

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 678

DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_11_29

**Х. С. Абзальдинов, Ш. А. Кадилова, М. А. Махкамов, Д. А. Гафурова,
Ю. А. Тунакова, Х. М. Ярошевская, Ю. М. Казаков, О. В. Стоянов**

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ
ПОЛИМЕРНЫХ СОРБЕНТОВ**

Ключевые слова: экстракция, аналит, адсорбция, твердофазная экстракция, полимерные сорбенты, молекулярно-импринтированные полимеры.

В последние годы значительные усилия исследователей были направлены на разработку и характеристику новых, усовершенствованных сорбционных материалов для улучшения селективности или специфичности по отношению к целевым анализам. Сорбенты для твердофазной экстракции можно разделить на три группы: неорганические оксиды, низкоспецифичные сорбенты и сорбенты, специфичные для соединений и классов, к которым относятся полимерные сорбенты. Для проблем, связанных с изоляцией высокополярных макромолекул из водных образцов, где для большинства обычных неселективных сорбентов коэффициенты распределения либо не способствуют переносу целевых соединений в слой сорбента, либо происходит необратимая сорбция, а также для сложных образцов, содержащих большие количества извлекаемых соединений, использование полимерных сорбентов может быть чрезвычайно эффективным. Исходя из вышеизложенного существует значительный интерес к новым материалам для твердофазной экстракции на основе полимеров и композитов на их основе с высокой селективностью или даже специфичностью по отношению к широкому спектру соединений - от чрезвычайно полярных до гидрофобных. Настоящий обзор посвящен анализу современных тенденций в области разработки и применения полимерных сорбентов. Отмечено, что преимущественными сегментами их использования являются адсорбция органических соединений, в том числе для медицинских целей, а также концентрирование и отделение металлов и газов. Анализ многочисленных литературных источников показал, что для адсорбции органических веществ широко и успешно применяются молекулярно-импринтированные полимеры на основе акриловых соединений и их сополимеров, полиимиды и полианилин. Кроме того, перспективным направлением является применение полисилоксанов и других эластомерных композиций вследствие из развитой пористой структуры. Для адсорбции металлов наибольшее применение нашли также полимеры с импринтированными шаблонами различных молекул, полиакрилаты, полиимины, а также различные соединения на основе каучуков. В ходе анализа литературы, посвященной полимерным сорбентам, используемым для адсорбции газов, сделать однозначный вывод о предпочтениях исследователей не представляется возможным, так как их внимание сосредоточено на широком спектре химических соединений.

**Kh. S. Abzaldinov, Sh. A. Kadirova, M. A. Makhkamov, D. A. Gafurova,
Yu. A. Tunakova, Kh. M. Yaroshevskaya, Yu. M. Kazakov, O. V. Stoyanov**

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF POLYMER SORBENTS

Keywords: extraction, analyte, adsorption, solid-phase extraction, polymer sorbents, molecularly imprinted polymers.

In recent years, significant research efforts have been directed to the development and characterization of new, improved sorption materials to improve selectivity or specificity for target analytes. Sorbents for solid-phase extraction can be divided into three groups: inorganic oxides, low-specificity sorbents, and sorbents specific for compounds and classes, which include polymeric sorbents. For problems associated with the isolation of highly polar macromolecules from aqueous samples, where for most conventional non-selective sorbents the partition coefficients either do not facilitate the transfer of target compounds into the sorbent layer or irreversible sorption occurs, as well as for complex samples containing large amounts of extractable compounds, the use of polymeric sorbents can be extremely effective. Based on the above, there is considerable interest in new materials for solid-phase extraction based on polymers and polymer-based composites with high selectivity or even specificity for a wide range of compounds - from extremely polar to hydrophobic. This review is devoted to the analysis of modern trends in the development and application of polymer sorbents. It is noted that the predominant segments of their use are the adsorption of organic compounds, including for medical purposes, as well as the concentration and separation of metals and gases. Analysis of numerous literary sources showed that molecularly imprinted polymers based on acrylic compounds and their copolymers, polyimides and polyaniline are widely and successfully used for the adsorption of organic substances. In addition, a promising direction is the use of polysiloxanes and other elastomeric compositions due to their developed porous structure. For the adsorption of metals, polymers with imprinted templates of various molecules, polyacrylates, polyimines, as well as various compounds based on rubbers have also found the greatest application. During the analysis of the literature devoted to polymer sorbents used for gas adsorption, it is not possible to make an unambiguous conclusion about the preferences of researchers, since their attention is focused on a wide range of chemical compounds.

Введение

Современные тенденции в области экстракции химических соединений открывают широкие пер-

спективы для усовершенствования и разработки новых методов извлечения веществ, а также синтеза новых классов сорбентов для различных целей.

На сегодняшний день доступно несколько методов экстракции, начиная от классической традиционной экстракции жидкость-жидкость (ЖЖЭ) и экстракции жидкость-твердое тело (экстракция Сокслета), до более современных методов, основанных на подходах микроэкстракции. Однако с конца двадцатого века, безусловно, самым популярным методом аналитической экстракции является твердофазная экстракция (ТФЭ) [1-3]. Основы ТФЭ, включая различные доступные форматы, аспекты разработки метода и его применимости, были исчерпывающе обобщены и рассмотрены в литературе [1].

Кроме того, значительные усилия были направлены на разработку и характеристику новых, усовершенствованных сорбционных материалов для улучшения селективности или специфичности по отношению к целевым анализам, более высокую сорбционную емкость, чувствительность и обнаруживаемость и улучшенную химическую или физико-механическую стабильность. Конечно, невозможно сосредоточиться одновременно на достижении всех этих целей, и среди них можно различить некоторые четкие тенденции. Согласно Пулу [4], сорбенты для ТФЭ можно разделить на три группы: неорганические оксиды, низкоспецифичные сорбенты и сорбенты, специфичные для соединений и классов. Перспективными материалами в первом классе являются адсорбционные неорганические оксиды (например, кремний, оксид алюминия и флорисил (силикат магния)), очевидно ограниченные в применении их природой и взаимодействиями аналит-адсорбент. Неспецифические сорбенты (часто используемые в качестве сред для ТФЭ) включают поверхностно-модифицированные силикагели. Неспецифические сорбенты (по отдельности наиболее часто используемые в качестве сред для ТФЭ) охватывают поверхностно-модифицированные кремнеземы и пористые полимеры (например, смолы полистирол-дивинилбензола и материалы на основе углерода). Среди них поверхностно-модифицированные кремнеземы имеют более широкий спектр применения, но имеют ряд ограничений, обусловленных их свойствами, включая ограниченную стабильность при воздействии на водные образцы с низким или высоким рН. Кроме того, для проблем, связанных с изоляцией высокополярных макромолекул из водных образцов, где для большинства обычных неселективных сорбентов коэффициенты распределения либо не способствуют переносу целевых соединений в слой сорбента, либо происходит необратимая сорбция, а также для сложных образцов, содержащих большие количества извлекаемых соединений, использование полимерных сорбентов может быть чрезвычайно эффективным.

Исходя из вышеизложенного существует значительный интерес к новым материалам для ТФЭ на основе полимеров и композитов на их основе с высокой селективностью или даже специфичностью по отношению к широкому спектру соединений - от чрезвычайно полярных до гидрофобных.

Кроме того, актуальной задачей является обзор новых полимерных материалов, используемых в

качестве сорбентов, применяемых для концентрирования органических веществ, металлов и газов.

Полимерные сорбенты для адсорбции органических веществ

На сегодняшний день широкое применение в качестве полимерных сорбентов для адсорбции органических веществ находят молекулярно-импринтированные полимеры, полиимиды, полианилин и эластомерные композиции.

Использование молекулярно-импринтированного полимера (МИП) в качестве селективного сорбента для ТФЭ было впервые предложено в 1994 году Селлергреном [5], который получил селективный для пентамидаина полимер на основе полиакрилата, используя метакриловую кислоту в качестве функционального мономера и этиленгликольдиметакрилат для сополимеризации с аддуктом шаблона. Полученный МИП оказался селективным по отношению к пентамидину и использовался для экстракции этого аналита из воды и мочи. С тех пор МИП на основе акрилатов стали активно использоваться в качестве селективных/специфических сорбентов для ТФЭ.

В исследовании [6] синтезирован магнитный молекулярно-импринтированный полимер (ММИП) на основе $Fe_3O_4@SiO_2@CdTe$ ($CdTe@MМИП$) с использованием трихлорфена в качестве шаблонной молекулы, метакриловой кислоты (МАК) в качестве функционального мономера и этиленгликольдиметакрилата (ЭДМА) в качестве сшивающего агента. Полученный ММИП был охарактеризован, и результаты показали, что он демонстрирует хорошую распознавательную и селективную способность с более быстрой кинетикой адсорбции трихлорфена. Анализ Скэтчарда показал, что связывающие позиции в $CdTe@MМИП$ имели две отдельные группы - с высоким и низким сродством. Насыщенная адсорбционная емкость (Q_{max1}) составила 63,2 мг/г из-за связывающих участков с низким сродством. Другая насыщенная адсорбционная емкость (Q_{max2}) составила 71,4 мг/г из-за позиций с высоким сродством. Используя его в качестве сорбента, разработан метод молекулярно-импринтированной магнитной твердофазной экстракции в сочетании с капиллярным электрофорезом (МИМТЭ-КЭ) для селективной экстракции, магнитного разделения и быстрого определения следов трихлорфена в образцах овощей. В оптимальных условиях была достигнута значительная чувствительность при LOD 30 мкг/кг ($S/N=3$) для разработанного метода. Относительное стандартное отклонение для пяти повторных экстракций стандартного раствора трихлорфена 0,05 мг/л составило 4,2 %. Для оценки точности этого метода образцы огурцов и цветной капусты, в которые был добавлен трихлорфон, были извлечены и проанализированы с хорошими показателями в диапазоне от 78,7 % до 96,6 %. Кроме того, метод применен для количественного обнаружения остатков трихлорфена в образцах рапса, и результаты хорошо коррелировали с данными, полученными с помощью метода газовой хроматографии.

Высокоселективный молекулярно-импринтированный полимерный сорбент синтезирован и использован для одновременного определения шести остатков сульфаниламидных антибиотиков (сульфаниламид, сульфациетамид, сульфадиазин, сульфатиазол, сульфамеразин и сульфаметизол) в образцах молока [7]. Многоаналитные импринтированные частицы использовались в качестве сорбента в твердофазной экстракции. Сульфаниламиды разделялись на высокоэффективной жидкостной хроматографической колонке (Merck-Lichrospher RP18e, 5 мкм 250×4 мм) и далее идентифицировались с количественным определением диодной матрицей. Несколько параметров, включая требуемую загрузку молекулярно-импринтированного полимерного сорбента, массу молока, объем и тип элюирующего растворителя, а также время абсорбции и элюирования, исследованы для получения оптимальных экспериментальных условий. Для сравнения неимпринтированный полимер применялся в оптимальных условиях. Исследование валидации в соответствии с Решением Европейского Союза 2002/657/ЕС было основано на исследовании линейности, селективности, стабильности, пределов обнаружения и количественного определения, предела принятия решения, способности обнаружения, правильности, точности и прочности в соответствии с подходом Юдена. Значения предела принятия решения и способности обнаружения в молоке увеличились от 101,9 до 113,5 мкг/кг и от 114,4 до 135,4 мкг/кг соответственно в зависимости от целевого сульфаниламидного препарата. Наконец, оптимизированный протокол был успешно применен к коммерческим образцам молока и грудному молоку человека.

В работе [8] для экстракции и анализа ацесульфамата - антропогенного маркера качества воды синтезирован ионообменный молекулярно импринтированный полимер (МИП). Импринтинг ацесульфамата использовался в качестве примера для демонстрации преимуществ наноразмерных, набухающих сорбентов экстракции МИП, интегрированных в концепцию мониторинга качества воды. По сравнению со стандартным SPE-картриджем объемом 8 мл формат бумажного диска МИП диаметром 47 мм позволил обеспечить высокую скорость потока образца до 30 мл мин⁻¹ без потери эффективности экстракции, извлечение объемов образца до 500 мл за гораздо более короткое время, повторное использование дисков (в три раза больше, чем картриджа SPE) благодаря высокой надежности и эффективной последующей очистке, а также сокращение времени отбора проб со 100 минут (при использовании стандартного формата SPE) до примерно 2 минут с бумажным диском МИП для образца воды объемом 50 мл. Оценены и оптимизированы различные параметры, такие как соотношение целлюлозное волокно/полимер, объем образца, скорость потока образца, промывка и условия элюирования. При использовании разработанной методики экстракции с высокоэффективной жидкостной хроматографией–тандемной масс-спектрометрией (ВЭЖХ–МС–МС) установлен новый протокол, обеспечивающий пределы обнаружения и количественного определения 0,015 мкг л⁻¹ и 0,05 мкг л⁻¹ соот-

ветственно. Разработанные бумажные диски использовались в полевых условиях для селективной экстракции целевых соединений и переносились в лабораторию для дальнейшего анализа.

