

## СТРУКТУРИРОВАННЫЕ АКРИЛОНИТРИЛОМ ТРОЙНЫЕ СООЛИГОМЕРЫ 4-ИЗОПРОПЕНИЛФЕНОЛА, ФЕНОЛА И ФОРМАЛЬДЕГИДА В КАЧЕСТВЕ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УРАНИЛ-ИОНОВ ИЗ ВОДНЫХ СИСТЕМ

© М. Р. Байрамов<sup>1</sup>, Г. М. Мехтиева<sup>1,\*</sup>, Дж. А. Нагиев<sup>2</sup>, Ш. Дж. Гулиева<sup>1</sup>,  
М. А. Агаева<sup>1</sup>, А. М. Магеррамов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Бакинский государственный университет,  
AZ 1148, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. З. Халилова, д. 23

<sup>2</sup> ЗАО «Национальный ядерный исследовательский центр»,  
AZ 1073, Азербайджанская Республика, г. Баку, поселок Гобу

\* E-mail: mehdiyeva\_gm@mail.ru

Поступила в Редакцию 22 июля 2022 г.

После доработки 4 ноября 2023 г.

Принята к публикации 4 ноября 2023 г.

*Синтезированы и впервые использованы в качестве прекурсоров в реакции структурирования в присутствии акрилонитрила и инициатора бензоилпероксида тройные сополимеры 4-изопропенилфенола, фенола и формальдегида. Выход сшитых сополимеров 84% (от теор.). Показано, что использование гидролизированных сшитых сополимеров эффективно в качестве сорбентов при извлечении  $UO_2^{2+}$ -ионов из модельных водных систем в статических условиях, а степень их сорбции существенно зависит от pH среды, начальной концентрации  $UO_2^{2+}$ -ионов и времени выдержки. Наилучшие результаты достигнуты при pH 7 и 9, при которых степень извлечения  $UO_2^{2+}$ -ионов из водного раствора с начальной их концентрацией  $134 \pm 0.5$  мг·л<sup>-1</sup> составляет ~93.5% (комнатная температура, 24 ч), при этом сорбционная емкость сшитого сополимера составляет ~210 мг·г<sup>-1</sup>. Наивысшая же сорбционная емкость сополимера достигает  $300 \pm 30$  мг·г<sup>-1</sup>. Выявлена возможность регенерации сорбента минеральной кислотой ( $HNO_3$ ,  $HCl$ ); максимальная степень десорбции  $UO_2^{2+}$ -ионов составляет ~91%.*

Ключевые слова: фенолформальдегидные смолы; 4-изопропенилфенол; акрилонитрил; сорбция; уранил-ионы

DOI: 10.31857/S0044461823040084; EDN: OFYMXG

Функциональнозамещенные фенолы и продукты их превращений находят разнообразное применение в технике в качестве антиоксидантов смазочных масел, топлив, полимерных материалов, лекарственных препаратов, ингибиторов коррозии металлов и др. [1–4]. Важное место среди них занимают модифицированные фенолформальдегидные сополимеры, в частности их реакционноспособные аллилированные и пропаргилированные производные, которые можно вводить в различные композиции с целью улучшения физико-химических и эксплуатационных свойств материалов сшитой структуры, полученных на их основе [5]. В качестве отвердителей в процессах структурирования сополимеров используются различные

соединения, например уротропин, трибутилфосфат, трикрезилфосфат и стеарат меди [6].

В последние 10–15 лет полимерные соединения сшитой структуры, а также их композиции с неорганическими соединениями часто используют в качестве сорбционных материалов различного назначения [7–9]. В частности, в работе [10] приводятся результаты исследований по использованию композиционного материала, состоящего из силиката бария (активного компонента) и резорцино-формальдегидной смолы (связующего), в качестве селективного сорбента для очистки морской воды от радионуклидов цезия и стронция.

С этой точки зрения интерес в качестве прекурсоров представляют ненасыщенные сополимеры

фенолформальдегидного типа [11, 12], которые можно структурировать термически в присутствии инициаторов и доступных промышленных мономеров. Структурные особенности фенолформальдегидных сополимеров, используемых в качестве основ для получения сорбентов, также оказывают влияние на их кислотно-основные свойства [13], от которых в значительной степени зависит их поведение по отношению к тем или иным ионам.

Важно отметить, что химия полимеров и сополимеров, содержащих в своих структурах фрагменты с нитрильными группами, успешно развивается [14]. Например, двойные сополимеры акрилонитрила с акриловой кислотой, содержащие карбоксильные и другие группы, обладают, как известно, высокими сорбционными свойствами по отношению к уранил-ионам и ионам тяжелых металлов [15–17].

Цель работы — синтез новых, структурированных акрилонитрилом, сополимеров на основе тройных сополимеров 4-изопропенилфенола, фенола и формальдегида и исследование их продуктов гидролиза в качестве сорбентов для извлечения  $UO_2^{2+}$ -ионов из модельных водных систем.

