

УДК 542.06

ФОРМИРОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ ПЕНОАКРИЛАМИДНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА

© 2025 г. В. Н. Горшенёв¹, М. А. Яковлева^{1*}

¹Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: lina.invers@gmail.com

Поступила в редакцию 14.03.2024

После доработки 04.06.2024

Принята в печать 20.06.2024

Представлены результаты формирования пеноакриламидных сорбционных композитов (СК) из суспензий различной природы в условиях микроволнового нагрева. Сорбционные свойства композитов увеличивали за счет дополнительного введения в матрицу пеноакриламида сорбентов неорганической (оксид марганца) и органической (хитозан) природы. Изготовление пеноакриламидных композитов на основе дисперсионных сред с химическими реагентами, реагирующими с токсичными соединениями и образующими осадки в матрице полимера, помогает увеличению сорбционной способности композитов.

Ключевые слова: функциональные композиты, биосовместимые полимеры, тканевая инженерия, ультразвуковое диспергирование, СВЧ-нагрев.

DOI: 10.31857/S0207401X25020096

1. ВВЕДЕНИЕ

В результате освоения водных мировых пространств, создания промышленных производств по добыче природных ископаемых, новых производств химической промышленности и других видов деятельности происходят загрязнения рек, озер и морей [1–3]. Водные ресурсы Земли постепенно становятся самым дорогим источником жизни. Поэтому необходимо постоянно проводить работы по очистке водных ресурсов, ликвидировать источники загрязнений и находить новые решения для очистки жидких сред от загрязнений [4].

Примеси воды по физико-химическому состоянию разделяют на ионные растворы, коллоидные суспензии, молекулярные и высокомолекулярные соединения. Каждому фазово-дисперсному состоянию примесей соответствуют определенные технологические приемы и методы их удаления. Дисперсные примеси в виде суспензий, эмульсий, патогенных микроорганизмов попадают в воду из окружающих водные ресурсы предприятий, почв и других источников загрязнений. Поэтому разработаны физико-химические методы очистки водных сред, такие как флотация, фильтрование, ультрафильтрация, коагуляция, окис-

ление хлором, озоном, перманганатом, адсорбция на гидроксидах и дисперсных минералах.

Сорбционные материалы для очистки водных сред в настоящее время условно разделяют на сорбенты, которые характеризуются размером макро-, микро-, мезопор и высокой удельной поверхностью для проникновения сорбируемых веществ, и сорбенты с функциональными группами, с которыми могут взаимодействовать сорбируемые вещества. Сорбенты условно разделяют на четыре группы. К первой группе относят, например активированный уголь, графиты, цеолиты – сорбенты, имеющие пористую и слоистую структуру с высокой площадью поверхности. Ко второй группе относят фильтрующие элементы на основе органических компонентов, таких как отходы переработки растительного сырья: лигнин, торф, мох. В третью группу входят карбонизированные ткани, карбонизированные нетканые материалы и пористые полимеры.

Четвертую группу составляют биологические сорбенты. Так, например, в работе [5] приведены результаты связывания ионов металлов с поверхностью целлюлозосодержащих сорбентов с участием карбоксильных и гидроксильных групп, а также за счет физической адсорбции. В работе [6]

определено значительное накопление в различных частях растений таких элементов, как Fe, Co, Cr, Mn, V, Sr. Для утилизации топинамбура, например, с поглощенными из почвы тяжелыми металлами, предлагается использовать его для получения биотоплива.

Сорбционные композиты (СК), в состав которых входят полимерные компоненты и сорбенты различных групп, могут эффективно применяться в форме сорбционных гранул и сорбционных конструкций, например сетей, для проведения практических работ при решении экологических задач. Для изготовления СК (которые условно можно отнести к пятой группе сорбционных материалов) в работе выбран полиакриламидный гель (ПААГ), а в качестве сорбционных компонентов выбраны оксид марганца [7] и часто применяемый в качестве сорбента хитозан [8, 9]. Новый подход к формированию образцов СК в работе осуществлялся в условиях микроволнового нагрева смеси полимерного и сорбционных компонентов.

