

Влияние температурно-временной экспозиции на свойства ионитов на основе акрилонитрила и 2-акриламид-2-метилпропансульфо кислоты

**В. М. Чикунская, В. А. Огородников,
Л. А. Щербина, И. А. Будкоте**

*Белорусский государственный университет пищевых
и химических технологий, Республика Беларусь*

Аннотация. С целью разработки способа придания нерастворимости ионогенным сополимерам акрилонитрила (АН) и 2-акриламид-2-метилпропансульфо кислоты (АМПС) (с содержанием последней 20; 25; 30 % (масс.)) они были подвергнуты термической обработке в течение различного времени при 100 °С, 140 °С, 160 °С и 200 °С. Оценена эффективность такой модификации путем изучения растворимости опытных образцов в диметилформамиде, в результате чего установлены условия термообработки, в которых достигается снижение степени набухания вплоть до потери растворимости ионогенными сополимерами на основе АН и АМПС.

Оценена статическая обменная емкость (СОЕ) исходных и термически обработанных образцов ионитов на основе поли[АН-со-АМПС] по сорбции ионов натрия, а также сорбционная способность образцов по отношению к ионам цинка, никеля.

Установлено, что модификация изученных ионитов путем термообработки при 100 и 200 °С приводит увеличению их СОЕ. При этом сорбционные свойства ионитов изменяются неоднозначно. Так, практически во всех случаях количество сорбированных ионов цинка превышает значения СОЕ. По отношению к ионам никеля все термообработанные образцы ионитов проявляют практически одинаковую сорбционную активность (1,00±0,15 ммоль-экв/г). При этом количество сорбированных ионов Ni²⁺ в 2–4 раза меньше значений СОЕ.

Ключевые слова: акрилонитрил, 2-акриламид-2-метилпропансульфо кислота, сополимер, ионит, модификация, растворимость, сорбция, статическая обменная емкость.

Информация о статье: поступила 19 ноября 2025 года.

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2025)», которая состоялась 18–19 ноября 2025 года в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» (Республика Беларусь).

The effect of temperature and time exposure on the properties of acrylonitrile- and 2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid-based ion exchangers

**Vera M. Chykunskaya, Valery A. Ogorodnikov,
Leonid A. Shcherbina, Iryna A. Budkute**

*Belarusian State University of Food and Chemical Technologies,
Republic of Belarus*

Abstract. To develop a method for imparting insolubility to ionogenic copolymers of acrylonitrile (AN) and 2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS) (with the latter content of 20, 25, and 30 % (wt)) they were subjected to heat treatment for various periods of time at 100 °C, 140 °C, 160 °C, and 200 °C. The effectiveness of this modification was assessed by studying the solubility of test samples in dimethylformamide, as a result of which heat treatment conditions were determined that achieved a reduction in the degree of swelling up to the loss of solubility of ionogenic copolymers based on AN and AMPS.

The static exchange capacity (SEC) of the original and heat-treated poly[AN-co-AMPS] ion-exchange resins was determined for sodium ion sorption. Additionally, their sorption capacity for zinc and nickel ions was measured.

It was found that modification of the studied ion exchangers by heat treatment at 100 and 200 °C leads to an increase in their SEC. However, the sorption properties of the ion exchangers change ambiguously. Thus, in almost all cases, the amount of sorbed zinc ions exceeds the SEC values. With respect to nickel ions, all heat-treated ion exchanger samples exhibit virtually identical sorption activity (1.00±0.15 mmol-eq/g). However, the amount of sorbed Ni²⁺ ions is 2–4 times lower than the SEC values.

Keywords: acrylonitrile, 2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid, copolymer, ion exchange resin, modification, solubility, sorption, static exchange capacity.

Article info: received November 19, 2025.

The article summarizes the research materials presented at the International Scientific and Technical Conference "International Conference on Textile and Apparel Innovation" (ICTAI-2025), held on November 18–19, 2025 at Vitebsk State Technological University (Republic of Belarus).

Введение

Разработка ионообменных полимерных материалов имеет большое значение, поскольку ионный обмен занимает важное место среди основных методов разделения, концентрирования разнообразных веществ или извлечения ионов из водных сред. Значения емкости и избирательности по отношению к целевым ионам являются основными характеристиками при выборе сорбента для практического применения (Ергожин и др., 2015; Петухова, Кисель и Ильина, 2019; Ahmad et al., 2019). Иониты, проявляющие высокую селективность к некоторым ионам или группам ионов, как правило, содержат функциональные группы, способные образовывать комплексы с катионами металлов.