Молекулярно-импринтированные полимерные нановолокна (МИП-НВ) получены для адсорбции бисфенола А (БФА) в воде с использованием золь-гель процесса и техники электропрядения [9]. Исследовано влияние ряда параметров синтеза на эффективность адсорбции. Успешное удаление БФА из МИП-НВ было изучено с помощью УФ-спектроскопии. Подготовленные МИП-НВ охарактеризованы с помощью метода инфракрасной Фурье-спектроскопии, сканирующей (СЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) микроскопии, энергодисперсионного рентгеновского анализа. Результаты показали, что требуемое молярное соотношение 3-аминопропилтриэтоксисилана (АПТЭС) к БФА составляло 15:1, что указывает на хорошие показатели в тесте на повторное связывание. Аналогично, молярное соотношение АПТЭС:кислота:вода составляло 1:2:9. Раствор нейлона-6 с концентрацией 12 % масс. показал максимальную адсорбционную способность для БФА вследствие уменьшения диаметра нановолокна и увеличения доступных участков. Кроме того, максимальная адсорбционная способность БФА была достигнута при pH 7. Что касается связывания БФА на МИП-НВ, то экспериментальные показатели хорошо совпали с данными кинетики псевдвторого порядка и моделью изотермы SIPS. Насыщенная связывающая способность для МИП-НВ составила 115,1 мг/г, что было более чем в два раза выше, чем для неимпринтированных полимерных нановолокон (46,82 мг/г). Результаты, полученные в исследовании, подтвердили, что полученные МИП-НВ показали значительную связывающую способность для БФА по сравнению с аналогичными соединениями, такими как фенол, нафтол и нафтол AS в водном растворе. Связывающая способность МИП-НВ оставалась практически постоянной после пяти циклов повторного использования. Анализ промышленных образцов показал, что разработанный материал можно использовать в качестве эффективного сорбента для извлечения БФА из образцов воды.

В работе [10] представлен синтез и характеристика полимерных матриц для молекулярного распознавания пестицидов. Для их получения использовались метакриловая кислота в качестве функционального мономера и диметакрилат этиленгликоля в качестве сшивающего агента. В качестве шаблонных молекул использовались диазиносон и бифентрин. Синтезы проводились в присутствии различных порогенов. Химическая структура изучалась с помощью ИК-Фурье-спектроскопии с НПВО, элементного анализа и алкациметрического титрования, морфология - с помощью лазерного дифракционного анализатора размера частиц и формы на основе анализа изображений, а пористая структура - методом адсорбции/десорбции азота. Для изучения селективности сорбента по отношению к шаблонной молекуле определялись объемы проскока и кинетика сорбции для молекулярно-импринтированных полимеров и их неимпринтирован-

ных аналогов. Размеры частиц исследуемых сорбентов (выраженные как диаметр СЕ) находились в диапазоне от 40 до 44 мкм (за исключением сорбента, полученного в присутствии гексана). Химический состав всех полученных сорбентов был близок к теоретическому (60,13 % С, 7,11 % Н, 32,77 % О). Значения удельной поверхности сорбентов находились в диапазоне от 2 до 338 м²/г.

Поверхность магнитного гиперразветвленного полиамидамина модифицирована перфтороктановой кислотой путем конденсации кислотного амина [11]. Морфология и химический состав полученного соединения охарактеризованы с помощью ПЭМ, ИКС с преобразованием Фурье, определения дзета-потенциала, анализа размера частиц, измерения Брунауэра-Эммета-Теллера и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Модифицированный перфтороктановой кислотой магнитный гиперразветвленный полиамидамин был применен в магнитной твердофазной экстракции для разделения и обогащения четырех фторсодержащих пестицидов (индосакарб, метафлумизон, цифлумефен и цигалотрин). Метод магнитной твердофазной экстракции на основе полученного авторами продукта имеет низкие пределы обнаружения метода (0,30-0,49 мкг/л), удовлетворительный коэффициент определения (0,9995-0,9999), широкие линейные диапазоны (2,5-250 мкг/л) и хорошую повторяемость (внутридневной - 2,6-4,7 %; междневной - 1,1-7,9 %). Коэффициенты обогащения и эффективности экстракции варьировались от 55 до 76 и от 69 до 96 % соответственно. Воспроизводимость от сорбента к сорбенту находилась в диапазоне 3,2-7,6 %, что указывает на надежность синтеза продукта. Для обнаружения реальных образцов воды относительные извлечения находились в диапазоне от 80,1 до 114,4 % с относительными стандартными отклонениями менее 9,6 %. Результаты расчетов квантово-химическими методами показали, что после модификации перфтороктановой кислоты взаимодействие сорбента с четырьмя фторсодержащими пестицидами усилилось.

Магнитный гиперразветвленный полиамидамин был карбоксилирован с использованием янтарного ангидрида и далее модифицирован 1-октил-3-метилимидазол гексафторфосфатом [12]. Морфология и химический состав полученного материала были охарактеризованы с помощью просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, ИК Фурье-спектроскопии, измерения Брунауэра-Эммета-Теллера, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и т.д. Модифицированный полиамидамин использовался в качестве сорбента в магнитной твердофазной экстракции для разделения и обогащения пяти пиретроидных инсектицидов из чайного настоя. Предложенный в статье метод магнитной твердофазной экстракции имеет низкие пределы обнаружения метода (0,53-0,71 нг/мл), приемлемый коэффициент определения (0,9992-0,9998), широкие линейные диапазоны (2,5-500,0 нг/мл) и хорошую повторяемость (внутридневной: 1,2-6,3 %; междневной: 1,6-5,4 %). При обнаружении пяти пиретроидных инсектицидов в чайном настое относительные извлечения находи-

лись в диапазоне от 87,7 до 114,7 % с удовлетворительными относительными стандартными отклонениями (0,2-7,4 %). С помощью квантово-химических расчетов определена энергия взаимодействия между сорбентом и инсектицидами, что доказало необходимость модификации гексафторфосфата 1-октил-3-метилимидазола.

В работе [13] описывается синтез и применение полимерных ионных жидких сорбционных покрытий с никелевыми металлческими центрами для извлечения летучих и полунлетучих аминов из образцов воды с использованием твердофазной микроэкстракции в парофазном пространстве. Исследуемые полимерные ионные жидкие сорбционные покрытия состояли из двух ионных жидких мономеров: тетра(3-винилимидазолий) никель бис(трифторметил)сульфонил] имида $[Ni^{2+}(VIM)_4] 2[NTf_2^-]$ и 1-винил-3-гексилимидазолия $[HVIM^+][NTf_2^-]$, а также ионного жидкого сшивающего агента - (1,12-ди(3-винилимидазолий)додекана $[(VIM)_2C_{12}^{2+}] 2[NTf_2^-]$). На основе исходных компонентов приготовлены три различных типа покрытий: PIL 1 - на основе чистого мономера $[Ni^{2+}(VIM)_4] 2[NTf_2^-]$, PIL 2, состоящий из мономера $[Ni^{2+}(VIM)_4] 2[NTf_2^-]$ с добавлением сшивающего агента, и PIL 3, состоящий из мономера $[HVIM^+][NTf_2^-]$ и сшивающего агента. Аналитические характеристики приготовленных сорбционных покрытий с использованием твердофазной микроэкстракционной газовой хроматографии с масс-спектрометрией сравнивали с коммерческими покрытиями из полидиметилсилоксана и полиакрилата. Сорбционное покрытие PIL 2 обладало самыми высокими коэффициентами обогащения в диапазоне от 5500 до более 160000 для целевых аналитов. Разработанный метод применен для анализа реальных образцов (концентрация аминов составляла 200 мкг/л), что позволило получить относительные значения извлечения в диапазоне 90,9-120,0 % (PIL 1) и 83,0-122,7% (PIL 2) из водопроводной и 84,8-112,4 % (PIL 1) и 79,2-119,3 % (PIL 2) из озерной воды.

В работе [14] синтезированы магнитные полиимидные наночастицы поли4,4'-оксифенилен-пиромеллитимида для твердофазной экстракции полициклических ароматических углеводородов в образцах морской воды. Ароматические кольца полиимидного покрытия обеспечили хорошую адсорбционную емкость (28,3-42,5 мг/г) для полициклических ароматических углеводородов из-за π - π -стекинг-взаимодействия. Разработанный метод был использован в качестве простого, быстрого и эффективного метода экстракции и предварительного концентрирования для анализа следов полициклических ароматических углеводородов. Высокая химическая, физическая и термическая стабильность, отличная возможность повторного использования и хорошие магнитные свойства являются достоинствами сорбента. Были получены высокие факторы предварительного концентрирования (41-63). Сорбент также был охарактеризован с помощью ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье, СЭМ, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, ПЭМ и вибрационной магнитометрии образца. После оптимизации нескольких соответствующих параметров экстракции результаты показали, что степень извлечения

полициклических ароматических углеводородов находилась в диапазоне 61,6-94,7% с относительными стандартными отклонениями от 2,9 до 5,4%. Калибровочный график был линейным в диапазоне концентраций 1-100 мкг/л ($r > 0,9991$) с пределом обнаружения в диапазоне 0,15-0,19 мкг/л ($n=3$). Образцы морской воды анализировались как реальные, и при различных значениях пиков были получены хорошие показатели извлечения (68,5-99,5%).

В работе [15] изготовлен и применен для дисперсионной твердофазной экстракции с помощью растворителя пяти полициклических ароматических углеводородов иерархический пористый композитный магнитный сорбент. Сначала сорбент был приготовлен путем включения оксида графена, карбоната кальция и наночастиц магнетита в криогель поливинилового спирта. Оксид графена был преобразован в восстановленный оксид графена с использованием аскорбиновой кислоты, а пористая структура была получена путем реакции соляной кислоты с карбонатом кальция для получения диоксида углерода и создания таким образом второй сетки. Перед извлечением целевых аналитов в иерархическую пористую сеть сорбента был введен экстракционный растворитель. Экстракция была основана на разделении между аналитами и введенным экстракционным растворителем и адсорбции аналитов на восстановленном оксиде графена. Эффективность экстракции была повышена за счет π - π и гидрофобных взаимодействий между полициклическими ароматическими углеводородами, восстановленным оксидом графена и экстракционным растворителем. Извлеченные полициклические ароматические углеводороды определялись с помощью ВЭЖХ в сочетании с флуоресцентным детектором. Разработанный метод был применен для извлечения полициклических ароматических углеводородов из одноразовых подгузников, образцов кофе и чая. Достигнуты показатели извлечения от 84,5 до 99,4 % с относительными стандартными отклонениями менее 7 %. Разработанный сорбент показал хорошую воспроизводимость и может быть повторно использован в течение десяти циклов.

В исследовании [16] пять моделей изотерм адсорбции, а именно изотермы Ленгмюра, Фрейндлиха, Ленгмюра-Фрейндлиха, Темкина и Брунауэра-Эммета-Теллера, были использованы для анализа экспериментальных данных адсорбции для шести классов термочувствительных сополимер-привитых сорбентов Sepharose Fast Flow на основе поли(N-изопропилакриламида) с различными сополимерными составами с двумя структурно связанными белками, а именно бычьим голо-лактоферрином и бычьим голо-трансферрином при 20 и 50 °С. Экспериментальные данные для бычьего голо-лактоферрина могли быть математически приведены к изотермам Фрейндлиха и Темкина, когда концентрации белкового сырья находились в диапазоне 1-40 мг/мл как при 20, так и при 50 °С. Аналогичный анализ связывания гомологичного белка (бычьего голо-трансферрина) с теми же термочувствительными сополимерно-привитыми сорбентами показал, что экспериментальные данные могут быть аппроксимированы изотермами

Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина с коэффициентами детерминации более 0,90.

Разработан сорбент из вспененного каучука с покрытием из полипиррола и стальной проволоочной вставкой для магнитной твердофазной экстракции фипронила и фипронилсульфона из образцов чая для анализа с помощью детектора захвата электронов в газовой хроматографии [17]. При оптимальных условиях линейные диапазоны метода составляли 0,05-100 мкг/л для фипронила и 0,01-100 мкг/л для фипронилсульфона. Пределы обнаружения составляли 0,01 и 0,005 мкг/л, а пределы количественного определения - 0,05 и 0,01 мкг/л для фипронила и фипронилсульфона соответственно. Процедура приготовления разработанного сорбента показала хорошую воспроизводимость с относительным стандартным отклонением в диапазоне 1,9-2,4 % с добавлением 50 мкг/л. Хорошая точность была получена с относительным стандартным отклонением ниже 6,7 % в четырех концентрациях в диапазоне от 0 до 50 мкг/л. Фипронилсульфон был обнаружен в двух образцах чая в концентрациях $1,79 \pm 0,05$ и $2,64 \pm 0,03$ мкг/л с извлечением в диапазоне от $80,4 \pm 1,5$ % до $110,0 \pm 2,0$ %. Таким образом, разработанный сорбент продемонстрировал высокую эффективность экстракции с хорошей селективностью по отношению к целевым аналитам в реальных образцах.