Цель работы состояла в определении условий изготовления пенокомпозитов на основе полиакриламидного геля под действием СВЧ-нагрева с сорбционными свойствами растворов солей металлов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Полиакриламидный гель формировался путем радикальной полимеризации из акриламида и метилен-бисакриламида при действии инициатора полимеризации – персульфата калия [10]. Для изготовления гелей применяли акриламид $\text{CH}_2\text{CHCONH}_2$, N,N-метилен-бисакриламид $(\text{CH}_2\text{CHCONH})_2\text{CH}_2$ производства компании Roanal (Hungary), персульфат калия марки о.с.ч. (Germany).

Формирование сорбционных композитов на основе растворов для полимеризации полиакриламидных гелей в соотношении 3.4 г акриламида, 0.14 г метилен-бисакриламида и 0.14 г персульфата калия на 20 г дисперсионной среды – воды, осуществляли путем быстрого нагрева и вспенивания под действием микроволнового излучения в СВЧ-печи модели R-4A82 производства компании Sharp (Japan) на частоте 2.45 ГГц мощностью 800 Вт. Время действия микроволнового излучения составляло 30–60 с. После формирования пеноакриламидного геля, образец высушивали

для удаления жидкой фазы и затем помещали в раствор нитрата кобальта концентрацией 0.1 М либо 0.479 М для определения изменений концентрации его раствора.

Регистрацию изменений оптических спектров растворов в процессе исследований осуществляли с применением спектрофотометра UV-1700 производства компании Shimadzu (Japan) в кювете объемом 3 мл с длиной оптического пути 1 см на длине волны 515 нм. Также измеряли весовые характеристики образцов.

С целью связывания солей кобальта в матрице полиакриламидного геля формирование пеноакриламидных гелей проводили путем вспенивания жидких композиций на основе дисперсионных сред, содержащих КОН и Na_2HPO_4 . В отличие от пеноакриламидных образцов, полученных на основе воды, в образцах, содержащих химические реагенты, после набухания в растворе нитрата кобальта протекали реакции с образованием малорастворимых солей металлов. Поэтому формирование в пеноакриламидном геле дополнительных ловушек для связывания ионов металлов повышает сорбционные свойства композитов.

Новый подход к изготовлению сорбционных композитов можно осуществлять на основе использования дисперсионных сред, содержащих коллоидные частицы с сорбционными свойствами, в частности частицы окиси марганца. В работе [7] предложен способ очистки растворов от тяжелых металлов и радионуклидов с использованием оксида марганца и полимерного компонента в количестве 0.5–10 % от массы образующегося осадка.

Формирование сорбционных композитов на основе полимера с сорбционными свойствами и наночастиц неорганической природы приводит к увеличению сорбционных свойств за счет развитой поверхности и активных центров сорбентов. Поэтому для связывания ионов кобальта сорбционными пенокомпозитами на основе окиси марганца и ПААГ проводили реакции образования окиси марганца при взаимодействии перманганата калия и перекиси водорода в матрице полиакриламидного геля [11].

Изготовление сорбционных композитов на основе ПААГ и оксидов марганца проводили по двум схемам: 1) по первой схеме формировали пеногель под действием СВЧ-нагрева, когда в ка-

честве дисперсионной среды использовался раствор перманганата калия, а после высушивания гель помещали в 3%-ный раствор перекиси водорода; 2) по второй схеме пенокомпозиции ПААГ получали с использованием перекиси водорода в качестве дисперсионной среды. После высушивания гель, полученный на основе H_2O_2 , помещали в раствор перманганата калия. Продукты реакции, образующиеся при встречной диффузии перманганата калия и перекиси водорода в матрице ПААГ, регистрировали методом комбинационного рассеивания (КР) с использованием конфокального микроскопа Raman HEDA250 производства компании WEVE (Korea).