Одним из классов сорбционных материалов, применяющихся для разделения и концентрирования ионов металлов, являются модифицированные сополимеры акрилонитрила. Свойства таких сорбентов в значительной степени определяются природой введенных в их структуру функциональных групп. Кроме того, определенное влияние на их свойства оказывает природа полимерной матрицы, например, ее термодинамическая гибкость, растворимость в водных и неводных средах и др.

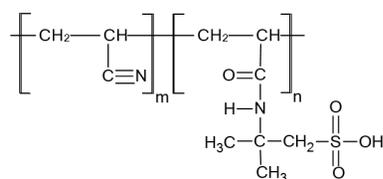
Кафедра «Химия и технология высокомолекулярных соединений» Белорусского государственного университета пищевых и химических технологий на протяжении последних лет занимается разработкой ионообменных материалов на основе сополимеров акрилонитрила (АН). Такой объект исследований был выбран по причине широких возможностей его химической модификации различными способами: и путем сополимеризации акрилонитрила с сомономерами различной химической природы, и путем реакций прививочной сополимеризации, и путем полимераналогичных превращений.

В частности, на кафедре синтезированы сополимеры АН и 2-акриламид-2-метилпропансульфокислоты (АМПС) с различным содержанием кислотного сомомера (КС) (Щербина, 2022, Щербина и др., 2022). Увели-

чение содержания КС приводит к увеличению обменной ёмкости ионита. Однако работа с материалами на основе поли[АН-со-АМПС] с содержанием АМПС более 25 % (масс.) затруднена вследствие сильного набухания этих полимеров в воде. Известно, что особенностью структуры нерастворимых гелей является наличие межмолекулярных химических связей. В ряде работ (Bouchoum et al., 2019; Rani, Praveen and Kumar 2018a, 2018b; Нестеренок, 2014; Tham, 2017; Jin et al., 2017; Гафурова и др., 2014) большое внимание уделяется химической модификации ионитов на основе АН путем обработки различными реагентами. Однако такой вариант придания нерастворимости имеет ряд недостатков. Основным из них является само по себе использование химических веществ, что сопряжено с дополнительными материальными затратами, усложнением условий проведения процессов по причине небезопасности для человека и окружающей среды, поскольку многие из модификаторов или продуктов реакций обладают токсичными, канцерогенными и тому подобными свойствами. Поэтому авторами работы была выдвинута гипотеза о возможности придания нерастворимости поли[АН-со-АМПС] с высоким содержанием кислотного сомомера посредством термической обработки сополимера. В связи с этим целью данного исследования явилась оценка влияния температурно-временной экспозиции поли[АН-со-АМПС] на набухание и растворимость данных ионообменных материалов, а также их сорбционные свойства.

Объекты, методы и средства исследования

Объектом исследования явились сополимеры акрилонитрила (АН) и 2-акриламид-2-метилпропансульфокислоты (АМПС) с содержанием последней 20, 25, 30 % (масс.):



Термообработку образцов ионитов проводили в термошкафу при определенной температуре.

Кратность набухания в различных средах сополимеров оценивали по изменению диаметра жилок, обработанных при определенной температуре, по отношению к исходной, свежесформованной жилке. Диаметр жилок оценивали с помощью штангенциркуля с погрешностью $\pm 0,5$ мм.

Для определения количества ионогенных групп образцов поли[АН-со-АМПС] оценивали предельные значения СОЕ по ионам Na^+ . Для этого навеску сорбента в H^+ -форме массой 1 г (в пересчете на сухой материал) заливали 100 см³ 0,1 н раствора NaOH и оставляли на 2 суток. Емкость ионита определяли титрованием избытка щелочи 0,1 н раствором HCl. Отклонение результатов измерений от средних значений составило $\pm 0,1$ ммоль-экв/г.