В работе [18] для определения диазинона в образцах воды использовалась методика микроэкстракции в заполненном шприце в сочетании со спектрометрией ионной подвижности с источником на основе коронного разряда. Пористый композит из наноглины и полисилоксана был приготовлен с использованием золь-гель процесса. Сорбент в количестве 2,0 мг был упакован в шприц объемом 250 мкл и использован для экстракции. Объем образца был пропущен через слой сорбента, а захваченный аналит был элюирован 25 мкл метанола. Исследованы важные параметры, влияющие на эффективность экстракции. В оптимальных экспериментальных условиях предел обнаружения диазинона составил 0,07 нг/мл. Внутри- и междневные относительные стандартные отклонения составили 5,0 и 12,3 % соответственно. Калибровочная кривая была линейной в диапазоне концентраций от 0,2 до 20,0 нг/мл ($r^2=0,999$). Применимость метода была продемонстрирована путем анализа образцов реальной воды с добавками, при этом степень извлечения добавок составила от 95 до 106 %.

В работе [19] предложен эффективный метод магнитной твердофазной экстракции с использованием магнитного оксида графена, покрытого сополимером 2-аминотерефталевой кислоты с анилином, в качестве сорбента для предварительного концентрирования и экстракции фосфорорганических пестицидов из образцов воды и яблочного сока. Для подтверждения успешного синтеза магнитного нанокompозита приготовленный сорбент был охарактеризован с помощью полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, вибрационной магнитометрии и ИК-метода с преобразованием Фурье. Основные параметры, влияющие на эффективность экстракции, были рассмотрены и

изучены для обеспечения оптимизированной процедуры. Систематическая валидация метода подтвердила его подходящие извлечения (89,4-107,3 %) и точность (относительные стандартные отклонения <6,8 %). Метод показал широкий линейный динамический диапазон (0,04-700 нг/мл) с низкими пределами обнаружения (0,01-0,06 нг/мл) и количественного определения (0,04-0,21 нг/мл), а также хороший потенциал и большую чувствительность для определения пестицидов.

Фильтры для сигарет с покрытием из полианилина были успешно синтезированы и использованы в качестве твердофазного сорбента для экстракции и предварительного концентрирования полициклических ароматических углеводородов в образцах воды [20]. Полианилин способствовал повышению адсорбционной способности полициклических ароматических углеводородов на сорбенте посредством π - π взаимодействий. Поверхности фильтров для сигарет, обладающие высокой пористостью и большой площадью, помогли снизить противодавление и способны функционировать с высокой скоростью потока образца без потери эффективности экстракции. Разработанный сорбент охарактеризован с помощью ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье и СЭМ. Исследованы параметры, влияющие на эффективность экстракции, т. е. время полимеризации, тип десорбирующего растворителя и его объем, скорость потока образца, объем, pH, ионная сила и концентрация органического модификатора. В оптимальных условиях метод был линейным в диапазоне 0,5-10 мкг/л с пределом обнаружения 0,5 нг/л и успешно применен для предварительного концентрирования полициклических ароматических углеводородов из образцов воды с обеспечением высокого коэффициента обогащения с хорошей эффективностью извлечения (85-98 %) и относительным стандартным отклонением <10 %.

В работе [21] синтезирован композит на основе металлоорганического каркаса и полианилина с наночастицами кремния. Структура и морфология материала охарактеризованы с помощью ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье и СЭМ. Композит был упакован в картридж и оценен для твердофазной экстракции тимола и карвакрола с последующим измерением методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием. Изучено и оптимизировано влияние важных экспериментальных переменных на эффективность предлагаемого метода, включая pH, ионную силу, объем раствора образца и тип, а также объем элюента. При оптимальных условиях относительные стандартные отклонения составили 3,8 и 9,8 % для тимола и карвакрола соответственно, а соответствующие пределы обнаружения составили 0,1 и 1,0 нг/мл. Линейные динамические диапазоны для калибровочных кривых анализов составили 10-10000 нг/мл с коэффициентами определения (R^2)>0,993. Пределы количественного определения составили 0,01 и 0,5 мкг/мл для тимола и карвакрола соответственно. Приготовленный нанокompозитный сорбент был успешно применен для извлечения и определения тимола и карвакрола в экстрактах растений семейства яснотковых и образце

меда с относительным извлечением в диапазоне 90,28-122,0%.

В работе [22] разработан метод анализа инсектицидов бензоилмочевины, включая гексафлумурон, флуфеноксурон, луфенурон и хлорфлуазурон, в образцах чая методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием нанокompозита на основе гиперразветвленного полиэфира Fe_3O_4 в качестве адсорбента для магнитной твердофазной экстракции. Магнитный нанокompозит приготовлен и охарактеризован с помощью ИК-спектроскопии, вибрационной магнитометрии образца и СЭМ. Нанокompозит использовался в качестве сорбента для экстракции и предварительного концентрирования остатков пестицидов в образцах чая. Исследованы условия экстракции и десорбции, включая массовые соотношения сырья, количество сорбента, значение pH, время экстракции и десорбции. При выбранных для анализа конечных условиях получена хорошая линейность для всех тестируемых соединений со значениями R^2 не менее 0,9979. Пределы обнаружения были определены в диапазоне 0,15-0,3 мкг/л. Извлечение, полученное при анализе образцов чая с различными концентрациями добавок, составило от 90,7 до 98,4 %, с относительными стандартными отклонениями ($n=4$) ниже 4,1 %. Кроме того, настоящий подход был успешно применен для количественного определения остатков инсектицидов на основе бензоилмочевины в реальных образцах.

Наноструктурированный звездообразный поли-тиофеновый дендример синтезирован и использован в качестве экстракционной среды для микроэкстракции в упакованном шприце для пестицида клофентезина в образцах молока и сока в сочетании с ВЭЖХ [23]. Термические, оптические свойства и морфология синтезированных образцов исследованы с помощью термогравиметрического анализа (ТГА), УФ-спектроскопии и полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии соответственно. Стратегия «один за один раз» была применена для оптимизации важных параметров экстракции, таких как природа десорбционного растворителя, объем элюирования, pH, количество циклов экстракции и объем образца. В оптимизированных условиях для клофентезина были получены предел обнаружения $2 \cdot 10^{-4}$ мкг $мл^{-1}$ и линейная калибровочная кривая с R^2 0,9983. Средний показатель извлечения аналита для образцов сока и молока составил 97,6 и 93 % с относительным стандартным отклонением 3,92 и 2,76 % соответственно для пяти повторных анализов. Метод был успешно применен для определения клофентезина методом ВЭЖХ в образцах молока и сока.

Сообщается о создании тонкопленочного композита для извлечения бисфенола А из водных растворов [24]. Для приготовления полимерного сорбента использовались нейлон-6, частицы C_{18} и полиэтиленгликоль. Бисфенол А использовался в качестве модельного соединения для оценки эффективности извлечения сорбента. Для анализа использовалась ВЭЖХ с УФ-детектированием. Выход извлечения сорбента сравнивался с другими тонкими пленками, изготовленными с использованием различных мате-

риалов, включая наноглину, LiChrolut EN и многослойные углеродные нанотрубки. Исследованы экспериментальные параметры, влияющие на эффективность извлечения (время процесса, условия десорбции, наличие перемешивания и ионная сила раствора образца). Предел обнаружения и динамический диапазон метода составили 0,05 и 0,15-50 мкг/л соответственно. Относительное стандартное отклонение метода при двух уровнях концентрации (0,5 и 20 мкг/л) составило менее 7,2 %. При помощи разработанного метода были проанализированы образцы детской бутылки из поликарбоната, речной воды и сточных вод.

Для защиты здоровья населения и окружающей среды необходимо эффективное удаление пер- и полифторалкильных веществ (ПФАВ) из загрязненных вод. В работе [25] получены магнитные фторированные полимерные сорбенты, позволяющие эффективно улавливать ПФАВ и быстро магнитно восстанавливать сорбированный материал. Сорбент имеет более высокую эффективность удаления ПФАВ по сравнению с коммерчески доступными активированным углем и ионообменными смолами. Удаление аммонийной соли димерной кислоты гексафторпропиленоксида (ДКГФПО) достигает >99 % в течение 30 с, а расчетная сорбционная емкость составила 219 мг г⁻¹ на основе модели Ленгмюра. Надежная и эффективная регенерация магнитного полимерного сорбента подтверждена повторной сорбцией и десорбцией ДКГФПО в течение четырех циклов. Сорбция нескольких ПФАВ в двух реальных загрязненных водных матрицах при экологически значимой концентрации (1 ppb) показывает >95 % удаления для большинства ПФАВ, протестированных в исследовании.

Серия сверхсшитых полимеров с невысокой стоимостью получена при помощи простой одностадийной реакции Фриделя-Крафтса [26]. Синтезированные соединения продемонстрировали пористую структуру, большую площадь поверхности и наличие гидроксильных групп, а, следовательно, возможность использования в качестве идеального адсорбционного материала для новых методов экстракции сорбентной фазы. На основе этого, используя сверхсшитые полимеры в качестве сорбента и покрытия, исследованы и оценены три новых метода экстракции, включая микротвердофазную и дисперсионную твердофазную экстракцию, а также твердофазную микроэкстракцию, для одновременного измерения пяти эндокринно-разрушающих соединений (триклозан и бисфенол А, тетрабромбисфенол А, тетрабромбисфенол А бисаллилэфир и тетрабромбисфенол А бис(2,3-дибромпропиловый эфир)) в воде. Оптимизировано влияние экспериментальных параметров на три метода экстракции, таких как время процесса, концентрация сверхсшитых полимеров, температура экстракции, ионная сила и условия десорбции. Три ранее упомянутых метода обеспечили пределы обнаружения в диапазоне от 0,01 до 0,05 мкг/л и высокие показатели извлечения (85-99 %) с относительными стандартными отклонениями 1,7-5,6 %. В исследовании представлены достоинства и недостатки трех предложенных методов экстракции и их потенциал для эффективного мониторинга опасных загрязняющих веществ в реальных образцах воды.

Полимерные сорбенты, используемые для адсорбции органических веществ в медицинских целях

Разработан новый аналитический метод с использованием лекарственно-импринтированного полимера синтезированного полимеризацией N-винилкапролактама в качестве термочувствительного мономера, аллилацетоацетата в качестве функционального мономера, N,N'-метиленабисакриламида в качестве сшивающего агента, гемцитабина в качестве шаблона и азобисизобутиронитрила в качестве инициатора [27]. Исследовано влияние времени, pH и температуры на адсорбцию гемцитабина. Для определения полимера с лекарственным отпечатком использовались такие методы, как ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье, ТГА, элементный анализ и СЭМ. Полимер с лекарственным отпечатком использовался в качестве твердофазного экстрагента для определения следовых количеств гемцитабина в биологических жидкостях человека. Установлено, что полимерный сорбент селективно извлекал гемцитабин. Профиль поглощения гемцитабина с новым сорбентом показал хорошую доступность реакционно-способных участков в полимерном сорбенте с импринтингом. Данные равновесной адсорбции гемцитабина импринтированным полимером были оценены с помощью изотермических моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина. Представленный метод был успешно использован для определения гемцитабина в фармацевтических препаратах и биологических образцах человека с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии с отличными результатами.

Полимер с карбамазепиновым отпечатком на поверхности привит и синтезирован на поверхности SiO₂/оксид графена [28]. Сначала SiO₂ наносили на синтезированный лист оксида графена с использованием золь-гель технологии. Перед полимеризацией винильная группа была внедрена на поверхность SiO₂/оксид графена для прямой селективной полимеризации. Метакриловая кислота, диметакрилат этиленгликоля и этанол использовались в качестве мономера, сшивающего агента и порогена соответственно. Неимпринтированный полимер также был подготовлен для сравнения. Свойства молекулярно-импринтированного полимера были охарактеризованы с использованием полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии и ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. Поверхностный молекулярно-импринтированный полимер использовался в качестве адсорбента дисперсионной твердофазной экстракции для разделения и предварительного концентрирования карбамазепина. Были исследованы и оптимизированы эффекты различных параметров, влияющих на эффективность экстракции, таких как pH образца. Специфичность молекулярно-импринтированного полимера по сравнению с неимпринтированным полимером была исследована в отсутствие и в присутствии конкурирующих препаратов. Калибровочная кривая карбамазепина показала линейность в диапазонах 0,5-500 мкг/л. Пределы об-

наружения и количественного определения в оптимизированных условиях составили 0,1 и 0,3 мкг/л соответственно. Относительные стандартные отклонения в течение дня и между днями ($n=3$) составили 3,6 и 4,3 % соответственно. Кроме того, относительные восстановления для биологических образцов с добавлением были выше 85 %.