В качестве второго сорбционного компонента для изготовления сорбционных композитов в работе применяли хитозан производства ООО «Биопрогресс» (Россия). Для получения пеноакриламидных гелей применяли раствор хитозана в уксусной кислоте. Образец вспененного ПААГ на основе 3%-ного раствора хитозана в 20 г 50%-ной уксусной кислоты и компонентов для полимеризации ПААГ был изготовлен при нагреве в течение 1 мин. Регистрацию аминных функциональных групп в пенокомпозициях с хитозаном проводили методом КР. Для увеличения количества хитозана в матрице пеноакриламидного геля в жидкую композицию дополнительно вводили частицы хитозана и вещества с большим содержанием аминных групп (например, глицин).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полиакриламидный гель в настоящее время, как отмечается в работе [12], активно применяется в качестве сорбционного материала. Для повышения сорбционных характеристик полиакриламидного геля предлагается вводить в состав полимерной цепи азотсодержащие соединения. Образцы пеноакриламидных композитов с различными сорбционными компонентами были синтезированы в условиях микроволнового нагрева в СВЧ-печи. Микроволновой нагрев в течение 30–60 с позволяет нагреть жидкую композицию до температуры кипения с газовой выделением. В результате нагрева происходят вспенивание композиции и радикальная полимеризация акриламида и метилен-бис-акриламида с формированием пеноакриламидного геля. Модифицирование пенокомпозиций ПААГ сорбционными компонентами различной природы позволяет расши-

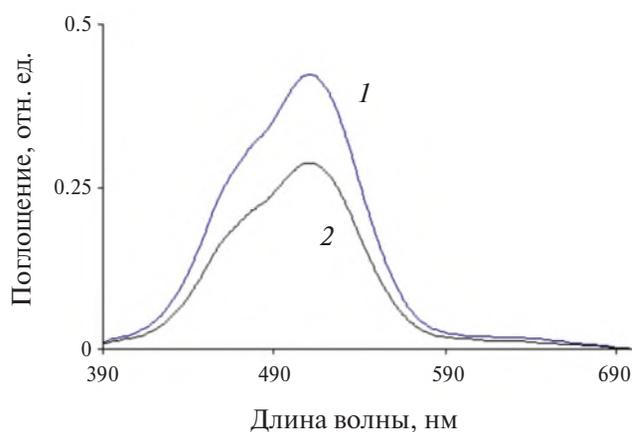


Рис. 1. Спектры поглощения образца геля ПААГ: 1 — исходный раствор соли кобальта (0.01 М), 2 — раствор кобальта, после выхода нитрата кобальта из геля в воду.

рить их сорбционные свойства по отношению к токсичным веществам, загрязняющим водные среды.

Известно, что механизм взаимодействия ионов металлов, в частности, может происходить путем обмена ионами функциональных групп полимерного компонента или за счет реакций комплексообразования. В образцах пеногеля могут также концентрироваться загрязняющие вещества. Тем самым уменьшается концентрация последних в результате их поглощения и осаждения в матрице геля.

После поглощения пеногелем раствора нитрата кобальта образец помещали в воду и определяли количество нитрата кобальта, диффузионно вышедшего из геля (рис. 1). Таким образом, установлено, что 1 г пеногеля (сухого) поглотил 0.48 г нитрата кобальта, а 0.38 г нитрата кобальта, не связанного с матрицей пеногеля, вышло из геля в раствор, т.е. гель необратимо удержал 20% нитрата кобальта.

Для предотвращения выхода ионов кобальта из пеногеля вспенивание последнего проводили с применением щелочного раствора КОН в качестве дисперсионной среды. В результате насыщения такого образца пеноакриламидного геля раствором нитрата кобальта происходит взаимодействие ПААГ с ионами щелочи. В этом случае протекает реакция осаждения гидроокиси кобальта в пеногеле и выход ионов кобальта из матрицы геля уменьшается (рис. 2).