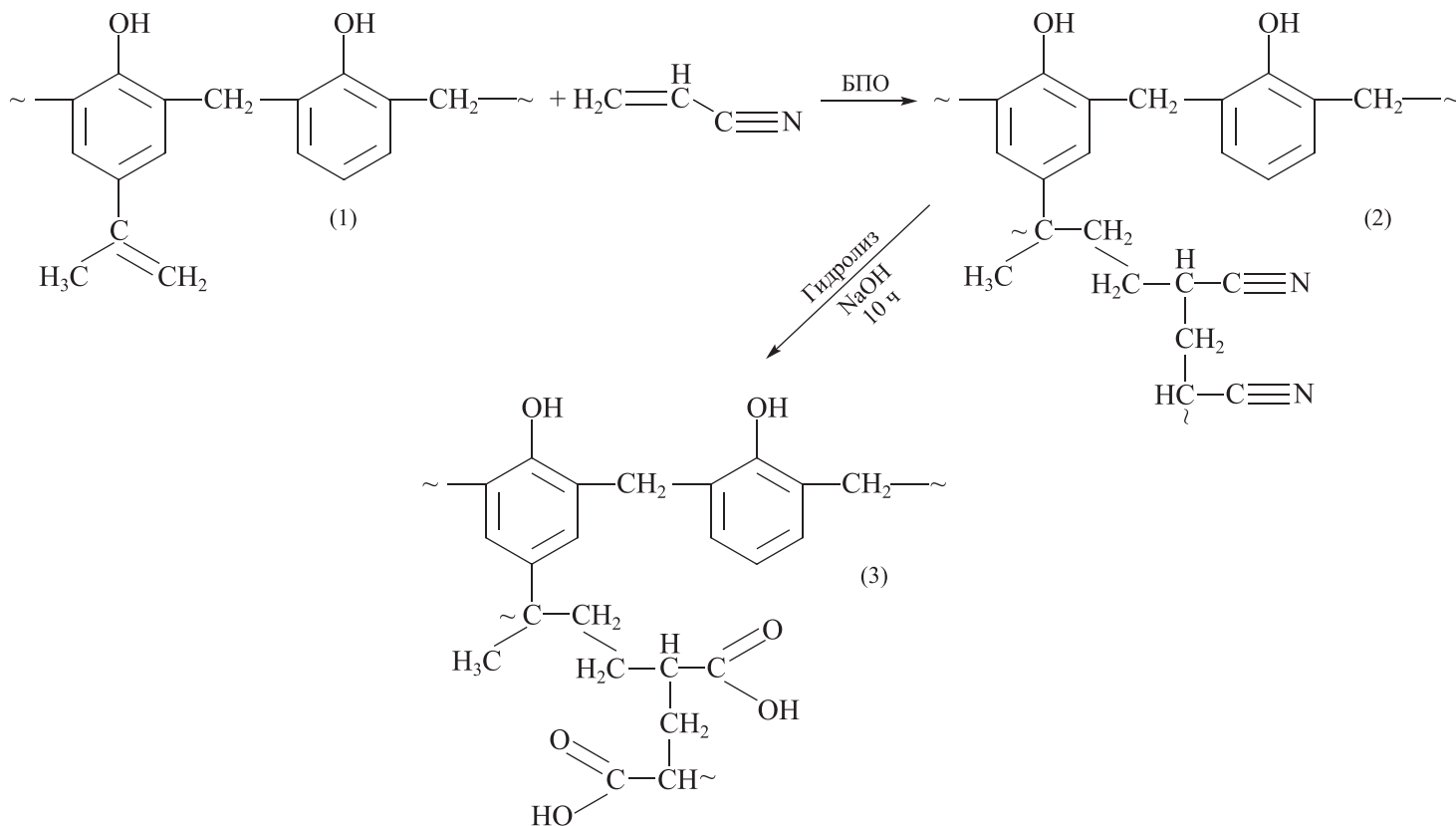
## Экспериментальная часть

Использованные в работе в качестве прекурсоров тройные сополимеры синтезированы тройной каталитической поликонденсацией фенола, 4-изопропенилфенола и формальдегида (37%-ный водный раствор, ЗАО «Вектон») при их соотношении 1:1:2 (мол.), температуре  $90^\circ\text{C}$ , в присутствии катализатора ацетата цинка (5% на смесь) [11, 12]. Выход сополимеров за 3 ч составляет 92% (от теор.).

Фенол и 4-изопропенилфенол получены каталитическим крекингом бисфенола А (чистота 99%, кат. номер 80-05-7, Sigma-Aldrich) [18].

*Структурирование тройных сополимеров.* Структурирование тройных сополимеров проводили в присутствии акрилонитрила и инициатора бензоилпероксида (БПО) (см. схему). В предварительно подготовленные стеклянные ампулы загружали рассчитанные количества сополимера, акрилонитрила (ч.д.а., ЗАО «Вектон») и БПО (ч.д.а., ЗАО «Вектон») (0.5% на смесь реагентов). Соотношение сополимеры:акрилонитрил = 1:1 (мол.) (на кратную связь). Ампулу охлаждали сухим льдом, откачивали и запаивали в токе азота, переносили в термостат,

Структурирование тройного сополимера (1) акрилонитрилом и гидролиз полученного сополимера (2) с образованием сшитого сополимера (3)



где выдерживали в течение 7–8 ч при температуре 80–85°C. После завершения процесса структурирования содержимое ампулы переносили в круглодонную колбу и осуществляли экстракцию растворимой части кипящим ацетоном в аппарате Сокслета. Сшитую часть (целевой продукт) отделяли и сушили в вакуумном сушильном шкафу при 45–50°C. Выход 84%.

**Гидролиз структурированных соолигомеров.** Гидролиз структурированных соолигомеров (2) осуществляли в присутствии водного раствора гидроксида натрия кипячением в течение 10 ч; полученный продукт сушили под глубоким вакуумом (см. схему).

Одним из наиболее приемлемых методов определения функциональных групп сополимеров является ИК-спектроскопия, поэтому преследовалась цель исследовать структуру сополимеров до и после гидролиза. ИК-спектры сополимеров до [сополимер (2)] и после [сополимер (3)] гидролиза зарегистрированы на ИК-Фурье-спектрофотометре марки Varian 640 в области 4000–600 см<sup>-1</sup> и марки Bruker в области

4000–600 см<sup>-1</sup> при комнатной температуре (рис. 1). Оценка термических свойств сополимера (3) выполнена в приборе NETZSCH STA 449F3 в среде аргона в интервале температур 22–640°C. Эталонном служил Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, скорость нагрева образца 5 град·мин<sup>-1</sup>.

В ИК-спектре сшитых сополимеров (2) обнаружены следующие характерные полосы поглощения (см<sup>-1</sup>): 3324, 3271 (ОН); 2956, 2924, 1497, 1436, 1357, 750 (СН); 2242 (С≡N); 1603 (С=C-аром); 1212 (С—О). В ИК-спектре гидролизованных сшитых сополимеров (3) обнаружены следующие характерные полосы поглощения (см<sup>-1</sup>): 3292 (ОН); 2852, 2919, 1448, 1365, 752 (С—Н); 1708 (С=O); 1604 (С=C-аром); 1166 (С—О).