В работе [29] использовались методы полимеризации в объеме и при осаждении для получения полимеров с молекулярным отпечатком ибупрофена. Полимер синтезирован в ацетонитриле, аналогично соединению, полученному в смеси ацетонитрил/толуол (75:25 об %). Данные анализа адсорбции-десорбции N_2 показали, что молекулярно-отпечатанный полимер, синтезированный при осаждении (смесь) имеет самую высокую удельную площадь поверхности (200,74 м²/г). Химия поверхности и морфология синтезированных сорбентов исследованы с помощью ИК-анализа с преобразованием Фурье и СЭМ соответственно. Приготовленные сорбенты в смеси растворителей использовались в процессе дисперсионной твердофазной экстракции для селективной экстракции, а также предварительного концентрирования ибупрофена из образцов мочи и плазмы человека. Пределы обнаружения составили 62,91 и 7,89 нг/мл с использованием молекулярно-отпечатанного полимера, полученного в объеме и при осаждении соответственно. Кроме того, сорбенты показали селективное поведение при извлечении ибупрофена в присутствии напроксена, фенпрофена и кетопрофена. В целом результаты показали, что метод осаждения в смеси ацетонитрил/толуол привел к получению сорбента с самой высокой эффективностью экстракции. Также было проведено фармакокинетическое исследование. Максимальная концентрация в плазме, время, необходимое для достижения максимальной концентрации в плазме, и период полувыведения из плазмы составили 28,95 мкг/мл, 2 и 2,39 ч соответственно.

Новый сорбент для твердофазной экстракции с молекулярным отпечатком l-фенилаланина синтезирован путем сочетания полимеризации эмульсии Пикеринга и импринтинга шаблона ионно-парного образца [30]. По сравнению с другими методами полимеризации, молекулярно-отпечатанные полимеры, полученные таким образом, демонстрируют высокую удельную поверхность, большой диаметр пор и соответствующий размер частиц. Оптимизированы ключевые параметры для твердофазной экстракции, и результат показал, что полученный в работе молекулярно-отпечатанный полимер демонстрирует хорошее извлечение (98,9 % для l-фенилаланина). Сравнивая производительность молекулярно-отпечатанного полимера и коммерческого обращенно-фазового силикагеля, следует отметить, что разработанный материал является более подходящим в качестве сорбента для твердофазной экстракции, демонстрируя высокую точность (относительное стандартное отклонение 3,2 %, $n=4$) и низкий предел обнаружения (60,0±1,9 нмоль·л⁻¹) для выделения l-фенилаланина. На основании этих результатов сочетание вышеуказанных методов является эффективным для приготовления селективных сорбентов твердофазной

экстракции для разделения аминокислот и органических кислот из сложных биологических образцов.

Целью исследования [31] являлась разработка селективного молекулярно-импринтированного сорбента, предназначенного для твердофазной экстракции S-прамипексола из биологических жидкостей человека. Для этой цели в качестве шаблона, действующего как структурный аналог S-прамипексола, был использован S-2,6-диамино-4,5,6,7-тетрагидробензотиазол, а для получения молекулярно-импринтированных полимеров были использованы пять различных мономеров в присутствии диметакрилата этиленгликоля. Анализ связывающих способностей полученных полимеров показал, что наивысший эффект импринтинга был отмечен для полимера, полученного из итаконовой кислоты. Комплексный анализ морфологии и характеристика участков связывания показали не только незначительные различия в протяженности поверхностей импринтированных и неимпринтированных полимеров, но и более высокую гетерогенность участков связывания в импринтированном материале. Комплексная оптимизация молекулярно-импринтированной твердофазной экстракции позволила выбрать наиболее подходящие растворители для этапов загрузки, промывки и элюирования. Последующая оптимизация массы сорбента и объемов растворителей позволила достичь удовлетворительных общих показателей извлечения S-прамипексола из модельного многокомпонентного реального образца биологической жидкости человека, которые составили 91,8±3,2 % для импринтированного сорбента по сравнению с всего лишь 37,1±1,1 % для Oasis MCX.

В исследовании [32] для селективной экстракции эзетимиба применен новый эффективный адсорбент, разработанный на основе молекулярно-импринтированного на поверхности модифицированных магнитных наночастиц с олеиновой кислотой (МНЧ) полимера. Магнитный молекулярно-импринтированный полимер (ММИП) полимеризован на поверхности модифицированных МНЧ с использованием метакриловой кислоты в качестве функционального мономера, эзетимиба в качестве шаблона и этиленгликольдиметакрилата в качестве сшивающего агента. Полученный ММИП показал высокую адсорбционную емкость, хорошую селективность и быстрое кинетическое связывание для молекулы шаблона. Он был охарактеризован методами ИК-анализа с преобразованием Фурье, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Максимальная адсорбционная емкость ММИП составила 137,1 мг г⁻¹, а для достижения равновесного состояния потребовалось около 20 мин. Модель адсорбента подобрана с помощью уравнений изотермы Фрейндлиха и Ленгмюра. Анализ показал линейный диапазон 0,003-20,000 мг L⁻¹ для эзетимиба с коэффициентом корреляции 0,995. Относительные стандартные отклонения для восстановлений были <5,2. Метод также проверен для анализа эзетимиба в биологических образцах.

В работе [33] представлен чувствительный и селективный метод молекулярно-импринтированной твердофазной экстракции (МИТЭ)-спектрофлуориметрии для удаления атенолола из биологической

жидкости человека и его определения. Молекулярно-импринтированные и неимпринтированные полимеры синтезированы методом радикальной цепной полимеризации и использованы в качестве сорбентов твердофазной экстракции. В качестве функционального мономера, сшивающего агента, инициатора и порогена использовались акриловая кислота, этиленгликоль диметакрилат, дибензоилпероксид и дихлорэтан соответственно. Калибровочная кривая для разработанного метода находилась в диапазоне 0,10-2,0 мкг/мл. Предел обнаружения и предел количественных значений составили 0,032 и 0,099 мкг/мл соответственно. Благодаря селективности метода МИТЭ и чувствительности спектрофлуориметрии следовые уровни атенолола были успешно определены как из органических, так и из водных сред. Получены относительно высокие показатели импринтинга (4,18) и восстановления (74,5-75,3 %). Кроме того, внутри- и междневные значения точности составили 0,38-1,03 % и 0,47-2,05 % соответственно, что подтверждает точность предлагаемого метода. Таким образом, был разработан и применен селективный, чувствительный и простой МИТЭ-спектрофлуориметрический метод для прямого определения атенолола в биологической жидкости человека.

Целью исследования [34] являлась разработка полимерных хемосорбентов с высокой плотностью нингидриновых групп, способных ковалентно связывать мочевины в физиологических условиях и, таким образом, потенциально подходящих для использования в носимой искусственной почке. Макропористые гранулы готовили путем суспензионной полимеризации 5-винил-1-инданона (винилинданона) с использованием смеси толуола и нитробензола (90:10 об %) в качестве порогена. Затем инданоновые группы окисляли в одностадийной процедуре в нингидриновые. Кинетика поглощения мочевины оценивалась как в статических, так и в динамических условиях при 37 °С в моделируемом диализате (мочевина в фосфатном буферном растворе). В статических условиях и при молярном соотношении нингидрина и мочевины 1:1 гранулы сорбента извлекают $\approx 0,6-0,7$ ммоль $г^{-1}$, а в динамических условиях и при молярном избытке нингидрина 2:1 $\approx 0,6$ ммоль мочевины $г^{-1}$ сорбента за 8 ч при температуре 37 °С, что является уверенным шагом на пути к созданию носимой искусственной почки.

Металлоорганические каркасы (МОК) U_iO-66 (разработка Университета Осло) и NH_2-U_iO-66 получены и охарактеризованы как сорбенты (антидотные агенты) для адсорбции куркумина (К) [35]. Структура продуктов была охарактеризована с помощью порошковой рентгеновской дифракции, полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии, ТГА, ИК- спектроскопии с преобразованием Фурье с ослабленным полным внутренним отражением и измерений адсорбции-десорбции N_2 . Метод микроскопии показал, что структура NH_2-U_iO-66 представляет собой симметричные кристаллы с морфологией треугольной пирамиды с размером частиц около 100 нм и равномерным распределением по размерам. В настоящем исследовании изучены адсорб-

ционные способности К/МОК с различными массовыми соотношениями в исходных компонентах. Показало, что при массовом соотношении К/МОК около 0,4, абсорбционная способность NH_2-U_iO-66 стремилась к максимуму. Хотя функционализация уменьшала удельную площадь поверхности и свободный объем, введение полярных аминогрупп могло улучшить сродство NH_2-U_iO-66 к К. Кинетические исследования показали, что полученные данные хорошо согласуются с моделью псевдвовторого порядка. Анализ показал, что МОК в диапазоне концентраций 0-560 мкг/мл не оказывали цитотоксического действия на нормальную клеточную линию фибробластов человека (HFF-2). Результаты свидетельствуют о том, что разработанные МОК могут быть безопасными в качестве сорбента для адсорбции К из организма.

В работе [36] разработана биосорбционная дисперсионная жидкостно-жидкостная микроэкстракция (БиоДЖЖМЭ) в сочетании с магнитной твердофазной экстракцией (МТФЭ) в качестве метода предварительной обработки образца с высоким коэффициентом обогащения для чувствительного определения ибупрофена в образцах воды. Сначала синтезировали магнитные наночастицы Fe_3O_4 /полипиррол, которые использовались в качестве сорбента для МТФЭ ибупрофена. После элюирования желаемого соединения из сорбента с использованием метанола применяли технологию БиоДЖЖМЭ на полученном растворе. После МТФЭ элюент использовался в качестве диспергирующего растворителя для БиоДЖЖМЭ, чтобы можно было достичь дополнительного коэффициента предварительной концентрации. Свойства приготовленного магнитного сорбента были охарактеризованы с использованием методов полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье и рентгеновской дифракции (РД). Изучены и оптимизированы экспериментальные параметры, влияющие на эффективность экстракции. При оптимальных условиях коэффициент обогащения составил 274. Линейный динамический диапазон и предел обнаружения составляют 0,25-80 и 0,083 мкг/л соответственно. Относительные стандартные отклонения для шести повторных измерений составляют 3,82 %.

В исследовании [37] в качестве нового метода модификации использовано декорирование наноструктурированного сорбента на электропряденых нановолокнах из полиакрилонитрила для изготовления тонких пленок. Цеолитные имидазолятные каркасы непосредственно выращены на поверхности полиакрилонитрильных нановолокон и впервые применены для тонкопленочной твердофазной микроэкстракции флуоксетина. Эффективность экстракции разработанной пленки сравнивалась с эффективностью электропряденых нановолокон, модифицированных обычным методом легирования наночастиц в нановолокна. Декорированные нановолокна показали в 30 раз большую площадь поверхности и в четыре раза более высокую эффективность экстракции, чем легированные нановолокна для экстракции флуоксетина. Параметры эффективности экстракции и десорбции

флуоксетина оптимизированы с использованием метода «один фактор за раз». В оптимальных условиях пределы обнаружения и количественного определения составляли 0,5 и 2 нг/мл соответственно. Линейный динамический диапазон разработанного метода составил 2-2500 нг/мл ($R^2=0,997$). Относительное стандартное отклонение метода составило <14,2 %. Абсолютное извлечение составило 45 %, а относительное извлечение составило 77,3-97,5 %. Разработанный метод является простым и чувствительным методом определения флуоксетина в образцах окружающей среды и биологических образцах человека.

Полимерные сорбенты для адсорбции металлов

В публикации [38] описан синтез силикагеля с импринтированными ионами Fe(III), функционализированного группами фосфоновой кислоты, при помощи технологии поверхностного импринтинга с использованием иона Fe(III) в качестве шаблона, привитого силикагеля в качестве носителя и винилфосфоновой кислоты (ВФК) в качестве функционального мономера. Полимер был охарактеризован с помощью ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, анализа Брунауэра-Эммета-Теллера и ТГА. Синтезированный силикагель с импринтированными ионами Fe(III) использовался в качестве сорбента для адсорбции Fe(III). Изучены адсорбционные свойства, такие как влияние pH раствора, кинетика, изотерма и селективность адсорбции, а также регенерация сорбента. Результаты показали, что разработанный сорбент имел короткое время адсорбционного равновесия (12 мин) и высокую адсорбционную емкость ($29,92 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$) для Fe(III) при оптимальном значении pH - 2,0. Коэффициенты селективности сорбента для Fe(III) в присутствии Cr(III), Mn(II), Zn(II) составили 51,76, 27,86 и 207,76 соответственно. Более того, адсорбционная емкость материала существенно не снизилась после шестикратного повторного использования. Таким образом, приготовленный ионно-импринтированный силикагельный полимер является перспективным материалом в качестве сорбента для селективной адсорбции Fe(III) из водных растворов.

В исследовании [39] авторы синтезировали полимер с ионным отпечатком в качестве чувствительного электрохимического сенсора для определения иона Cr(III). Полимер с ионным отпечатком Cr(III) изготовлен на платиновом электроде. Благодаря наличию нанослоя на полимере с ионным отпечатком со специфическими участками связывания, сенсор быстро реагировал на ион Cr(III) и мог использоваться для его селективного извлечения. Полимер получен с использованием метакриловой кислоты в качестве функционального мономера, N,N'-метиленис-акриламида в качестве сшивающего агента, пероксодисульфата калия в качестве инициатора и иона Cr(III) в качестве молекулы-шаблона. Неимпринтированные полимеры также были подготовлены для сравнительных исследований. Синтезированный полимер был охарактеризован с помощью ИК-спектро-

скопии с преобразованием Фурье, ПЭМ, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и РД. Предел обнаружения платинового многослойного углеродного нанотрубчатого ионного полимерного сенсора с использованием дифференциальной импульсной вольтамперометрии составил $0,051 \text{ мкмоль} \cdot \text{л}^{-1}$. Более того, предложенный метод был эффективно использован для обнаружения и извлечения ионов Cr(III) в реальных образцах, собранных в металлургической промышленности.