Таким образом, 1 г пеногеля (сухого) с щелочью поглотил 2.23 г раствора кобальта, а пеногель

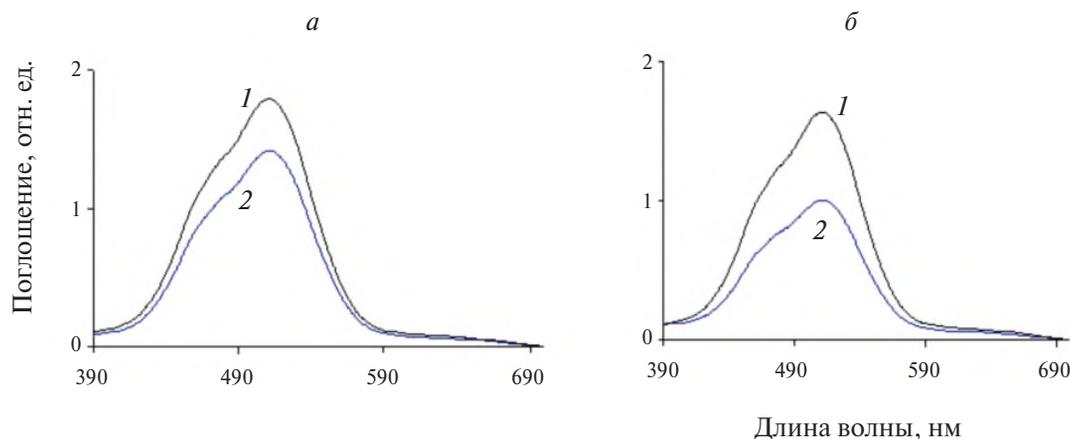


Рис. 2. Для исключения выхода ионов кобальта из пеногеля вспенивание геля проводили на растворе щелочи КОН (а) или гидрофосфата натрия Na_2HPO_4 (б) в качестве дисперсионной среды. В результате протекания реакции осаждения гидроксида кобальта выход ионов кобальта из матрицы геля уменьшен; 1 – исходный раствор соли кобальта (0.479 М), 2 – раствор кобальта после выхода нитрата кобальта из геля в воду.

с Na_2HPO_4 – 1.68 г. При этом из геля в воду вышло 0.92 г нитрата кобальта, не связанного с матрицей пеногеля, в случае пеногеля с щелочью и 0.68 г в случае пеногеля с Na_2HPO_4 . Т.е., оба пеногеля необратимо удержали 60% нитрата кобальта. В результате пеногель с щелочью поглотил 36.4% нитрата кобальта из исходного раствора, а пеногель с Na_2HPO_4 – 54.9%. В результате поглощения соли кобальта образцами пеноакриламидного геля с химическими реагентами КОН и Na_2HPO_4 удержание гелем нитрата кобальта увеличилось на 40%.

Образец сорбционного композита после насыщения в растворе кобальта высушивали и помещали в раствор NaBH_4 . В результате восстановления соли кобальта сорбционный композит приобретает свойство магнитоуправляемости и может использоваться для сорбции других токсических веществ, в частности радионуклеидов.

В пеноакриламидном геле можно формировать активные центры для взаимодействия с сорбируемыми веществами. Известно, что активные центры сорбентов представлены гидроксильными группами поверхности с избыточным отрицательным зарядом, связанным с ненасыщенными связями на границе структурных слоев, а также обменными катионами, компенсирующими избыточный заряд кристаллической решетки.

В технологиях очистки воды от радиоактивных загрязнений активно применяются более эффективные неорганические сорбенты по сравнению с менее эффективными ионообменными смолами. В работе [7] предложен способ очистки растворов

от радионуклидов с применением оксида марганца. В этой работе формирование сорбционного композита состояло в проведении синтеза коллоидной окиси марганца по реакции перекиси водорода с перманганатом калия в пеноакриламидном образце.

При таком подходе в матрице пеногеля формировались частицы окиси марганца. Полиакриламидный гель на основе 6%-ного раствора перманганата калия после вспенивания с полимеризацией высушивали и помещали в 3%-ный раствор перекиси водорода. Для полученного пеногеля были сняты спектры КР (рис. 3). Изменения спектра КР в области $500\text{--}800\text{ см}^{-1}$ относятся к оксиду марганца.

Получены изменения оптического спектра на длине волны 515 нм за счет поглощения ионов кобальта для образцов геля с частицами окиси марганца. Установлено, что 1 г пеногеля (сухого) с оксидом марганца поглотил 0.48 г нитрата кобальта, а 0.06 г нитрата кобальта, не связанного с матрицей пеногеля, вышло из геля в раствор. То есть пеногель, модифицированный оксидом марганца, связал необратимо 88% соли кобальта. Таким образом, гель, модифицированный оксидом марганца, удерживает в своем составе кобальта на 68% больше, чем пеноакриламидный гель без модификации.

