ( $pH = 2$ ) [4] с начальными концентрациями 1500 и 150 мг/л соответственно.

Для определения кинетических параметров адсорбции через ячейку с навеской аэрогеля  $m = 0,01$  г пропускали раствор МО и МС. Через определенные промежутки времени (3 мин) измерялась оптическая плотность раствора с помощью спектрофотометра ПЭ-5400В при длине волны  $\lambda = 439$  нм (МО) и 835 нм (МС), которая затем пересчитывалась по градуировочному уравнению в значения концентрации.

На рисунках 2, 3 представлены кинетические кривые адсорбции МС и МО исследуемым материалом.

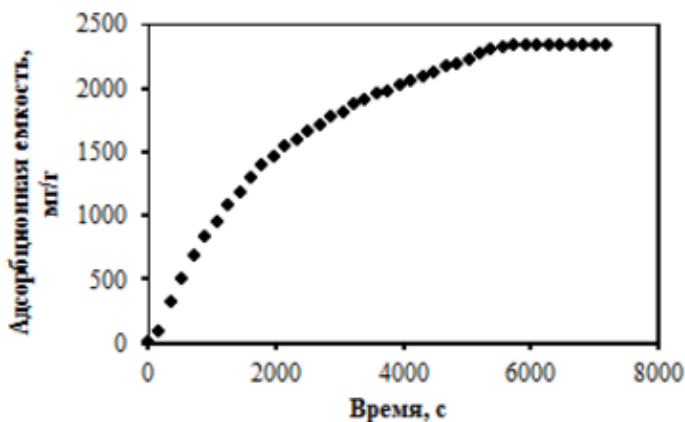


Рис. 2. Кинетическая кривая сорбции молекул МС

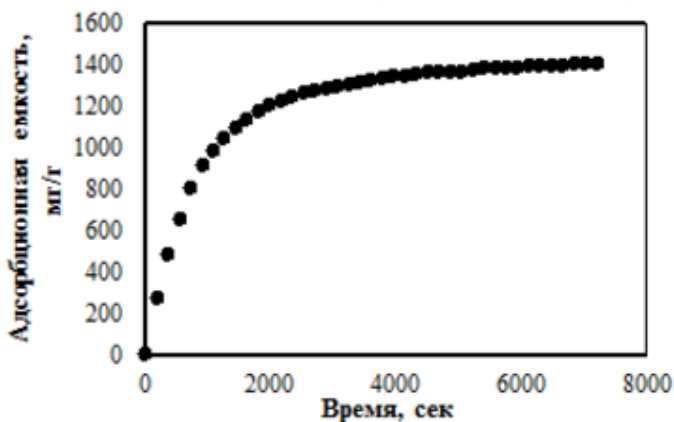


Рис. 3. Кинетическая кривая сорбции молекул МО

Адсорбционную емкость поглотителя оценивали по формуле, (мг/г):

$$A = (C_n - C_p)Vm,$$

где  $V$  – объем раствора индикатора, л;  $m$  – масса сорбента, г;  $C_n$  – концентрация исходного раствора МО, мг/л;  $C_p$  – равновесная концентрация, мг/л.

В рамках представленного исследования разработана методика синтеза композиционного аэрогеля на основе графена, модифицированного наночастицами оксидов железа. С помощью аналитических методов характеризации физико-химических свойств материала (СЭМ, ПЭМ) установлено, что наночастицы железа равномерно распределены по поверхности графеновых слоев, а их средний размер составляет 10...20 нм.

Анализируя кинетические зависимости, полученные в ходе адсорбционных исследований материала, можно отметить, что полученный композиционный аэрогель является высокоэффективным сорбентом, который можно использовать для тонкой очистки водных растворов от органических поллютантов. Установлено, что адсорбционная емкость при извлечении молекул МС составляет ~2300 мг/г при начальной концентрации 1500 мг/л; для молекул МО ~1400 мг/г при начальной концентрации 150 мг/л.

### Список литературы

1. Некрасов, В. В. Руководство к малому практикуму по органической химии / В. В. Некрасов. – М. : Химия, 1964. – 384 с.
2. Гордон, А. Спутник химика. Физико-химические свойства, методика, библиография / А. Гордон, Р. Форд. ; пер. с англ. Е. Л. Розенберга, С. И. Коппель. – М. : Мир, 1976. – 541 с.
3. Буслаева, Е. Ю. Сверхкритический изопропанол как реагент в органической, металлоорганической, неорганической химии и нанотехнологии / Е. Ю. Буслаева // РЭНСИТ. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 38 – 49.
4. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1991. – 432 с.

*Кафедра «Техника и технологии производства  
нанопродуктов» ФГБОУ ВО «ТГТУ»*