Как видно из рис. 1, в исходном сополимере (2) явно выявляется полоса поглощения нитрильной группы (2242 см<sup>-1</sup>), однако в спектре гидролизованного сополимера (3) указанная полоса (полоса поглощения С≡N-группы) отсутствует и выявляется полоса поглощения карбонильной группы (1708 см<sup>-1</sup>). Наличие карбонильной группы в гидролизованном сополимере

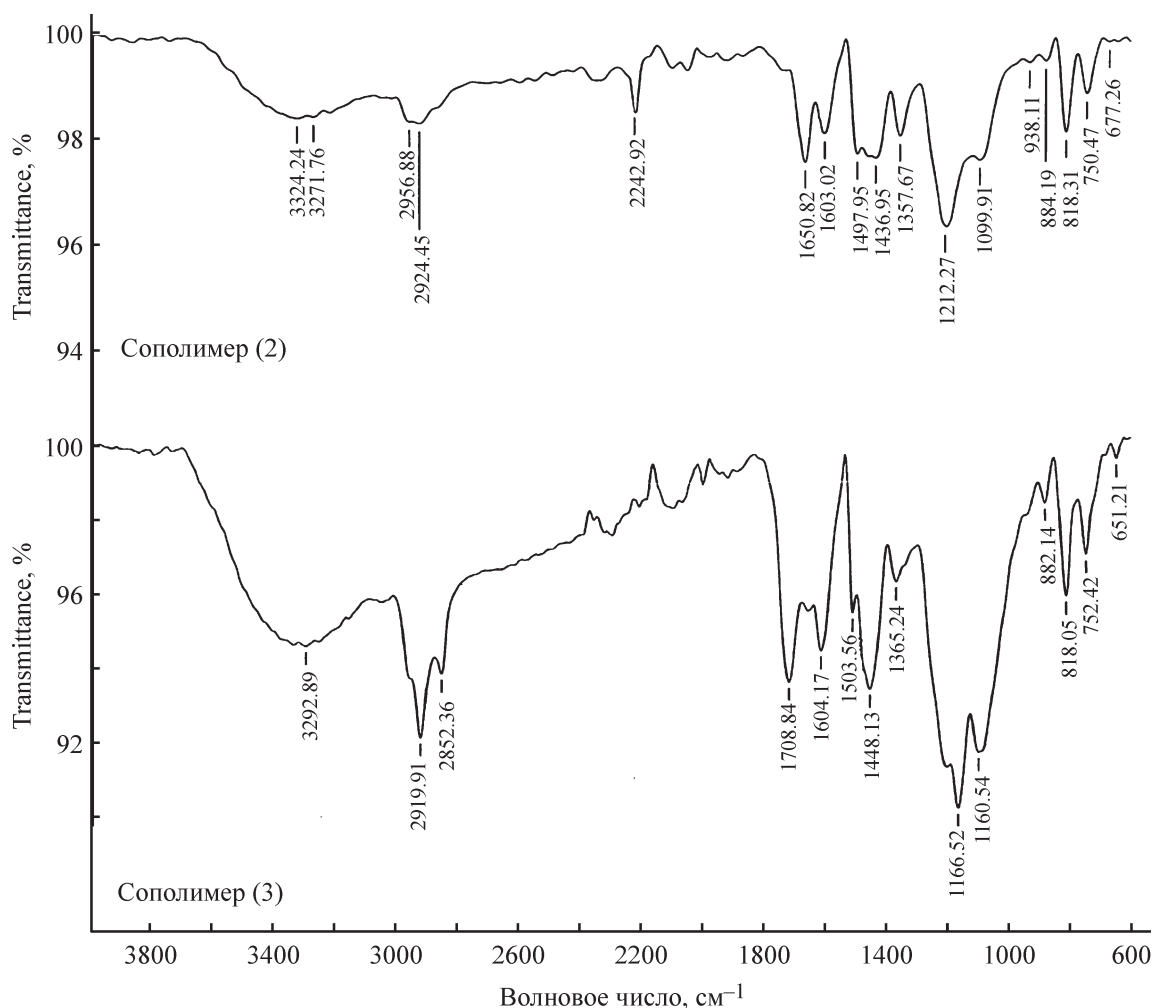


Рис. 1. ИК-спектры структурированных соолигомеров (2) и продуктов их гидролиза (3).

(2) свидетельствует о протекании процесса гидролиза по нитрильной группе. Таким образом, результаты, полученные методом ИК-спектроскопии, полностью подтверждают протекание гидролиза нитрильной группы в сополимере (2) (см. схему).

*Исследование сорбционных свойств сополимеров.* Для исследования сорбционных свойств сшитых сополимеров была использована модельная система, полученная растворением определенных количеств уранил-нитрата (Karmalab) в дистиллированной воде.

Для определения уранил-ионов и оценки сорбционных свойств сшитых сополимеров использовали  $\gamma$ -спектрометр HPGe (с германиевым детектором, Canberra) (рис. 2). Этим методом определяли концентрацию уранил-ионов, исходя из активностей изотопов урана, представленных на рис. 2.

Как видно из рис. 2, активность изотопа  $U^{235}$  определяли по энергии 185.7 кэВ и выходу пика 54%, активность изотопа  $U^{238}$  — по продукту разложения метастабильного изотопа  $Pa^{234}$  энергией 1001.03 кэВ и выходом гамма-пика 0.59%.