Для определения сорбции частицами окиси марганца ионов кобальта в работе были проведены дополнительные эксперименты по образованию частиц окиси марганца в двух дисперсионных средах: в воде и в растворе нитрата кобальта. Вид коллоидных суспензий, образующихся при взаи-

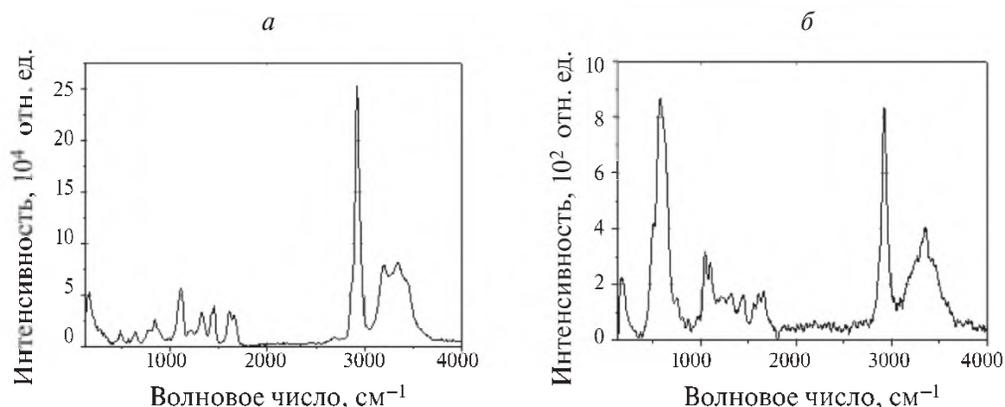


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеивания: *а* – гель ПААГ, *б* – после проведения реакции образования окиси марганца в полиакриламидном геле.

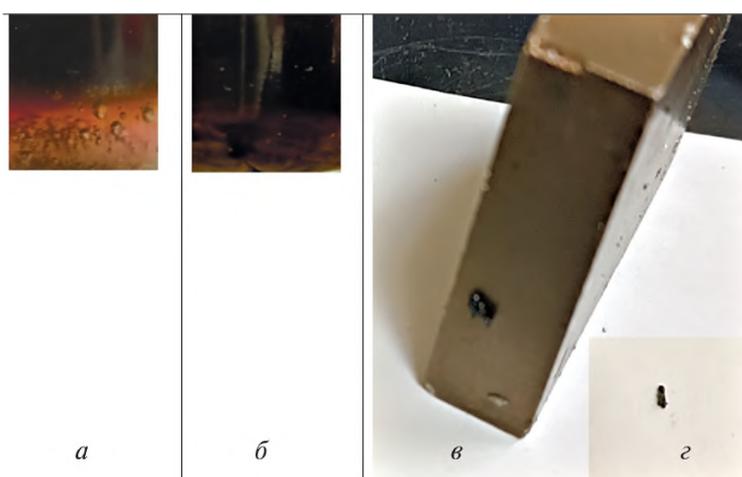


Рис. 4. Эксперимент с осаждением двуокиси марганца по реакции взаимодействия 3%-ного раствора перекиси водорода с раствором $KMnO_4$: *а* – вид протекания реакции в растворе нитрата кобальта до осаждения окиси марганца, *б* – вид протекания реакции с осаждением частиц твердой фазы. Демонстрация ферромагнитных свойств осажденной окиси марганца после сорбции соли кобальта и добавления $NaBH_4$: *в* – образец на бумаге, *г* – образец на боковой поверхности магнита (ТУ 48-4/531-6-92).

модействии 3%-ного раствора перекиси водорода с раствором $KMnO_4$, представлен на рис. 4. Реакцию проводили в растворе нитрата кобальта (рис. 4а) и после осаждения окиси марганца (рис. 4б) анализировали осадок на присутствие соли кобальта с частицами окиси марганца. Второй эксперимент по взаимодействию 3%-ного раствора перекиси водорода с раствором $KMnO_4$ проводили в воде с осаждением окиси марганца в отсутствие ионов кобальта. С течением времени коллоидные суспензии черного цвета в результате взаимодействия перманганата калия и перекиси водорода осаждались. Осадки были отделены от надосадочной жидкости центрифугированием.