В исследовании [40] сообщается о синтезе и характеристике нового мономера на основе акриламида, содержащего роданиновый фрагмент, N-3-аминотиазолидин-4-он-акриламида (АТА). Наночастицы магнетита (НЧМ) с привитым поли(АТА)-g-НЧМ получены методом радикальной полимеризации с переносом атома, инициируемой поверхностью мономера на наночастицах Fe_3O_4 . Привитые наночастицы охарактеризованы с помощью ИК-анализа с преобразованием Фурье, СЭМ, РД и магнитометрии с вибрирующим образцом. Количество привитого полимера составило $209 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$, рассчитанное из эксперимента по термогравиметрическому анализу. Способность поли(АТА)-g-НЧМ удалять катионы Co(II) показана при оптимальных условиях времени контакта, pH, дозировки адсорбента и начальной концентрации Co(II). Около 86 % катионов Co(II) были удалены в течение 7 минут. Кинетика адсорбции подчинялась уравнению псевдвторого порядка, а модель Ленгмюра наилучшим образом описывала изотерму адсорбции с максимальной емкостью $3,62 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$. Термодинамическое исследование показало спонтанный характер процесса адсорбции ($\Delta G = -2,90 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ при $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). Кроме того, поли(АТА)-g-НЧМ регенерированы простой промывкой водным раствором $0,1 \text{ M HCl}$. Исследование возможности повторного использования приготовленного магнитного сорбента показало, что сорбент может быть повторно использован без существенного снижения эффективности экстракции и может быть извлечен на 95,4 % после 7 циклов. Результаты свидетельствуют о том, что привитые наночастицы являются стабильным и повторно используемым адсорбентом и потенциально могут быть применены для очистки воды для эффективного удаления катионов Co(II).

В работе [41] применен новый метод синтеза р-(2,2,3,3-тетрацианоциклопропил)фенилакрилата (р-ТЦФ). В этом методе р-акрилоилоксибензальдегид реагировал с малонитрилом и бромистым цианом при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение короткого времени. Затем мономер р-ТЦФ полимеризовался свободнорадикальным способом для получения поли-(2,2,3,3-тетрацианоциклопропил) фенилакрилата с мультицианоциклопропановыми функциональными группами в боковых ответвлениях. Нитрильные функции в боковых группах полученного полимера были восстановлены до первичных аминов с использованием солей NaBH_4 и NiCl_2 при $65 \text{ }^\circ\text{C}$ в сухом этаноле для получения поли(2,2,3,3-тетраметиленаминоциклопропил)фенилакрилата (ПТАФ) в качестве нового полимера, растворимого в ацетоне и этилацетате. ПТАФ исследовали на предмет удаления ионов Cu(II), Ni(II), Zn(II) и Cr(III) из водных растворов в различных условиях

и значениях pH. Скорость адсорбции была высокой (<60 мин). Комплексообразование выбранных ионов тяжелых металлов ПТАФ сильно зависит от pH среды, и адсорбция всех выбранных ионов металлов была более благоприятной при pH 7. Также максимальная сорбция ПТАФ для выбранных ионов металлов в конкурентных условиях установлена для Cu(II) при pH 7. Значение k_d рассчитано для полученного хелатирующего полимера, и результат показывает высокие значения в случае иона Cu(II). Синтезированный полимер и его хелаты металлов были охарактеризованы с помощью ИК-Фурье-спектроскопии, ^1H ЯМР, ТГА, УФ-видимой спектроскопии и атомно-абсорбционной спектрометрии.

Сообщается о сополимеризационном синтезе новых адсорбентов поли(аллилизотиоцианат-со-гидроксиэтилметакрилат-со-винилимидазол) (ПАГВ) для удаления тяжелых металлов [42]. В исследовании реакция осуществлялась путем фотополимеризации с использованием бензофенона в качестве фотоинициатора. Химическая структура адсорбентов ПАГВ контролировалась и оценивалась с помощью ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье, ^1H -ЯМР и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Анализ поверхности и распределение молекулярной массы адсорбентов ПАГВ выполнялись с помощью СЭМ и анализа гель-проникающей хроматографии соответственно. Метод адсорбции, который является одним из наиболее эффективных, использовался для устранения ионов тяжелых металлов из водных растворов. Чтобы понять адсорбционную емкость и эффективность удаления ионов тяжелых металлов ПАГВ, исследованы влияние pH и соотношения мономеров в адсорбентах. Для анализов использовался масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой. Оптимальные значения pH для адсорбционной емкости и эффективности удаления ионов тяжелых металлов составили 6-8. Эффективность удаления ионов тяжелых металлов различными адсорбентами ПАГВ уменьшалась в следующем порядке: $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Co}^{3+} > \text{Cr}^{3+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$.

В работе [43] получен ряд легкодоступных амфифильных пирен- и периленсодержащих флуоресцентных материалов путем сополимеризации 2-акриламидо-2-метил-1-пропансульфоновой кислоты с акрилатными эфирами, которые могут быть использованы для обнаружения ионов тяжелых металлов в микромолярном диапазоне концентраций в водных растворах. Включение этих амфифильных сополимеров в полувзаимопроникающие гидрогели также привело к необратимому удалению двухвалентных ионов Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} из водных растворов при нейтральном pH.

В исследовании [44] изучено набухание и способность к селективной адсорбции ртути новых радиационно-сшитых сополимеров акриламида и кротоновой кислоты (АА/КК) в водных растворах ионов ртути (II). Эксперименты по набуханию проводились в воде и растворе ионов ртути (II) при 25 °С гравиметрическим методом. Значения равновесного набухания (S) гидрогелей АА/КК были рассчитаны как 11,00 г жидкости (г геля) $^{-1}$ (в растворе ионов ртути

(II)) - 35,90 г жидкости (г геля) $^{-1}$ (в воде). Для сорбции ионов ртути (II) на АА/КК гидрогели были изучены методом периодической сорбции при 25 °С. Исследована кинетика адсорбции системы гидрогель-ион ртути (II) и рассчитаны некоторые кинетические параметры. В экспериментах по адсорбции была обнаружена адсорбция L2-типа (тип Ленгмюра-2) по системе классификации Джайлса. Кроме того, изучено влияние концентрации ионов ртути (II), дозы облучения и содержания КК в гидрогелях, температуры среды и противоионов в соединениях ртути. Тест селективности гидрогеля был проведен в водном растворе ионов других металлов, таких как ионы меди (II), свинца (II) и кадмия (II). Гидрогели АА/КК сорбировали ионы ртути (II) из раствора ртути, в то время как гидрогель не сорбировал ионы тяжелых металлов.

В работе [45] методом свободнорадикальной сополимеризации получены сополимеры хлорида 2,2-диаллил-1,1,3,3-тетраэтилгуанидиния с N-замещенными малеимидами. Методом низкотемпературной адсорбции определены удельная поверхность и пористость исследуемых сополимеров. Исследована сорбционная емкость сополимеров по отношению к ионам Re(VII), Mo(VI), Ni(II) и Cu(II). Изучено влияние времени обработки, температуры и pH на сорбцию ионов металлов.

Двумерный координационный полимер на основе $\text{Ce}(\text{III})$, $[\text{Ce}_2(\mu_3\text{-atr})_2(\mu_2\text{-atr})(\text{H}_2\text{O})_8] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (1) ($\text{atr} = 2$ -аминотерефталат) синтезирован методом диффузии растворителя [46]. Соединение охарактеризовано с помощью рентгеновской дифракции монокристалла, порошковой РД, ТГА и ИК-Фурье спектроскопии. Координационный полимер (1) использовался в качестве сорбента для удаления Cd^{2+} и Pb^{2+} из воды при комнатных условиях. Соединение (1) показало такое же сродство к адсорбции ионов металла и могло быть повторно использовано для процесса адсорбции после простой обработки.

Дефицит поставок редкоземельных элементов (РЗЭ) требует недорогих и эффективных процессов для извлечения ценных материалов РЗЭ. Ковалентно-связанная система полиэтиленимин-эпоксисилан-силикатный сорбент приготовлена мокрой пропиткой и использована для селективного разделения РЗЭ на тяжелые и легкие группы элементов [47]. Примечательно, что сорбент позволил циклически извлечь >80 % РЗЭ на уровне ppb и около 0 % Na, Mg, Ca на уровне ppm из раствора дренажа кислых шахт, тем самым подтверждая применимость сорбента для концентрирования РЗЭ из промышленных потоков отходов. Более того, сорбент является перспективным для предварительного концентрирования 7,6 % масс РЗЭ, что превышает целевой показатель по требованию Министерства энергетики США. Примечательно, что использование иммобилизованного аминсорбента для селективного разделения более тяжелых РЗЭ с помощью процесса адсорбции-элюции позволило сконцентрировать и отделить только более тяжелые виды (>99 % Dy+Yb). Таким образом, метод с применением разработанного авторами материала представляет собой практичную и высокоэф-

эффективную процедуру адсорбции-десорбции сорбента, которая одновременно концентрирует и отделяет высокочистые РЗЭ от источников РЗЭ с низкой концентрацией.

Синтезированы гидроксиалкильные производные полиаминостирола (ПАС), полиаллиламина (ПАА) и полиэтиленimina (ПЭИ), содержащие 2,3-дигидроксипропильный фрагмент с высокой степенью модификации [48]. Химическая структура продуктов полимерной трансформации была охарактеризована с помощью элементного анализа, ИК-Фурье-спектроскопии, ^1H -ЯМР- и ^{13}C -ЯМР-спектроскопии в твердом состоянии. ПАС реагировал с глициолом и образовывал поли[N-(2,3-дигидроксипропил)аминостирол] с высокой степенью функционализации. ПАА в первую очередь продемонстрировал способность к привитой полимеризации глицидола. В случае ПЭИ первичные аминогруппы позволили образовать N-производное 3-аминопропандиола-1,2. Сорбент на основе ПАА показал высокую сорбционную емкость по отношению к ионам бора как в кислых, так и в щелочных средах. По данным изотермы сорбции максимальная сорбционная емкость данного сорбента при $\text{pH}=4$ составила 3 ммоль/г. Материал на основе ПАС сохранял высокую емкость в диапазоне pH от 9 до 12, а оптимальное значение pH составило 12 при сорбционной емкости 1,7 ммоль/г.

В работе [49] методом поликонденсации синтезирован полиуретан (ПУ), содержащий участки связывания металлов. Продукт охарактеризован с использованием методов ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье, ^1H -ЯМР и ТГА. Структурная морфология полиуретана проанализирована с помощью СЭМ, а полимер использовался в качестве адсорбента для извлечения металлов. Анализ экспериментальных данных показал, что максимальная адсорбция была получена при $\text{pH}=6$ с дозой адсорбента 20 мг/л при времени контакта 60 мин для 100 мг/л Pb(II) и Cu(II) в качестве начальной концентрации ионов металла. Из изотермы Ленгмюра была получена максимальная адсорбционная емкость монослоя 496 мг/г и 481,8 мг/г для ионов Pb(II) и Cu(II) соответственно. Из уравнения псевдотортого порядка значения R_2 для Pb(II) и Cu(II) оказались равными 0,9984 и 0,9958. Обнаружено, что ПУ стабилен после 5 циклов с 0,1 N H_2SO_4 , что позволяет предположить химическую стабильность синтезированного продукта и возможность его использования в качестве потенциального адсорбента для экстракции тяжелых металлов в водной среде.

Извлечение индия из пропиточных смол в воде обычно ограничивается слабой связью экстрагента со смолой. Гидрогели эмульсии Пикеринга (ГЭП), инкапсулирующие экстрагент - бис(2-этилгексил)фосфат, готовятся методом полимеризации эмульсий Пикеринга («масло в воде») с использованием поливинилового спирта и альгината натрия в качестве непрерывных фаз, а также нано- SiO_2 и алкилфенол-этоксилатов-10 (OP-10) в качестве эмульгаторов [50]. ГЭП используются для извлечения трехвалентного In(III) из воды с целью изучения его инкапсуляционных и адсорбционных свойств. Эмульсии Пикеринга

характеризовали с помощью оптической микроскопии, ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье и СЭМ. Результаты показали, что время стабилизации эмульсий Пикеринга улучшается с 3 мин до ≈ 14 дней после добавления 5 мас % OP-10. Внутренняя структура гидрогелей эмульсии Пикеринга-4 (4-ГЭП), полученных из эмульсий Пикеринга, совместно стабилизированных нано- SiO_2 и OP-10, изменяется со структуры типа ядро-оболочка на сотовую. При этом утечки масляной фазы не происходит. Адсорбция In(III) осуществляется на 4-ГЭП. Результаты показали, что максимальная адсорбция In(III) в воде 4-ГЭП составляет 18,03 мг г^{-1} . Процесс адсорбции In(III) контролируется хемосорбцией. Таким образом, исследование показало, что 4-ГЭП можно использовать в качестве эффективного адсорбента для извлечения индия из воды.