Для проведения эксперимента в тефлоновый стакан емкостью 100 мл загружали 30 мг сшитых сополимеров и исследуемого водного раствора, содержащего уранил-нитрат. В систему вводили 10 мл буферного раствора, содержащего  $CH_3COOH$  (99.9%, х.ч., ледяная, ООО «ВитаРеактив») и  $NH_4OH$  (25%, ч.д.а., «Русхим») (количество ее брали в зависимости от pH среды) и объем смеси доводили до 50 мл разбавлением дистиллированной водой [аквадистил-

лятор ЭКРОС-2205 (ПЭ-2205) (А)]. Систему выдерживали в статическом режиме при комнатной температуре в течение 24 ч. По завершении выдержки раствор отфильтровывали и в маточном растворе на  $\gamma$ -спектрометре HP Ge (с германиевым детектором, Canberra) определяли активность изотопов  $U^{235}$  и  $U^{238}$  (Бк·л<sup>-1</sup>).

Об эффективности извлечения уранил-ионов сополимерами судили по снижению концентрации указанных изотопов в растворе до и после сорбции и на их основе вычисляли степень извлечения уранил-ионов ( $R$ ) и сорбционную емкость сорбента (СЕС) [19]:

$$R = \frac{c_0 - c}{c_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$СЕС = \frac{c_0 - c}{m_{\text{сорб}}} \cdot V_{\text{сорб}}, \quad (2)$$

где  $R$  — степень сорбции (%), СЕС — сорбционная емкость сорбента (мг·г<sup>-1</sup>),  $c_0$  — начальная концентрация уранил-ионов (мг·г<sup>-1</sup>),  $c$  — равновесная концентрация уранил-ионов (мг·г<sup>-1</sup>),  $V_{\text{сорб}}$  — объем сорбционной среды (мл),  $m_{\text{сорб}}$  — масса сорбента (мг).

Используя аммиачный раствор (Karmalab) и уксусную кислоту (Karmalab) (в определенных соотношениях), регулировали pH среды, от которой в значительной степени зависят поведение уранил-ионов и эффективность сорбента.

## Обсуждение результатов

Образование трехмерной структуры сополимеров с заданными физико-химическими показателями зависит от различных факторов: строения звеньев цепи, их чередования, природы сшивающего агента, условий отверждения. От них, в частности, в значительной степени зависят частота сетки, объем пор и другие важные свойства, влияющие на их эффективность как сорбентов.

Использованные в работе тройные сополимеры были синтезированы в присутствии ацетата цинка. В их структурах, как было установлено ранее [12, 20], присутствуют метилен-эфирные фрагменты между фенольными группами, способствующие образованию поперечных связей. Очевидно, при использовании в качестве сшивающего агента акрилонитрила вначале имеет место привитая свободнорадикальная сополимеризация его с 4-изопропенильными группами сополимеров, в последующих стадиях происходят межмолекулярные взаимодействия, приводящие к образованию сополимеров сетчатой структуры (2)

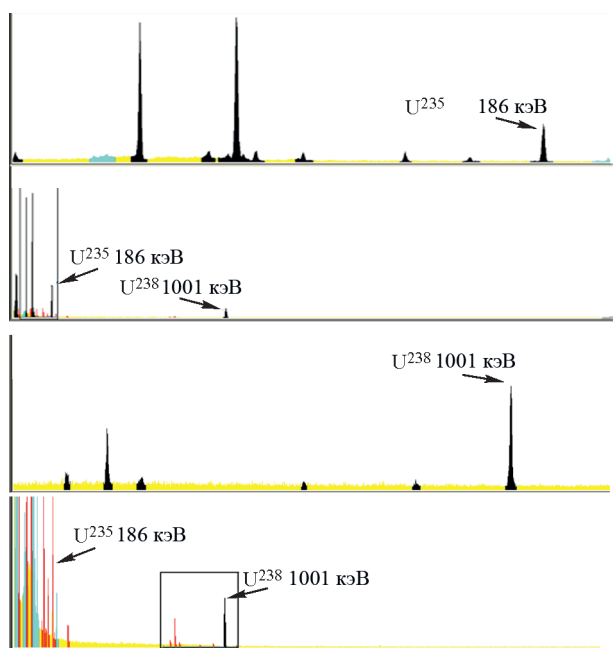


Рис 2. Определение изотопов урана  $U^{235}$  и  $U^{238}$  на HPGe-спектрометре.

(см. схему). Как видно из схемы, обработкой сшитого сополимера (2) водным раствором гидроксида калия получают продукты гидролиза (3).

С целью выявления термических и термоокислительных свойств сшитого сополимера (3) были проведены термогравиметрический и дифференциально-термический анализы (рис. 3). Как видно из результатов исследований, начиная с комнатной температуры до 180°C на термограмме наблюдается устойчивость сшитого сополимера (3). Термическая деструкция его начинается с температуры 200°C, и появляются несколько эндотермических пиков. Эндотермический пик с максимумом при 412°C показывает резкую потерю массы сополимера (3) и частичное разрушение его структуры (~17%). Выявлено, что ~50%-ная потеря массы исследованного сшитого сополимера (3) происходит при 628°C. Результаты термогравиметрических исследований позволяют использовать сшитый сополимер (3) в качестве сорбентов даже в высокотемпературных водных системах.

На рис. 4 приведены результаты изучения влияния pH среды на степень извлечения уранил-ионов и сорбционную емкость сорбента (3) в статистических условиях (температура 25°C, исходная концентрация уранил-ионов в воде 134.5 мг·л<sup>-1</sup>, время выдержки 24 ч). Из рис. 4 видно, что высокая степень извлечения уранил-ионов из водной среды (90–93%) достигается при pH 7–9. При этом сорбционная емкость

составляет ~210 мг·г<sup>-1</sup>. Следует отметить, что высокие значения сорбции при pH 8 не связаны с сорбцией уранил-ионов сшитым сополимером (3), так как при pH 8 происходит гидролиз соли UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> в буферном растворе CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>, в результате чего нерастворимый UO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub> выпадает в осадок [11]. Поэтому оптимальная сорбция уранил-ионов в буферном растворе CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> выявляется при pH 7 и pH 9.