Чтобы преодолеть трудности интерпретирования результатов по КР-спектрам, которые характеризуют изменения спектров частиц окиси мар-

ганца, реагирующих с ионами кобальта, были проведены эксперименты с применением растворов $NaBH_4$. Образец частиц окиси марганца, осаждаемых в растворе нитрата кобальта, после осаждения высушивали и смешивали с раствором $NaBH_4$. В результате восстановления частиц нитрата кобальта связанными с осаждаемыми частицами окиси марганца образец приобретал ферромагнитные свойства. На рис. 4 *в*, *г* представлен образец осаждаемого продукта, фиксированный на постоянном магните.

Изготовление СК в условиях микроволнового нагрева можно осуществлять путем смешения компонентов для полимеризации ПААГ с дисперсионными средами, содержащими органические соединения. Создание сорбционных композитов с применением хитозана перспективно, во-первых,

за счет эффективных сорбционных свойств хитозана по отношению к тяжелым металлам; во-вторых, из-за возможности изготавливать пенокомпози́ты на основе раствора хитозана с компонентами для полимеризации полиакриламидного геля; в-третьих, за счет способности формировать пленки из раствора хитозана. Свойство пленкообразования реализуется при модифицировании образца пено-ПААГ в результате пропитки 3%-ным раствором хитозана в 50%-ной уксусной кислоте. Такой способ модифицирования позволяет пропитывать пористый пенокомпозит ПААГ различными суспензиями и придавать образцам новые функциональные свойства, увеличивая количество сорбционного компонента.

Из спектральных данных определено, что 1 г пеногеля (сухого) с хитозаном поглотил 0.46 г нитрата кобальта, а 0.25 г нитрата кобальта, не связанного с матрицей пеногеля, вышло из геля в воду, т.е. гель необратимо удержал 45% нитрата кобальта. Таким образом, модификация пеногеля хитозаном увеличивает количество удерживаемого нитрата кобальта в сорбенте на 25%. На КР-спектрах полосы при 3248 и на 3400 см^{-1} отвечают за NH_2 , NH -растяжение. При сравнении КР чистого ПААГ (рис. 3а) и ПААГ с хитозаном определено, что модифицирование хитозаном увеличило интенсивность полос, отвечающих за амидные группы.

В настоящее время хитозан активно применяется при изготовлении сорбционных композитов, что подтверждается рядом работ. Гидрогели полиакриламида, привитого на хитозан, сшитый $\text{N,N}'$ -метиленабисакриламидом, синтезированы микроволновым методом в работе [13]. Красители, которые выбрасываются в промышленные сточные воды из текстильных, кожевенных, пищевых и других промышленных предприятий, относятся к токсичным полиароматическим соединениям с низкой биоразлагаемостью. Разработанные гидрогели с хитозаном как адсорбенты к азокрасителям показали свою эффективность.

Синтезированный с применением микроволнового излучения полиакриламид, привитый хитозаном [14], показал эффективное адсорбирование ионов Ca^{2+} и Zn^{2+} .

Радиоактивный цезий ^{137}Cs является основным радиоактивным нуклидом, токсически воздействующим на окружающую среду бета-частицами и гамма-лучами. Поэтому в настоящее время раз-

работки сорбционных композитов для концентрирования и удаления радиоактивных веществ очень актуальны [15]. В работе [16] описана методика изготовления пористых магнитных гибридных бентонит-хитозановых сорбентов с включениями частиц магнетита, которые получали по реакции $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ($\text{Fe}^{2+} + 2\text{Fe}^{3+} + 8\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$), как и при получении магнитной жидкости [17]. Максимальная адсорбционная емкость бентонит-хитозановых гранул для селективного удаления радиоактивного цезия из воды составила 57.1 мг/г.