В работе [51] получен новый наноккомпозит $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ @основание Шиффа хитозана ($\text{Gd}/\text{SrFe}@\text{ОШХ}$), который был охарактеризован с помощью методов ИК-Фурье-спектроскопии, РД, ДСК, магнитометрии с вибрирующим образцом (МВО), СЭМ, рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии. Результаты подтверждают, что наноккомпозит $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ @основание Шиффа хитозана успешно синтезирован. МВО показал, что соединение имеет высокое насыщенное магнитное поле 17,35 emu/г с высокой коэрцитивной силой 4664 Oe. Кроме того, $\text{Gd}/\text{SrFe}@\text{ОШХ}$ использовали в качестве новых адсорбентов для удаления ионов Pb(II) и Cd(II) из водного раствора. Результаты показывают, что эффективность удаления Pb(II) (98 %) выше, чем иона Cd(II) (78 %). В наилучших условиях максимальная адсорбционная емкость для Pb(II) составляет 183,7, а для Cd(II) - 146,2 мг/г. Результаты по повторному использованию показывают, что эффективность адсорбции $\text{Gd}/\text{SrFe}@\text{ОШХ}$ оставалась выше 93 % для Pb(II) и 71 % для Cd(II) после пяти циклов адсорбции/десорбции. Было изучено влияние сосуществующих катионов и анионов, и подтверждено, что $\text{Gd}/\text{SrFe}@\text{ОШХ}$ имели селективную адсорбцию по отношению к Pb(II) .

Полимерные сорбенты, используемые для адсорбции газов

Синтез двумерных (2D) полимерных нанолитов с четко определенной микропористой структурой остается сложной задачей в материаловедении. В работе [52] синтезирован новый вид 2D микропористых углеродистых полимерных нанолитов путем полимеризации 1,4-дицианобензола низкой концентрации в расплавленном хлориде цинка при 400-500 °C. Данный тип нанолитов имеет толщину в диапазоне 3-20 нм с четко определенной микропористостью, большую площадь поверхности ($\sim 537 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$) и большой объем микропор ($\sim 0,45 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$). Микропористые углеродистые полимерные нанолиты демонстрируют превосходную способность сорбировать CO_2 (8,14 мас.% при 298 K и 1 бар) и относительно высокую селективность CO_2 по отношению к N_2 (25,6). Используя различные ароматические нитрильные мо-

номеры можно получить множество двумерных углеродистых полимерных наноллистов, что демонстрирует определенную универсальность ионотермического метода, описанного в настоящей работе.

Пластиковые отходы текстильной и строительной промышленности редко перерабатываются из-за отсутствия экономичных технологий. В исследовании [53] авторы получили из этих двух источников микропористый высокоселективный к адсорбции диоксида углерода (CO_2) сорбент, синтезируемый пиролизом отходов в присутствии активатора на основе соли калия. Свойства сорбента варьируются с изменением типа исходного пластика для получения различных степеней микропористости, площади поверхности и содержания азота. Лучший образец сорбента на основе нейлона 6,12 имел поглощение CO_2 19 % масс. ($4,32 \text{ ммоль г}^{-1}$) и 5 % масс. ($1,1 \text{ ммоль г}^{-1}$) при 1 и 0,1 бар соответственно. Эффективность сорбента при отделении CO_2 демонстрируется на различных исходных материалах, включая имитации дымового газа и при прямом улавливании воздуха.

В работе [54] изучены молекулярно-ситовые сорбенты (МСС) на основе полиаллиламина (ПАА) для улавливания CO_2 в сравнении с аналогичными материалами на основе полиэтиленimina (ПЭИ). Характеристики, включая физическую адсорбцию N_2 , структуру по данным инфракрасной Фурье-спектроскопии диффузного отражения показали, что ПАА ($M_n=15000$) более жесткий и имеет больше стерических препятствий внутри пор SBA-15, чем ПЭИ, в основном из-за различий структуры. Влияние температуры и концентрации ПАА на сорбционную способность CO_2 МСС на основе ПАА исследовано методом ТГА с использованием 100 % газового потока CO_2 и в сравнении с ПЭИ/SBA-15. Обнаружено, что емкость сорбента ПАА/SBA-15 увеличивается с повышением температуры. Оптимальная емкость - $88 \text{ мг}_{\text{CO}_2} \text{ г}_{\text{сорб}}^{-1}$ получена при $140 \text{ }^\circ\text{C}$ для ПАА(50)/SBA-15, тогда как оптимальная температура сорбции составила 75 и $90 \text{ }^\circ\text{C}$ для ПЭИ-I(50)/SBA-15 (ПЭИ-I, $M_n=423$) и ПЭИ-II(50)/SBA-15 (ПЭИ-II, $M_n=25000$) соответственно. Емкость первоначально увеличивалась с ростом загрузки ПАА, а затем падала при высоком содержании амина из-за возросшего диффузионного барьера. Самая высокая емкость CO_2 - $109 \text{ мг}_{\text{CO}_2} \text{ г}_{\text{сорб}}^{-1}$ была получена при содержании ПАА 65 мас. %, тогда как сорбент ПАА(50)/SBA-15 показал лучшую эффективность амина - $0,23 \text{ моль}_{\text{CO}_2} \text{ моль}_{\text{N}}^{-1}$. Влияние влаги исследовано в системе потока с неподвижным слоем с имитацией дымового газа, содержащего 15 % CO_2 и 4,5 % O_2 в N_2 . Обнаружено, что присутствие влаги значительно увеличило сорбцию CO_2 на ПАА(50)/SBA-15 и значительно улучшило его циклическую стабильность и регенерируемость. По сравнению с ПЭИ/SBA-15, ПАА/SBA-15 обладает лучшей термической стабильностью и более высокой устойчивостью к окислительной деструкции. Однако скорость сорбции CO_2 на сорбенте ПАА(50)/SBA-15 была намного медленнее.

Полимеры с внутренней микропористостью (ПВМ), такие как ПВМ-1 на основе спирибисиндана, являются одними из самых многообещающих материалов для создания газоразделительных мембран с

высокой проницаемостью для потенциального использования в промышленности. Авторами [55] показано, что сверхпроницаемые ПВМ могут быть получены путем сплавления жесткого триптицена с блоком спирибисиндана. ПВМ на их основе и его сополимер с ПВМ-1 (ПВМ-1/спирибисиндантриптицен) становятся сверхпроницаемыми после обработки метанолом ($P_{\text{CO}_2} > 20000$ Баррер). Измерения проницаемости в зависимости от температуры и анализ энтропийного и энергетического вкладов параметров переноса газа показывают, что улучшенная производительность полученных полимеров связана с их высокой жесткостью. Оба полимера показали относительно слабую зависимость от давления в экспериментах по проницаемости смешанного газа до 6 бар, что предполагает потенциальное использование для улавливания CO_2 из дымового газа или для улучшения качества биогаза.

Процессы прямого захвата воздуха (ПЗВ) для извлечения CO_2 из окружающей среды являются уникальными среди химических процессов, поскольку они работают на открытом воздухе с минимальной предварительной обработкой сырья. В работе [56] подробно изучено влияние влажности на окислительную деструкцию твердого сорбента амина, поли(этиленimina) (ПЭИ) на основе Al_2O_3 . Обобщая результаты измерений адсорбции CO_2 , скорости окислительной дегградации, элементного анализа, твердотельного ЯМР и ИК-спектроскопического анализа *in situ* достигается комплексная картина окисления сорбента в ускоренных условиях. Продемонстрировано, что присутствие водяного пара может играть важную роль в ускорении реакций деструкции. Из исследования сделан вывод об идентичности и кинетике образования основных окислительных продуктов, а также о роли(ях) влажности. Данные согласуются с радикальным механизмом автоокислительной деструкции.

Комбинация угольной летучей золы (ЛЗ) и поливинилхлорида (ПВХ) использовалась в работе [57] для гранулирования иммобилизованных аминных сорбентов CO_2 . Гранулирование смесей ЛЗ и 50 % мас тетраэтиленпентамина (ТЭПА) или смеси олигомеров этиленimina ($M_w=423$)/кремнезема ($\text{EI}_{423}\text{-S}$) с ПВХ привело к образованию жесткой сетки ПВХ/ЛЗ/сорбент. Прочность сетки отчасти обусловлена водородными связями ПВХ с гидроксильными и аминогруппами ЛЗ и сорбента, что подтвердилось данными инфракрасной спектроскопии. Увеличение молекулярной массы ПВХ или содержания ЛЗ повышало прочность материала и снижало улавливание CO_2 . Оптимальный образец, ЛЗ/ $\text{EI}_{423}\text{-S}$ (20/80)_ПВХ₆₂ [10 % мас ПВХ₆₂ ($M_w=62000$), 17 % мас ЛЗ], захватил $1,33 \text{ ммоль}^{\text{CO}_2} \text{ г}^{-1}$ и показал прочность $1,42 \text{ МПа}$. В результате реакции между ПВХ и аминами образовывались ионы аммония ($-\text{NH}_3^+/-\text{NH}_2^+$), что уменьшало количество CO_2 , захваченного материалом во время испытания на стабильность. Проблема частично решена путем замены ПВХ₆₂ на ПВХ₆₂, модифицированный п-фенилендиамином, что также увеличило улавливание CO_2 до $1,5 \text{ ммоль}^{\text{CO}_2} \text{ г}^{-1}$.

Четыре мономера типа бис(пиридил)ацетилена и бис[(пиридил)этинил]бензола, содержащие либо 2-

пиридилные, либо 4-пиридилные группы, полимеризуются без катализатора активацией 1,4-бис(бромметил)бензолом в качестве агента кватернизации (АК) с образованием соответствующих сеток типа сопряженного полиэлектролита (СПЭ) [58]. Сетки СПЭ характеризовали элементным анализом, ТГА, ^{13}C ЯМР с использованием техники кросс-поляризации с вращением под магическим углом, ИК, УФ/видимой и фотолюминесцентной спектроскопией. Предложена высокосшитая структура сетки, содержащая как π -сопряженные цепи полиацетиленового типа, так и ионные цепи чередующегося типа. Согласно элементному анализу, мольное соотношение звеньев, полученных из молекул мономера и молекул АК, близко к единице во всех образцах. Сетки СПЭ на основе 4-пиридиловых мономеров демонстрируют сильную фотолюминесценцию в видимой области после облучения светом с длиной волны 378 нм. Образцы также показывают умеренную эффективность при сорбции CO_2 до $13,6 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$ и исключительно высокую эффективность захвата паров этанола до 24,5 мас. % (293 К). Предполагается, что специфические взаимодействия ионной сетки и адсорбированных молекул, а также временное образование пор играют важную роль в процессах сорбции.

Заключение

Настоящий обзор посвящен анализу современных тенденций в области разработки и применения полимерных сорбентов. Отмечено, что преимущественными сегментами их использования являются адсорбция органических соединений, в том числе для медицинских целей, а также концентрирование и отделение металлов и газов.

Анализ многочисленных литературных источников показал, что для адсорбции органических веществ широко и успешно применяются молекулярно-импринтированные полимеры на основе акриловых соединений и их сополимеров, полиимиды и полианилин. Кроме того, перспективным направлением является применение полисилоксанов и других эластомерных композиций вследствие из развитой пористой структуры.

Для адсорбции металлов наибольшее применение нашли также полимеры с импринтированными шаблонами различных молекул, полиакрилаты, полиимины, а также различные соединения на основе каучуков.

В ходе анализа литературы, посвященной полимерным сорбентам, используемым для адсорбции газов, сделать однозначный вывод о предпочтениях исследователей не представляется возможным, так как их внимание сосредоточено на широком спектре химических соединений.