Следует отметить, что при исследовании сорбционных свойств сополимера (2) степень извлечения уранил-ионов при pH 7 составляет 64.4%, СЕС — ~155.7 мг·г<sup>-1</sup>. Сравнительно низкие сорбционные свойства можно объяснить отсутствием в сополимере (2) карбоксильной группы, что подтверждает важность процесса гидролиза. Кроме того, для многих синтетических сорбентов для улавливания уранил-ионов требуются их высокие концентрации (100 мг·л<sup>-1</sup> и более). При этом во многих случаях степень извлечения не превышает 90% [15]. Однако полученные нами сополимеры проявляют активность при значительно меньших количествах (30 мг). Так, в табл. 1 приводятся результаты изучения зависимости величины сорбции UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>-ионов в статистических условиях при pH 7 от времени выдержки сополимера (3) (температура 25°C, исходная концентрация уранил-ионов в воде 134.5 мг·л<sup>-1</sup>).

Изучено также влияние концентрации уранил-ионов на величины R и СЕС (табл. 2). Показано, что наилучшие результаты по степени извлечения ура-

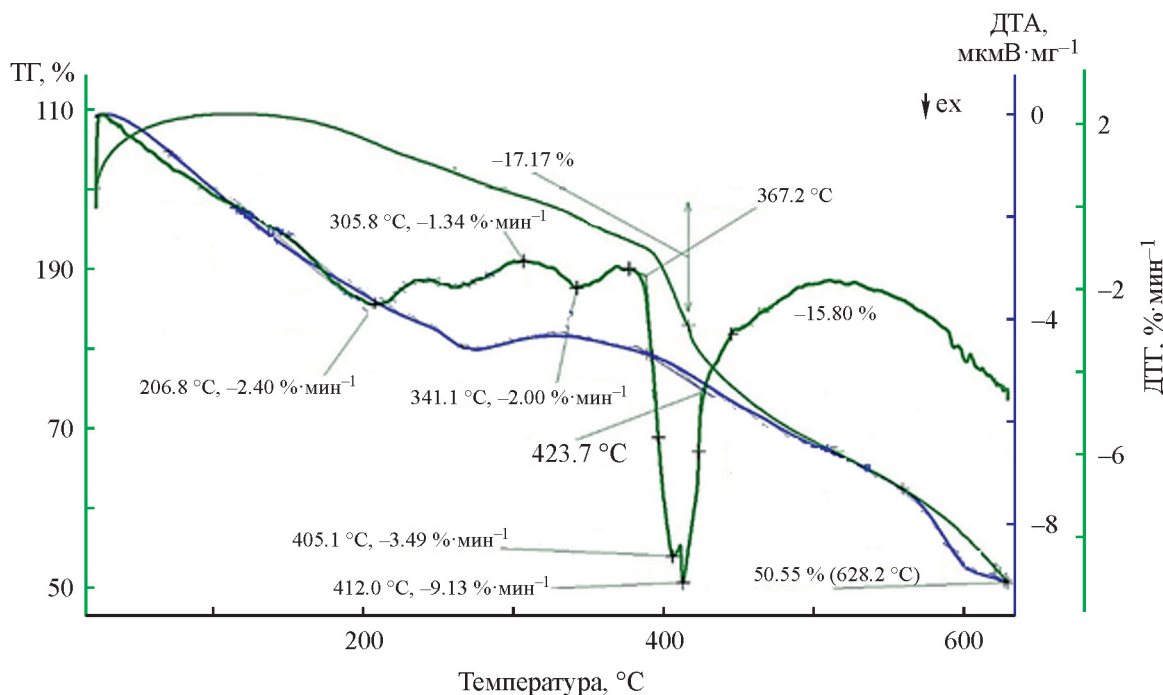


Рис. 3. Результаты термогравиметрического и дифференциально-термического анализа сшитого гидролизованного сополимера (3).



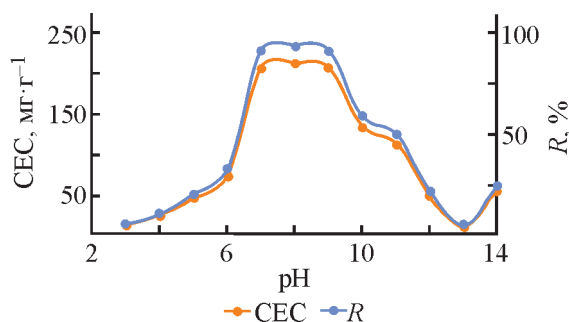


Рис. 4. Зависимость степени сорбции ( $R$ ) уранил-ионов и сорбционной емкости (CEC) сорбента (3) от pH раствора.

нил-ионов из водного раствора (90–93%) достигаются при их концентрации 74–140 мг·л<sup>-1</sup>.

На рис. 5 приведена зависимость сорбционной емкости сшитого сополимера (3) от начальной и равновесной концентрации уранил-ионов. Как видно из рис. 5, в растворе уранил-иона концентрацией 1 г·л<sup>-1</sup> начальная концентрация сорбции уранил-ионов составляет более 200 мг·г<sup>-1</sup>. Однако при значении равновесной концентрации 20 мг·г<sup>-1</sup> сорбционная емкость стабилизируется при значении 300 мг·г<sup>-1</sup>.