Целесообразность дальнейших исследований по связыванию токсичных веществ с применением хитозановых композитов может быть связана с созданием магнитоуправляемых биокомпозитов [18] для применений в аналитической технике при исследовании биоматериалов и развития технических средств для удаления с поверхности радионуклеидов с применением робототехники.

4. ВЫВОДЫ

1. Разрабатываемые пеноакриламидные сорбционные композиты имеют прикладное значение как для экологии, так и для медицинских приложений. Они могут применяться для очистки биологических жидкостей, для регистрации токсичных веществ и в лечебных целях. Особенно это относится к бинарным композитам на основе биоразлагаемых полимеров.

2. Развитие технических средств для изготовления сорбционных материалов в виде гранул и сорбционных сетей с применением техники микроволнового излучения и формированием сорбентов с ферромагнитными свойствами позволит использовать их для локализации и удаления радионуклеидов.

3. Целесообразно провести исследование очистки конкретных биологических жидкостей, например крови и мочи, от токсичных веществ с использованием разрабатываемых сорбционных композитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122041400110-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кормак Д.* Борьба с загрязнениями моря нефтью и химическими веществами. М.: Транспорт, 1989.

2. Дмитриев М.Т., Казнина Н.И., Пинигина И.А. Санитарно-химический анализ загрязняющих веществ в окружающей среде. Справочник. М.: Химия, 1989.
3. Горшенев В.Н., Овчинников А.А., Новиков Ю.Н. // ЖФХ. 2001. Т. 75. № 6. С. 1058.
4. Кумпаненко И.В., Иванова Н.А., Скрьльников А.М. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 6. С. 76. <https://doi.org/10.31857/S0207401X21060091>
5. Никифоров Т.Е., Багровская Н.А., Козлов В.А., Лилин С.А. // Химия растит. сырья. 2009. Т. 1. С. 5.
6. Абдуллаев С.Ф., Сафаралиев Н.М., Партоев К. // Хим. безопасность. 2019. Т. 3. № 1. С. 110. <https://doi.org/10.25514/CHS.2019.1.15009>
7. Адамович Д.В., Арустамов А.Э., Гелис В.М., Кононенко О.А., Милютин В.В. Сорбент, способ его получения и использования: Патент РФ № 2263536// Б. И. 2005. № 31.
8. Rogovina S., Lotakin S., Usachev S. et al. // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 3920. <https://doi.org/10.3390/app13063920>.
9. Базунова М.В., Мустахимов Р.А., Кулиш Е.И. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 9. С. 72. <https://doi.org/10.31857/S0207401X21090028>
10. Лопатин В.В., Аскадский А.А., Перегудов А.С., Берестнев В.А., Шехтер А.Б. // Высокомолекуляр. соединения. А. 2004. Т. 46. № 12. С. 2079.
11. Карякин Ю.В., Ангелов И.И. Чистые химические реактивы. М.: Госхимиздат, 1955.
12. Пулатова Н.У., Максимова О.С. // Universum: Химия и биология. 2018. Т. 6. № 48. С. 1. <https://doi.org/10.32743/UniChem.2021.84.6.11853>
13. C.da Silva R., B.de Aguiar S., R.da Cunha P.L., M.de Paula R.C., P.A. Feitosa J. // React. Funct. Polym. 2020. V. 148. P. 104491. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104491>
14. Singh V., Tiwari A., Tripathi D.N., Sanghi R. // Polymer. 2006. V. 47. P. 254.
15. Громов В.Ф., Иким М.И., Герасимов Г.Н., Трахтенберг Л.И. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 1. С. 66. <https://doi.org/10.31857/S0207401X22010058>
16. Kexin W., Hui M., Shengyan P. et al. // J. Hazard. Mater. 2019. V. 362. P. 160.
17. Коварский А.Л., Сорокина О.Н., Горшенев В.Н., Тихонов А.П. // ЖФХ. 2007. Т. 81. № 2. С. 364.
18. Кириллов В.Е., Юрков Г.Ю., Коробов М.С. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 11. С. 39. <https://doi.org/10.31857/S0207401X23110043>

FORMATION OF SORPTION ACRYLAMIDE FOAM COMPOSITES UNDER MICROWAVE HEATING CONDITIONS

V. N. Gorshenev, M. A. Yakovleva*

Emanuel Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: lina.invers@gmail.com*

The results of the formation of foamed acrylamide sorption composites (SC) from suspensions of various natures under microwave heating conditions are presented. The increase in sorption properties (SP) was carried out due to the additional introduction of inorganic (manganese oxide) and organic (chitosan) sorbents into the acrylamide foam matrix. The production of acrylamide foam composites based on dispersion media with chemical reagents that react with toxic compounds and form sediments in the polymer matrix increases the sorption capacity (SC).