Литература

1. F. Augusto, L. W. Hantao, N. G. S. Mogollon, S. C. G. N. Braga, *Trends in Analytical Chemistry*, **43**, 14-23 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.08.012>.
2. Ю. А. Тунакова, Е. С. Мухаметшина, Ю. А. Шмакова, *Вестник Казанского технологического университета*, **10**, 96-100 (2011).
3. Ю. А. Тунакова, Р. А. Файзуллина, Ю. А. Шмакова, *Вестник Казанского технологического университета*, **5**, 57-61 (2011).
4. C. F. Poole, *Trends in Analytical Chemistry*, **22**, 6, 362-373 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)00605-8](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)00605-8).
5. F. Lanza, B. Sellergren, *Chromatographia*, **53**, 599-611 (2001). <https://doi.org/10.1007/BF02493006>.
6. D. Li, X. Qiao, J. Lu, Z. Xu, *Advances in Polymer Technology*, **37**, 4, Article 21745 (2018). <https://doi.org/10.1002/adv.21745>.
7. M. Kechagia, V. Samanidou, A. Kabir, K. G. Furton, *Journal of Separation Science*, **41**, 723-731 (2018). <https://doi.org/10.1002/jssc.201701205>.
8. M. Zarejousheghani, S. Schrader, M. Moder, M. Schmidt, H. Borsdorf, *Journal of Molecular Recognition*, **31**, Article e2629 (2018). <https://doi.org/10.1002/jmr.2629>.
9. R. Ardekani, S. Borhani, B. Rezaei, *Polymer International*, **69**, 9, 780-793 (2020). <https://doi.org/10.1002/pi.6013>.
10. L. Szajnecki, B. Gawdzik, *Polymers for Advanced Technologies*, **30**, 7, 1595-1604 (2019). <https://doi.org/10.1002/pat.4590>.
11. Z. Meng, Z. Liu, J. Fan, J. Li, W. Zhou, H. Gao, R. Lu, *Journal of Separation Science*, **44**, 20, 3830-3839 (2021). <https://doi.org/10.1002/jssc.202100502>.
12. Z. Liu, Z. Meng, J. Fan, J. Li, W. Zhou, H. Gao, S. Zhang, R. Lu, *Journal of Separation Science*, **44**, 15, 2957-2964 (2021). <https://doi.org/10.1002/jssc.202100230>.
13. K. Yavir, P. Eor, A. Kloskowski, J. L. Anderson, *Journal of Separation Science*, **44**, 13, 2620-2630 (2021). <https://doi.org/10.1002/jssc.202100119>.
14. A. Mehdinia, H. Haddad, S. Mozaffari, *Journal of Separation Science*, **39**, 17, 3418-3427 (2016). <https://doi.org/10.1002/jssc.201600337>.
15. N. Rattanakunsong, S. Jullakan, J. Plotka-Wasyłka, O. Bunkoed, *Journal of Separation Science*, **45**, 10, 1774-1783 (2022). <https://doi.org/10.1002/jssc.202200041>.
16. S. Tan, K. Saito, M. T. W. Hearn, *Journal of Separation Science*, **44**, 9, 1884-1892 (2021). <https://doi.org/10.1002/jssc.202001188>.
17. S. Choden, D. Deki, S. Maneeratanachot, N. Lehman, E. Kalkornsurapranee, M. Kaewpet, D. Sooksawat, I. Jeerapan, A. Numnuam, P. Kanatharana, P. Thavarungkul, C. Thammakhet-Buranachai, *Separation Science Plus*, **6**, 9, Article 2300005 (2023). <https://doi.org/10.1002/sscp.202300005>.
18. M. Saraji, M. T. Jafari, M. M. Amooshahi, *Journal of Separation Science*, **41**, 2, 493-500 (2018). <https://doi.org/10.1002/jssc.201700967>.
19. M. Nasiri, H. Ahmadzadeh, A. Amiri, *Journal of Separation Science*, **45**, 13, 2301-2309 (2022). <https://doi.org/10.1002/jssc.202100873>.
20. O. Bunkoed, T. Rueankaew, P. Nurerk, P. Kanatharana, *Journal of Separation Science*, **39**, 12, 2332-2339 (2016). <https://doi.org/10.1002/jssc.201600285>.
21. A. R. Ghasvand, L. Ghaedrahmati, N. Heidari, P. R. Haddad, S. Farhadi, *Journal of Separation Science*, **41**, 20, 3910-3917 (2018). <https://doi.org/10.1002/jssc.201800498>.
22. C. Liu, X. Liu, P. J. Marriott, H. Qian, Z. Meng, Z. Yang, R. Lu, H. Gao, W. Zhou, *Journal of Separation Science*, **42**, 8, 1610-1619 (2019). <https://doi.org/10.1002/jssc.201801159>.
23. M. M. Abolghasemi, H. Taheri, M. Jaymand, M. Piryaeei, *Separation Science Plus*, **1**, 3, 202-208 (2018). <https://doi.org/10.1002/sscp.201700036>.
24. M. Saraji, A. K. Behbahan, *Journal of Separation Science*, **39**, 18, 3616-3623 (2016). <https://doi.org/10.1002/jssc.201600056>.
25. X. Tan, P. Dewapriya, P. Prasad, Y. Chang, X. Huang, Y. Wang, X. Gong, T. E. Hopkins, C. Fu, K. V. Thomas, H. Peng, A. K. Whittaker, C. Zhang, *Angewandte Chemie*, **134**,

- Article e202213071 (2022).
<https://doi.org/10.1002/anie.202213071>.
26. G. Huang, M. Su, W. Zhang, Y. Liu, C. Chen, S. Li, *Journal of Separation Science*, **45**, 3, 760-770 (2022).
27. M. Gomar, H. A. Panahi, E. Pournamdari, *Chemistry Select*, **3**, 2571-2577 (2018).
28. F. Khalilian, S. Ahmadian, *Journal of Separation Science*, **39**, 1500-1508 (2016).
<https://doi.org/10.1002/jssc.201501392>.
29. B. Ebrahimi, S. Mozaffari, S. Mohammadiazar, *Journal of Separation Science*, **45**, 13, Article 2201031 (2023).
<https://doi.org/10.1002/jssc.202201031>.
30. J. Li, X. Hu, P. Guan, X. Zhang, L. Qian, N. Zhang, C. Du, R. Song, *Journal of Separation Science*, **39**, 10, 1863-1872 (2016).
<https://doi.org/10.1002/jssc.201600055>.
31. M. Woznica, P. Lulinski, *Journal of Separation Science*, **42**, 7, 1412-1422 (2019).
<https://doi.org/10.1002/jssc.201801101>.
32. M. Peyrovi, M. Hadjmohammadi, I. Saeidi, *Biomedical Chromatography*, **33**, 1, Article e4404 (2019).
<https://doi.org/10.1002/bmc.4404>.
33. Y. Gorbani, H. Yilmaz, H. Basan, *Luminescence*, **32**, 8, 1391-1397 (2017).
<https://doi.org/10.1002/bio.3335>.
34. J. A. W. Jong, Y. Guo, D. Hazenbrink, S. Douka, D. Verdjik, J. van der Zwan, K. Houben, M. Baldus, K. C. Scheiner, R. Dalebout, M. C. Verhaar, R. Smakman, W. E. Hennink, K. G. F. Gerritsen, C. F. van Nostrum, *Macromolecular Bioscience*, **20**, Article 1900396 (2020).
<https://doi.org/10.1002/mabi.201900396>.
35. H. Molavi, M. Zamani, M. Aghajanzadeh, H. K. Manjili, H. Danafar, A. Shojaei, *Applied Organometallic Chemistry*, **32**, 4, Article e4221 (2018).
<https://doi.org/10.1002/aoc.4221>.
36. S. A. Haeri, S. Abbasi, S. Sajjadifar, *Electrophoresis*, **38**, 21, 2765-2770 (2017).
<https://doi.org/10.1002/elps.201700245>.
37. A. Aghakhani, A. Ghanbari, A. Haghighi Asl, A. Khanlarkhani, *Separation Science Plus*, **4**, 1, 36-44 (2021).
<https://doi.org/10.1002/sscp.202000071>.
38. H. He, Q. Gan, C. Feng, *Journal of Applied Polymer Science*, Article 45165 (2017).
<https://doi.org/10.1002/app.45165>.
39. A. Aravind, B. Mathew, *Polymer International*, **67**, 1595-1604 (2018).
<https://doi.org/10.1002/pi.5683>.
40. A. Rahmaninia, Y. Mansoori, F. Nasiri, *Polymers Advanced Technologies*, **29**, 1988-2001 (2018).
<https://doi.org/10.1002/pat.4307>.
41. M. Hosseinzadeh, N. Noroozi Pesyan, P. Najafi Moghadam, *Advances in Polymer Technology*, **37**, 2, Article 21685 (2018).
<https://doi.org/10.1002/adv.21685>.
42. F. Saltan, G. Murat Saltan, *Journal of Applied Polymer Science*, **139**, Article 52639 (2022).
<https://doi.org/10.1002/app.52639>.
43. A. A. Alwattar, A. Haddad, J. Moore, M. Alshareef, C. Bartlam, A. W. Woodward, L. S. Natrajan, S. G. Yeates, P. Quayle, *Polymer International*, **70**, 59-72 (2021).
<https://doi.org/10.1002/pi.6086>.
44. D. Saraydin, E. S. Yildirim, E. Karadag, O. Guven, *Advances in Polymer Technology*, **37**, 3, 822-829 (2018).
<https://doi.org/10.1002/adv.21725>.
45. M. N. Gorbunova, T. D. Batueva, *Polymers Advanced Technologies*, **28**, 152-158 (2017).
<https://doi.org/10.1002/pat.3869>.
46. A. Abbasi, S. Amirshakeri, M. Najafi, H. Shahbaazi, *Chemistry Select*, **3**, 5480-5485 (2018).
<https://doi.org/10.1002/slct.201800061>.
47. Q. Wang, B. W. Kail, W. C. Wilfong, F. Shi, T. J. Tarka, M. L. Gray, *ChemPlusChem*, **85**, 1, 130-136 (2020).
<https://doi.org/10.1002/cplu.201900695>.
48. D. V. Nesterov, L. S. Molochnikov, O. V. Korjakova, M. I. Kodess, M. A. Ezhikova, A. V. Pestov, *Journal of Applied Polymer Science*, **133**, 39, Article 43939 (2016).
<https://doi.org/10.1002/app.43939>.
49. S. D. Kirupha, R. Narayanamy, M. Sornalatha, S. Sivanesan, L. Ravikumar, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **95**, 5, 944-953 (2017).
<https://doi.org/10.1002/cjce.22783>.
50. C. Dong, J. Gao, Y. Zhao, T. T. Ma, Y. He, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **224**, 11, Article 2300002 (2023).
<https://doi.org/10.1002/macp.202300002>.
51. S. A. Jasim, W. K. Abdelbasset, K. Hachem, M. M. Kadhim, G. Yasin, M. A. Obaid, B. A. Hussein, H. A. Lafta, Y. F. Mustafa, Z. H. Mahmoud, *Journal of the Chinese Chemical Society*, **69**, 7, 1079-1087 (2022).
<https://doi.org/10.1002/jccs.202200013>.
52. M. Zhang, L. Liu, T. He, G. Wu, P. Chen, *Chemistry - An Asian Journal*, **11**, 12, 1849-1855 (2016).
<https://doi.org/10.1002/asia.201600396>.
53. P. E. Savas, W. A. Algozeeb, Z. Wang, C. Kittrell, X. Wu, J. N. Hall, T. B. Malloy, P. Bollini, J. M. Tour, *Advanced Sustainable Systems*, **7**, 6, Article 2200436 (2023).
<https://doi.org/10.1002/adsu.202200436>.
54. D. Wang, X. Wang, C. Song, *A European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, **18**, 22, 3163-3173 (2017).
<https://doi.org/10.1002/cphc.201700828>.
55. C. G. Bezzu, A. Fuoco, E. Esposito, M. Monteleone, M. Longo, J. C. Jansen, G. S. Nichol, N. B. McKeown, *Advanced Functional Materials*, **31**, 37, Article 2104474 (2021).
<https://doi.org/10.1002/adfm.202104474>.
56. J. S. A. Carneiro, G. Innocenti, H. J. Moon, Y. Guta, L. Proano, C. Sievers, M. A. Sakwa-Novak, E. W. Ping, C. W. Jones, *Angewandte Chemie*, **135**, 24, Article e202302887 (2023).
<https://doi.org/10.1002/ange.202302887>.
57. W. C. Wilfong, M. L. Gray, B. W. Kail, B. H. Howard, *Energy Technology*, **4**, 5, 610-619 (2016).
<https://doi.org/10.1002/ente.201500419>.
58. T. Faulkner, A. Zukal, J. Brus, J. Zednik, J. Sedlacek, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **217**, 17, 1886-1898 (2016).
<https://doi.org/10.1002/macp.201600092>.

References

1. F. Augusto, L. W. Hantao, N. G. S. Mogollon, S. C. G. N. Braga, *Trends in Analytical Chemistry*, **43**, 14-23 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.08.012>.
2. I. Y. A. Tunakova, E. S. Mukhametshina, Y. A. Shmakova, *Herald of Kazan Technological University*, **10**, 96-100 (2011).
3. 2. Yu. A. Tunakova, R. A. Faizullina, Yu. A. Shmakova, *Herald of Kazan Technological University*, **5**, 57-61 (2011).
4. C. F. Poole, *Trends in Analytical Chemistry*, **22**, 6, 362-373 (2003).
[https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)00605-8](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)00605-8).
5. F. Lanza, B. Sellergren, *Chromatographia*, **53**, 599-611 (2001).
<https://doi.org/10.1007/BF02493006>.
6. D. Li, X. Qiao, J. Lu, Z. Xu, *Advances in Polymer Technology*, **37**, 4, Article 21745 (2018).
<https://doi.org/10.1002/adv.21745>.
7. M. Kechagia, V. Samanidou, A. Kabir, K. G. Furton, *Journal of Separation Science*, **41**, 723-731 (2018).
<https://doi.org/10.1002/jssc.201701205>.
8. M. Zarejousheghani, S. Schrader, M. Moder, M. Schmidt, H. Borsdorf, *Journal of Molecular Recognition*, **31**, Article e2629 (2018).
<https://doi.org/10.1002/jmr.2629>.
9. R. Ardekani, S. Borhani, B. Rezaei, *Polymer International*, **69**, 9, 780-793 (2020).
<https://doi.org/10.1002/pi.6013>.
10. L. Szajnecki, B. Gawdzik, *Polymers for Advanced Technologies*, **30**, 7, 1595-1604 (2019).
<https://doi.org/10.1002/pat.4590>.
11. Z. Meng, Z. Liu, J. Fan, J. Li, W. Zhou, H. Gao, R. Lu, *Journal of Separation Science*, **44**, 20, 3830-3839 (2021).
<https://doi.org/10.1002/jssc.202100502>.