Следует отметить, что многие известные сорбенты в основном эффективно извлекают уранил-ионы из концентрированных растворов. Исследуемые же в

Таблица 1

Зависимость степени извлечения уранил-ионов и величины сорбционной емкости сополимера (3) от продолжительности процесса в статических условиях

Условия: температура 25°C, pH 7, исходная концентрация уранил-ионов 134.5 мг·г<sup>-1</sup>

Продолжительность сорбции, мин	Концентрация уранил-ионов после сорбции $c_e$ , мг·л <sup>-1</sup>	Степень извлечения уранил-ионов $R$ , %	Сорбционная емкость CEC $q_e$ , мг·г <sup>-1</sup>	Константа скорости второго порядка ( $1/q_e - q$ )	Константа скорости псевдвторого порядка ( $t/q$ )
3	132.5	1.5	3.3	0.00461	0.90566
5	129.7	3.5	8.0	0.00472	0.60150
10	128.9	4.1	9.3	0.00475	1.07383
15	125	7.04	15.8	0.00490	0.94862
25	124	7.8	17.5	0.00494	1.43027
40	121	10.0	22.5	0.00506	1.77943
60	117.9	12.3	27.6	0.00520	2.17031
90	91.2	32.2	72.1	0.00676	1.24747
180	68	49.4	110.8	0.00916	1.62437
270	45.2	66.4	148.8	0.01405	1.81436
360	20.84	84.5	189.4	0.03276	1.89995
480	21.2	84.2	188.8	0.03224	2.53996
1440	8.7	93.5	209.6	0.09658	6.86873

Таблица 2

Влияние концентрации уранил-ионов на степень извлечения ( $R$ ) и сорбционную емкость сорбента ( $q_e$ ) (pH 7)

$A_0$ , Бк·л <sup>-1</sup>	$A$ , Бк·л <sup>-1</sup>	$c_0$ , мг·л <sup>-1</sup>	$c_e$ , мг·л <sup>-1</sup>	$q_e$ , мг·г <sup>-1</sup>	$R$ , %
22.6	9.3138	38.0	10.1	46.5	73.4
27.1	10.529	45.6	8.9	61.2	80.5
44.3	11.001	74.4	4.8	116	93.5
83.6	13.363	140.6	13.8	211.3	90.2
117.4	31.114	197.4	21.1	293.8	89.3
154.8	54.803	260.1	70.2	316.5	73.0

Примечание.  $A_0$  и  $A$  — значения начальной и конечной (после сорбции) активности изотопов урана;  $c_0$  и  $c_e$  — начальная и равновесная (после сорбции) концентрации урана.

качестве сорбента сшитые сополимеры работоспособны в разбавленных растворах, что очень важно с точки зрения их концентрирования и практического использования.

С целью определения кинетики сорбции уранил-ионов сшитым сополимером (3) были применены кинетические модели первого, псевдвторого и второго порядка. Выявлено, что более соответствующей моделью для сорбции урана является модель константы скорости второго порядка:

$$\frac{1}{q_e - q} = \frac{1}{q_e} + kt.$$

Уравнение константы скорости псевдвторого порядка:

$$\frac{t}{q} = \left[ \frac{1}{k_2 q_e^2} \right] + \frac{1}{q_e} t,$$

где  $k$  — константа скорости реакции второго порядка ( $\text{г} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$ ),  $k_2$  — константа скорости псевдвторого порядка ( $\text{г} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$ ),  $q_e$  — количество сорбируемого вещества в состоянии равновесия ( $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ),  $q$  — количество сорбируемого вещества в определенном времени ( $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ). Результаты исследований показали (табл. 1), что в первые 60 мин процесс сорбции протекает слабо. Это можно объяснить в основном протеканием процесса диффузии молекул в водном растворе.

Из рис. 6 видно, что сорбция сополимером (3) в водных растворах уранил-ионов осуществляется в две стадии, кинетическая зависимость скорости второго порядка первой фазы — фазы хемосорбции характеризуется  $R = 0.96$ , в слабой фазе диффузии  $R = 0.98$ . При дальнейшем увеличении продолжительности (90 мин и более) наблюдается повышение степени сорбции, которая через 24 ч достигает максимума (93.5%) (рис. 7).

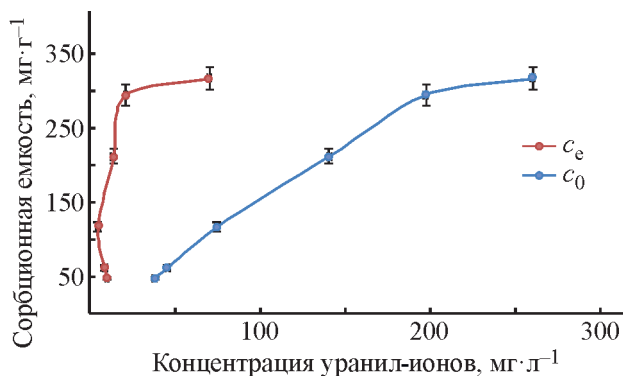


Рис. 5. Зависимость статической сорбционной емкости сшитого сополимера (3) от равновесной ( $c_e$ ) и начальной ( $c_0$ ) концентрации уранил-ионов.

Следует отметить, что график кинетической модели первого порядка для сорбции уранил-ионов сополимером (3) рассчитан на интервал времени 0–60 мин, и только в указанном интервале времени выявляется процесс. Однако из-за того, что кинетические графики второго и псевдвторого порядка (рис. 6 и 7) охватывают весь интервал времени и дают полную информацию о механизме сорбции, в данном случае кинетика сорбции урана является более точной.

Очевидно, что процесс сорбции уранил-ионов сшитыми сополимерами протекает в основном путем их комплексообразования за счет свободной электронной пары у атомов азота. При этом не исключается также участие ОН-группы в процессе комплексообразования.

Для изучения возможности регенерации сорбента (3) исследована десорбция связанных уранил-ионов ( $100 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) растворами азотной и соляной кислот [19]. Выявлено, что по мере увеличения концентрации обеих кислот десорбция урана из сорбента увеличивается. Максимальная десорбция происходит при концентрации минеральных кислот, равной 0.5 М, и

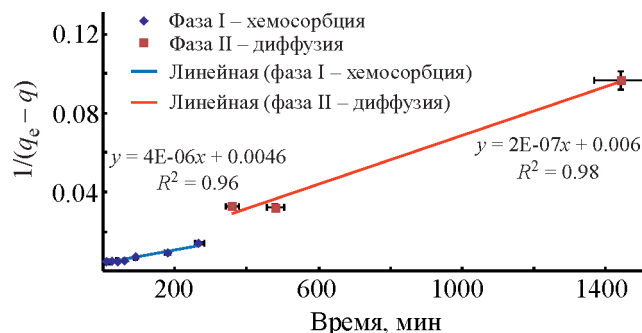


Рис. 6. Кинетическая зависимость константы скорости второго порядка сорбции уранил-ионов сополимером (3).