Keywords: functional composites, biocompatible polymers, tissue engineering, ultrasonic dispersion, microwave heating.

REFERENCES

1. D. Cormac, Combating marine pollution with oil and chemicals. M.: Transport, P. 365. (1989).
2. M.T. Dmitriev, N.I. Kaznina, I.A. Pinigina. II Sanitary-chemical analysis of pollutants in the environment. Directory. M.: Chemistry, P. 367. (1989).
3. V.N. Gorshenev, A.A. Ovchinnikov, Yu.N. Novikov. Journal. Phys. Chemistry. **75** (6), 1058 (2001).
4. I.V. Kumpanenko, M.V. Dyubanov, N.A. Ivanova, V.V. Novikov, V.I. Krivenko, A.V. Roshchin. Russian Journal of Physical Chemistry B. **15** (6), 1054 (2021). <https://doi.org/10.1134/S199079312106021X>
5. T.E. Nikiforov, N.A. Bagrovskaya, V.A. Kozlov, S.A. Lilin. Chemistry of plant raw materials. **1**, 5 (2009).
6. S.F. Abdullaev, N.M. Safaraliev, K. Partoev // Chemical Safety. **3** (1), 110 (2019). <https://doi.org/10.25514/CHS.2019.1.15009>
7. D.V. Adamovich, A.E. Arustamov, V.M. Gelis, O.A. Kononenko, V.V. Milyutin // Pat. Rus. No. 2263536. 2005.
8. S. Rogovina, S. Lomakin, S. Usachev, A. Yakhina, L. Zhorina, A. Berlin. Appl. Sci. **13**, 3920 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13063920>.
9. M.V. Bazunova, R.A. Mustakimov, E.I. Kulish. Russian Journal of Physical Chemistry B. **15** (5), 888 (2021). <https://doi.org/10.1134/S199079312105002X>
10. V.V. Lopatin, A.A. Askadsky, A.S. Peregudov, V.A. Berestnev, A.B. Shekhter. High-molecular compounds. Series A. **46** (12), 2079 (2004).
11. Yu.V. Karyakin, I.I. Angelov. Pure chemical reagents. M.: Goskhimizdat. P. 584. (1955).
12. N.U. Pulatova, O.S. Maksimova. Universum: Chemistry and biology: electron. Scientific Journal. **6** (48), 1 (2018). <https://doi.org/10.32743/UniChem.2021.84.6.11853>
13. R.C. da Silva, S.B. de Aguiar, P.L.R. da Cunha, R.C.M. de Paula, J.P.A. Feitosa. Reactive and Functional Polymers. **148**, 104491 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104491>
14. V. Singh, A. Tiwari, D.N. Tripathi, R. Sanghi. Polymer. **47**, 254 (2006).
15. V.F. Gromov, M.I. Ikim, G.N. Gerasimov, E.Yu. Spiridonova, L.I. Trakhtenberg. Russian Journal of Physical Chemistry B. **16** (1), 138 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1990793122010055>
16. W. Kexin, M. Hui, P. Shengyan, Y. Chun, W. Miaoting, Y. Jing, W. Xiaoke, C. Wei, Z. Anatoly. Journal of Hazardous Materials. **362**, 160 (2019).
17. A.L. Kovarsky, O.N. Sorokina, V.N. Gorshenev, A.P. Tikhonov. Journal of Physical Chemistry. **81** (2), 364 (2007).
18. V.E. Kirillov, G.Y. Yurkov, M.S. Korobov, A.S. Voronov, V.I. Solodilov, V.M. Bouznik. Russian Journal of Physical Chemistry B. **17** (6), 1346 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1990793123060040>