12. Z. Liu, Z. Meng, J. Fan, J. Li, W. Zhou, H. Gao, S. Zhang, R. Lu, *Journal of Separation Science*, **44**, 15, 2957-2964 (2021). <https://doi.org/10.1002/jssc.202100230>.
13. K. Yavir, P. Eor, A. Kloskowski, J. L. Anderson, *Journal of Separation Science*, **44**, 13, 2620-2630 (2021). <https://doi.org/10.1002/jssc.202100119>.
14. A. Mehdinia, H. Haddad, S. Mozaffari, *Journal of Separation Science*, **39**, 17, 3418-3427 (2016). <https://doi.org/10.1002/jssc.201600337>.
15. N. Rattanakunsong, S. Jullakan, J. Plotka-Wasyłka, O. Bunkoed, *Journal of Separation Science*, **45**, 10, 1774-1783 (2022). <https://doi.org/10.1002/jssc.202200041>.
16. S. Tan, K. Saito, M. T. W. Hearn, *Journal of Separation Science*, **44**, 9, 1884-1892 (2021). <https://doi.org/10.1002/jssc.202001188>.
17. S. Choden, D. Deki, S. Maneeratanachot, N. Lehman, E. Kalkornsuraprane, M. Kaewpet, D. Sooksawat, I. Jeerapan, A. Numnuam, P. Kanatharana, P. Thavarungkul, C. Tham-makhet-Buranachai, *Separation Science Plus*, **6**, 9, Article 2300005 (2023). <https://doi.org/10.1002/sscp.202300005>.
18. M. Saraji, M. T. Jafari, M. M. Amooshahi, *Journal of Separation Science*, **41**, 2, 493-500 (2018). <https://doi.org/10.1002/jssc.201700967>.
19. M. Nasiri, H. Ahmadzadeh, A. Amiri, *Journal of Separation Science*, **45**, 13, 2301-2309 (2022). <https://doi.org/10.1002/jssc.202100873>.
20. O. Bunkoed, T. Rueankaew, P. Nurerk, P. Kanatharana, *Journal of Separation Science*, **39**, 12, 2332-2339 (2016). <https://doi.org/10.1002/jssc.201600285>.
21. A. R. Ghiasvand, L. Ghaedrahmati, N. Heidari, P. R. Haddad, S. Farhadi, *Journal of Separation Science*, **41**, 20, 3910-3917 (2018). <https://doi.org/10.1002/jssc.201800498>.
22. C. Liu, X. Liu, P. J. Marriott, H. Qian, Z. Meng, Z. Yang, R. Lu, H. Gao, W. Zhou, *Journal of Separation Science*, **42**, 8, 1610-1619 (2019). <https://doi.org/10.1002/jssc.201801159>.
23. M. M. Abolghasemi, H. Taheri, M. Jaymand, M. Piryaeei, *Separation Science Plus*, **1**, 3, 202-208 (2018). <https://doi.org/10.1002/sscp.201700036>.
24. M. Saraji, A. K. Behbahan, *Journal of Separation Science*, **39**, 18, 3616-3623 (2016). <https://doi.org/10.1002/jssc.201600056>.
25. X. Tan, P. Dewapriya, P. Prasad, Y. Chang, X. Huang, Y. Wang, X. Gong, T. E. Hopkins, C. Fu, K. V. Thomas, H. Peng, A. K. Whittaker, C. Zhang, *Angewandte Chemie*, **134**, Article e202213071 (2022). <https://doi.org/10.1002/anie.202213071>.
26. G. Huang, M. Su, W. Zhang, Y. Liu, C. Chen, S. Li, *Journal of Separation Science*, **45**, 3, 760-770 (2022).
27. M. Gomar, H. A. Panahi, E. Pournamdari, *Chemistry Select*, **3**, 2571-2577 (2018).
28. F. Khalilian, S. Ahmadian, *Journal of Separation Science*, **39**, 1500-1508 (2016). <https://doi.org/10.1002/jssc.201501392>.
29. B. Ebrahimi, S. Mozaffari, S. Mohammadiazar, *Journal of Separation Science*, **46**, 13, Article 2201031 (2023). <https://doi.org/10.1002/jssc.202201031>.
30. J. Li, X. Hu, P. Guan, X. Zhang, L. Qian, N. Zhang, C. Du, R. Song, *Journal of Separation Science*, **39**, 10, 1863-1872 (2016). <https://doi.org/10.1002/jssc.201600055>.
31. M. Woznica, P. Lulinski, *Journal of Separation Science*, **42**, 7, 1412-1422 (2019). <https://doi.org/10.1002/jssc.201801101>.
32. M. Peyrovi, M. Hadjmohammadi, I. Saeidi, *Biomedical Chromatography*, **33**, 1, Article e4404 (2019). <https://doi.org/10.1002/bmc.4404>.
33. Y. Gorbani, H. Yilmaz, H. Basan, *Luminescence*, **32**, 8, 1391-1397 (2017). <https://doi.org/10.1002/bio.3335>.
34. J. A. W. Jong, Y. Guo, D. Hazenbrink, S. Douka, D. Verdijk, J. van der Zwan, K. Houben, M. Baldus, K. C. Scheiner, R. Dalebout, M. C. Verhaar, R. Smakman, W. E. Hennink, K. G. F. Gerritsen, C. F. van Nostrum, *Macromolecular Bioscience*, **20**, Article 1900396 (2020). <https://doi.org/10.1002/mabi.201900396>.
35. H. Molavi, M. Zamani, M. Aghajanzadeh, H. K. Manjili, H. Danafar, A. Shojaei, *Applied Organometallic Chemistry*, **32**, 4, Article e4221 (2018). <https://doi.org/10.1002/aoc.4221>.
36. S. A. Haeri, S. Abbasi, S. Sajjadifar, *Electrophoresis*, **38**, 21, 2765-2770 (2017). <https://doi.org/10.1002/elps.201700245>.
37. A. Aghakhani, A. Ghanbari, A. Haghighi Asl, A. Khan-larkhani, *Separation Science Plus*, **4**, 1, 36-44 (2021). <https://doi.org/10.1002/sscp.202000071>.
38. H. He, Q. Gan, C. Feng, *Journal of Applied Polymer Science*, Article 45165 (2017). <https://doi.org/10.1002/app.45165>.
39. A. Aravind, B. Mathew, *Polymer International*, **67**, 1595-1604 (2018). <https://doi.org/10.1002/pi.5683>.
40. A. Rahmaninia, Y. Mansoori, F. Nasiri, *Polymers Advanced Technologies*, **29**, 1988-2001 (2018). <https://doi.org/10.1002/pat.4307>.
41. M. Hosseinzadeh, N. Noroozi Pesyan, P. Najafi Moghadam, *Advances in Polymer Technology*, **37**, 2, Article 21685 (2018). <https://doi.org/10.1002/adv.21685>.
42. F. Saltan, G. Murat Saltan, *Journal of Applied Polymer Science*, **139**, Article 52639 (2022). <https://doi.org/10.1002/app.52639>.
43. A. A. Alwattar, A. Haddad, J. Moore, M. Alshareef, C. Bartlam, A. W. Woodward, L. S. Natrajan, S. G. Yeates, P. Quayle, *Polymer International*, **70**, 59-72 (2021). <https://doi.org/10.1002/pi.6086>.
44. D. Saraydin, E. S. Yildirim, E. Karadag, O. Guven, *Advances in Polymer Technology*, **37**, 3, 822-829 (2018). <https://doi.org/10.1002/adv.21725>.
45. M. N. Gorbunova, T. D. Batueva, *Polymers Advanced Technologies*, **28**, 152-158 (2017). <https://doi.org/10.1002/pat.3869>.
46. A. Abbasi, S. Amirshakeri, M. Najafi, H. Shahbaazi, *Chemistry Select*, **3**, 5480-5485 (2018). <https://doi.org/10.1002/slct.201800061>.
47. Q. Wang, B. W. Kail, W. C. Wilfong, F. Shi, T. J. Tarka, M. L. Gray, *ChemPlusChem*, **85**, 1, 130-136 (2020). <https://doi.org/10.1002/cplu.201900695>.
48. D. V. Nesterov, L. S. Molochnikov, O. V. Korjakova, M. I. Kodess, M. A. Ezhikova, A. V. Pestov, *Journal of Applied Polymer Science*, **133**, 39, Article 43939 (2016). <https://doi.org/10.1002/app.43939>.
49. S. D. Kirupha, R. Narayanasamy, M. Sornalatha, S. Sivanesan, L. Ravikumar, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **95**, 5, 944-953 (2017). <https://doi.org/10.1002/cjce.22783>.
50. C. Dong, J. Gao, Y. Zhao, T. T. Ma, Y. He, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **224**, 11, Article 2300002 (2023). <https://doi.org/10.1002/macp.202300002>.
51. S. A. Jasim, W. K. Abdelbasset, K. Hachem, M. M. Kadhimi, G. Yasin, M. A. Obaid, B. A. Hussein, H. A. Lafta, Y. F. Mustafa, Z. H. Mahmoud, *Journal of the Chinese Chemical Society*, **69**, 7, 1079-1087 (2022). <https://doi.org/10.1002/jccs.202200013>.
52. M. Zhang, L. Liu, T. He, G. Wu, P. Chen, *Chemistry - An Asian Journal*, **11**, 12, 1849-1855 (2016). <https://doi.org/10.1002/asia.201600396>.
53. P. E. Savas, W. A. Algozeeb, Z. Wang, C. Kittrell, X. Wu, J. N. Hall, T. B. Malloy, P. Bollini, J. M. Tour, *Advanced Sustainable Systems*, **7**, 6, Article 2200436 (2023). <https://doi.org/10.1002/adsu.202200436>.
54. D. Wang, X. Wang, C. Song, *A European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, **18**, 22, 3163-3173 (2017). <https://doi.org/10.1002/cphc.201700828>.

55. C. G. Bezzu, A. Fuoco, E. Esposito, M. Monteleone, M. Longo, J. C. Jansen, G. S. Nichol, N. B. McKeown, *Advanced Functional Materials*, **31**, 37, Article 2104474 (2021). <https://doi.org/10.1002/adfm.202104474>.
56. J. S. A. Carneiro, G. Innocenti, H. J. Moon, Y. Guta, L. Proano, C. Sievers, M. A. Sakwa-Novak, E. W. Ping, C. W. Jones, *Angewandte Chemie*, **135**, 24, Article e202302887 (2023). <https://doi.org/10.1002/ange.202302887>.
57. W. C. Wilfong, M. L. Gray, B. W. Kail, B. H. Howard, *Energy Technology*, **4**, 5, 610-619 (2016). <https://doi.org/10.1002/ente.201500419>.
- T. Faulkner, A. Zukal, J. Brus, J. Zednik, J. Sedlacek, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **217**, 17, 1886-1898 (2016). <https://doi.org/10.1002/macp.201600092>

© **Х. С. Абзальдинов** – канд. хим. наук, доц. каф. ТПМ КНИТУ, abzaldinov@mail.ru, **Ш. А. Кадилова** – д-р хим. наук, проф., декан химического факультета, Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан, sh.kadirova@nuu.uz, **М. А. Махкамов** – д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой химии полимеров, Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан, m.mahkamov@nuu.uz, **Д. А. Гафурова** – д-р хим. наук, проф. кафедры химии полимеров, Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан, d.gafurova@nuu.uz, **Ю. А. Тунакова** – д-р хим. наук, проф., заведующая кафедрой общей химии и экологии, КНИТУ-КАИ, **Х. М. Ярошевская** – канд. хим. наук, профессор кафедры физической и коллоидной химии, КНИТУ, **Ю. М. Казаков** д-р техн. наук, ректор, КНИТУ, **О. В. Стоянов** – д-р техн. наук, проф., директор Института полимеров, заведующий кафедрой ТПМ, КНИТУ.

© **Kh. S. Abzaldinov** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of Plastics Technologies Department, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, abzaldinov@mail.ru, **Sh. A. Kadirova** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Dean of Faculty of Chemistry, Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan (Mirzo Ulugbek NUU), Tashkent, Uzbekistan, sh.kadirova@nuu.uz, **M. A. Makhkamov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Head of Chemistry of Polymers Department, Mirzo Ulugbek NUU, m.mahkamov@nuu.uz, **D. A. Gafurova** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Chemistry of Polymers Department, Mirzo Ulugbek NUU, d.gafurova@nuu.uz, **Yu. A. Tunakova** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Head of Department of General Chemistry and Ecology, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia; **Kh. M. Yaroshevskaya** – PhD, Professor of Physical and Colloid Chemistry Department, KNRTU; **Yu. M. Kazakov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Rector, KNRTU; **O. V. Stoyanov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Director of Institute of Polymers, Head of Plastics Technologies Department, KNRTU.