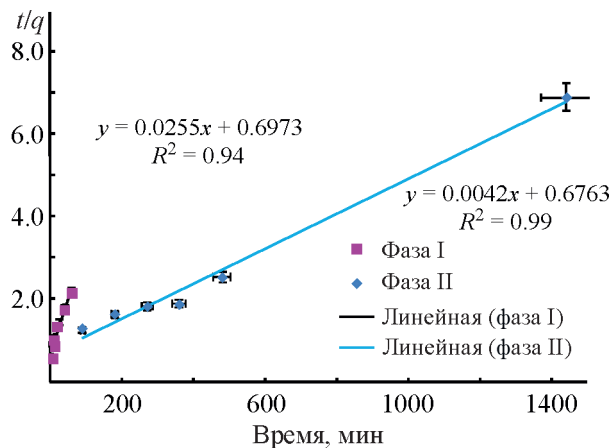


Рис. 7. Кинетическая зависимость константы скорости псевдвторого порядка сорбции уранил-иона сополимером (3).

составляет 90.3% в случае десорбции азотной кислотой и 91.2% — в случае десорбции соляной кислотой.

### Выводы

Продукты гидролиза структурированных акрилонитрилом сополимеров на основе тройных сополимеров 4-изопропенилфенола, фенола и формальдегида, обладающие достаточной термической устойчивостью (до ~400°C), проявляют сорбционную способность по отношению к уранил-ионам. Показана достаточная термическая устойчивость сополимеров (3), что позволяет их использовать в качестве сорбентов даже в высокотемпературных водных растворах. Выявлено, что более соответствующей моделью для сорбции урана сорбентом (3) является модель константы скорости второго порядка. Синтезированный структурированный сополимер обладает наиболее высокой сорбционной активностью при pH 7 и 9 и времени 24 ч (степень сорбции ~93.5%, СЕС ~210 мг·г<sup>-1</sup>).

### Финансирование работы

Исследования проводились в Бакинском государственном университете и ЗАО «Национальном ядерном исследовательском центре» в рамках грантового проекта EIF-ETL-2020-2(36)-16/06/1-M-06 при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация о вкладе авторов

М. Р. Байрамов обосновал идею проведения исследований по разработке структурированных сополимеров на основе 4-изопропенилфенола и их практического применения; Г. М. Мехтиева занималась синтезом сополимеров и их структурированием, принимала участие в оформлении статьи; Дж. А. Нагиев принимал участие в обсуждении результатов сорбционных исследований; Ш. Дж. Гулиева принимала участие в синтезах и проводила сорбционные испытания сшитых сополимеров; М. А. Агаева занималась анализом научно-технической литературы последних лет в области фенольных соединений и их превращений, а также принимала участие в написании статьи; А. М. Магеррамов принимал участие в обосновании идеи проведения исследований по разработке новых сорбционных материалов на основе 4-изопропенилфенола.

### Информация об авторах

*Байрамов Муса Рза оглы*, проф., д.х.н., зав. лаб. «Химия алкенфенолов», профессор кафедры «Химия нефти и химическая технология» Бакинского государственного университета

Web of Science ResearcherID: AAM-7940-2021

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1640-3392>

*Мехтиева Гюнай Мюзакир кызы*, к.х.н., н.с. лаборатории «Химия алкенилфенолов» Бакинского государственного университета

Web of Science Researcher ID: AAA-9011-2021

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4293-6555>

*Нагиев Джалал Ахадбала оглы*, к.х.н., нач. отдела ЗАО «Национального ядерного исследовательского центра»

[https://scholar.google.com/citations?user=Kdm\\_m8oAAAAAJ&hl=ru](https://scholar.google.com/citations?user=Kdm_m8oAAAAAJ&hl=ru),

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorID=55836693700>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-213X>

*Гулиева Шахла Джаббар кызы*

Web of Science ResearcherID: ABG-3376-2022

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9972-488X>

*Агаева Махира Айбала кызы*, к.х.н., в.н.с. лаборатории «Химия алкенилфенолов» Бакинского государственного университета

Web of Science ResearcherID: JDH-3658-2023

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0908-3693>

*Магеррамов Абель Мамедали оглы*, академик, зав. кафедрой «Органическая химия» Бакинского государственного университета

Web of Science Researcher ID: O97372019

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1882-7519>

### Список литературы

- [1] *Вольева В. Е., Домнина Н. С., Сергеева О. Ю., Комарова Е. А., Белостоцкая И. С., Комиссарова Н. Л.* Структурные факторы активности макромолекулярных фенольных антиоксидантов // ЖОрХ. 2011. Т. 47. № 4. С. 484–489. <https://www.elibrary.ru/nxllof> [*Vol'eva V. B., Domnina N. S., Sergeeva O. Yu., Komarova E. A., Belostotskaya I. S., Komissarova N. L.* Structural factors responsible for the activity of macromolecular phenolic antioxidants // Russ. J. Org. Chem. 2011. V. 47. N 4. P. 480–485. <https://doi.org/10.1134/S1070428011040026>].
- [2] *Котова Н. С., Тимофеева Г. В., Тарасова А. В.* Основные закономерности синтеза алкил (C<sub>16</sub>–C<sub>19</sub>)-фенолов — полупродуктов для синтеза присадок к топливам и маслам // Нефтеперераб. и нефтехимия. 2011. № 2. С. 28–30. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16366477>



- [3] Тюрин В. Ю., Цзинвэй Чжан, Моисеева А. А., Милаева Е. Р. Сравнительное изучение редокс-характеристик и антиоксидантной активности порфиринов, содержащих фрагменты 2,6-диалкилфенолов // Докл. РАН. 2013. Т. 450. № 5. С. 543–546. <https://doi.org/10.7868/s086956521317012x>
- [4] Зинина Н. Д., Тимашова А. Л., Павловская М. В., Гришины Д. Ф. Противоизносная присадка к дизельному топливу с ультранизким содержанием серы // Нефтехимия. 2014. Т. 54. № 5. С. 399–404 [Zinina N. D., Timashova A. L., Pavlovskaya M. V., Grishin D. F. An antiwear additive for ultra-low-sulfur diesel fuel // Petrol. Chem. 2014. V. 54. P. 392–396. <https://doi.org/10.1134/S0965544114050119>].
- [5] Qingsong L., Yan Li, Tao Y., Kai L. Study on the dual-curing mechanism of epoxy/allyl compound/sulfur system // J. Mater. Sci. 2016. V. 51. N 17. P. 7887–7898.
- [6] Пат. РФ 2654746 (опубл. 2017). Композиция для получения отвержденных и модифицированных фенолформальдегидных смол и способ ее получения.
- [7] Pakade V., Chimuka L. Polymeric sorbents for removal of Cr(VI) environmental samples // Pure Appl. Chem. 2013. V. 85. N 12. P. 2145–2160. <https://publications.iupac.org/pac/85/12/2145/references/index.html>
- [8] Hajime K., Akihiro M., Keiko O. Studies on new type of phenolic resin-curing reaction of bis-phenol A — based benzoxazine with epoxy resin using latent curing agent and the properties of the cured resin // J. Appl. Polym. Sci. 2008. V. 109. N 2. P. 1248–1256.
- [9] Muthukaruppan A., Pergannan G. Synthesis and characterization of 1,1-bis (3-methyl-4-epoxyphenyl) cyclohexane-toughened DGEBA and TGDDM organo clay hybridnanocomposites // Acta Material. 2011 V. 23. N 3. P. 197–211 <https://doi.org/10.1177/0954008310397634>
- [10] Егорин А. М., Сокольницкая Т. А., Тутов М. В., Токарь Э. А., Матвейкин М. Ю., Авраменко В. А. Композитные селективные сорбенты для очистки морской воды от радионуклидов цезия и стронция // ДАН (Россия). 2015. Т. 460. № 2. С. 177–181.
- [11] Mehdiyeva G. M., Bairatov M. R., Nagiyev Dzh. A., Agayeva M. A., Kuliyeva Sh. Dzh. Studying the sorption of uranyl ions from aqueous solutions with the structured 4-isopropenylphenol-phenol-formaldehyde copolymer // Russ. J. Phys. Chem. A. 2021. V. 95. N 4. P. 769–774. <https://doi.org/10.1134/S0036024421040178>
- [12] Bayratov M. R., Magerramov A. M., Mehdiyeva G. M., Kuliyeva Sh. J., Agayeva M. A. Synthesis and study of triple co-oligomers of 4-isopropenylphenol, phenol and formaldehyde structured by maleic anhydride // Processes Petrochem. Oil Refining. 2021. V. 22. N 4. P. 476–485. <http://ppor.az/jpdf/6-Bayratov-4-2021.pdf>
- [13] Шелковникова Л. А., Гавлина О. Т., Виткина Д. Е., Школьников Е. И., Иванов В. А. Кислотно-основные свойства фенолформальдегидных сорбентов // ЖФХ. 2012. Т. 86. № 5. С. 921–921 [Shelkovnikova L. A., Gavlina O. T., Vitkina D. E., Shkolnikov E. I., Ivanov V. A. Acid-base properties of phenol formaldehyde sorbents // Russ. J. Phys. Chem. A. 2012. V. 86. N 5. P. 825–831. <https://doi.org/10.1134/S0036024412050329>].
- [14] Pambingal Rajan Sruthi, Saithalavi Anas. An Overview of synthetic modification of nitrile group in polymers and applications // J. Polym. Sci. 2020. V. 58. P. 1039–1060. <https://doi.org/10.1134/S0036024421040178>
- [15] Horzum N., Shahwan T., Parlak O., Demir M. M. Synthesis of amidooxymated polyacrylonitrile fibers and its application for sorption of aqueous uranyl ions under continuous flow // Chem. Eng. J. 2012. V. 213. P. 41–49. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2012.09.114>
- [16] Choi S., Nho C. Y. Adsorption of  $UO_2^{2+}$  by polyethylene adsorbents with amidoxime, carboxyl, and amidoxime/carboxyl group // Radiation Phys. Chem. 2000. V. 57. N 2. P. 187–193. [https://doi.org/10.1016/s0969-806x\(99\)00348-5](https://doi.org/10.1016/s0969-806x(99)00348-5)
- [17] Zahri N. A. M., Jamil S. N. A. M., Abdullah L. C., Yaw T. C. S., Mobarekeh M. N., Huey S. J., Rapea N. S. M. Improved method for preparation of amidoxime modified poly(acrylonitrile-co-acrylic acid): Characterizations and adsorption case study // Polymers. 2015. V. 7. N 7. P. 1205–1220.
- [18] Маггеррамов А. М., Байрамов М. Р., Агаева М. А., Мехтиева Г. М., Мамедов И. Г. Алкенилфенолы: получение, превращения и применение // Успехи химии. 2015. Т. 84. № 12. С. 1258–1278. <https://www.elibrary.ru/vbexzf> [Maharratov A. M., Bayratov M. R., Agayeva M. A., Mehdiyeva G. M., Mamedov I. G. Alkenylphenols: Preparation, transformations and applications // Russ. Chem. Rev. 2015. V. 84. N 12. P. 1258–1278. <https://doi.org/10.1070/RCR4437>].
- [19] Nakajima A., Sakaguchi T. Accumulation of uranium by biopigments // J. Chem. Technol. Biotechnol. 1986. V. 36. N 1. P. 133–141. <https://doi.org/10.1002/jctb.280400205>
- [20] Игонин Л. А., Елисеев Ю. А., Дюргеров О. А., Красулина Н. А. Образование стабильных свободных радикалов в процессе отверждения и термической деструкции фенольно-формальдегидных смол // Высокомолекуляр. соединения. 1960. Т. 141. № 6. С. 1366–1368.