Для определения количества сорбированных ионов металлов образец ионита в H^+ -форме заливали 100 см³ раствора сорбата (сульфата цинка или сульфата нике-

ля). После наступления равновесия определяли равновесную концентрацию ионов металла в растворе. Затем ионит извлекали из этого раствора, переносили в новый сосуд и заливали исходным раствором сорбата (второе погружение) в количестве 100 см³; после установления равновесия снова измеряли вышеуказанный параметр системы. Аналогично проводили третье погружение. Концентрацию ионов металла в растворах определяли методом комплексонометрического титрования в присутствии аммиачного буфера и индикатора эриохром черный Т. Отклонение результатов измерений от средних значений составило $\pm 0,15$ ммоль-экв/г.

Результаты исследований

Известно, что наиболее широко применяемым растворителем для сополимеров АН является диметилформамид (ДМФ). Поэтому большой интерес представляет изучение растворимости термообработанных образцов поли[АН-со-АМПС] в данном растворителе. В таблице 1 представлены результаты исследования влияния условий термообработки поли[АН(80)-со-

Таблица 1 – Влияние температурно-временной экспозиции на набухание поли[АН(80)-со-АМПС(20)] в диметилформамиде

Table 1 – Effect of temperature-time exposure on swelling of poly[AN(80)-co-AMPS(20)] in dimethylformamide

Продолжительность, мин	Температура, °С					
	100	120	140	160	180	200
13	р	р	р	р	р	р
15	р	р	р	р	р	0
17	р	р	р	р	0	-
19	р	р	р	0	0	-
21	р	р	р	0	0	-
23	р	р	0	0	-	-
25	р	р	0	0	-	-
27	р	0	0	-	-	-
29	р	0	0	-	-	-
31	р	0	0	-	-	-
33	0	0	-	-	-	-
35	0	-	-	-	-	-
37	0	-	-	-	-	-
39	0	-	-	-	-	-
41	-	-	-	-	-	-

Примечание: «р» – неограниченное набухание (растворение); «0» – ограниченное набухание; «-» – отсутствие видимого набухания.

АМПС[20]] на способность растворяться в ДМФ. Минимальная температура выдерживания образцов составила 100 °С, поскольку, как известно из литературных источников (Toms et al., 2020; Sen, 2003; Wang and Xin, 2025), ниже этого значения в сополимерах АН практически не происходит химических превращений, по крайней мере, в течение относительно непродолжительного времени. При температуре более 200 °С, наоборот, начинаются многочисленные химические реакции в полимерном субстрате, что негативно будет отражаться на химической структуре ионитов, вплоть до снижения сорбционной способности. Промежутком времени, через который осуществляли отбор образцов из термощафа, составлял 2 мин. Это позволило выбрать условия термообработки всех видов образцов сополимеров АН, поскольку было установлено, что в течение примерно 30 минут сополимер теряет способность растворяться в ДМФ, через 40 минут – способность набухать (даже при обработке при самой низкой температуре (100 °С). При проведении эксперимента над образцами, содержащими большее количество АМПС (25 и 30 % (масс.)), продолжительность термообработки увеличили до 50–60 минут с целью обеспечения большей интенсивности их сшивки макромолекул.

Для ионообменных полимерных материалов набухание является важной характеристикой, так как недостаточное набухание приводит к недоступности значительной доли ионообменных групп, а чрезмерное набухание

приводит к увеличению продолжительности процесса насыщения сорбента сорбатом, а также к существенной потере прочности ионита. Поэтому была проанализирована кратность набухания образцов поли[АН-со-АМПС-Н], подвергнутых термообработке, в разных средах. Полученные результаты (рисунки 2–4) свидетельствуют о том, что по мере увеличения температуры термического воздействия на иониты сокращается кратность их набухания. По-видимому, причиной этого является увеличение количества межмолекулярных химических связей, что и являлось целью проведения такого рода модификации ионитов.

Поскольку в результате термообработки была достигнута цель модификации – ограничение растворимости ионитов, то следующим этапом исследования явилось изучение изменения их сорбционных свойств в результате модификации. Результаты определения статической обменной емкости (СОЕ) образцов ионитов по ионам натрия представлены на рисунке 5 (сорбент погружали в водный раствор сорбата в сухом состоянии). Также на рисунке представлены расчетные значения (РЗ) СОЕ.

Наибольшее значение СОЕ наблюдаются в случае ионитов, термообработанных при 140 и 200 °С. По-видимому, при температуре 100 °С, в результате повышения сегментарной подвижности макромолекул (процесс расстекловывания), происходит перестройка структуры полимерного субстрата, что приводит к увеличению

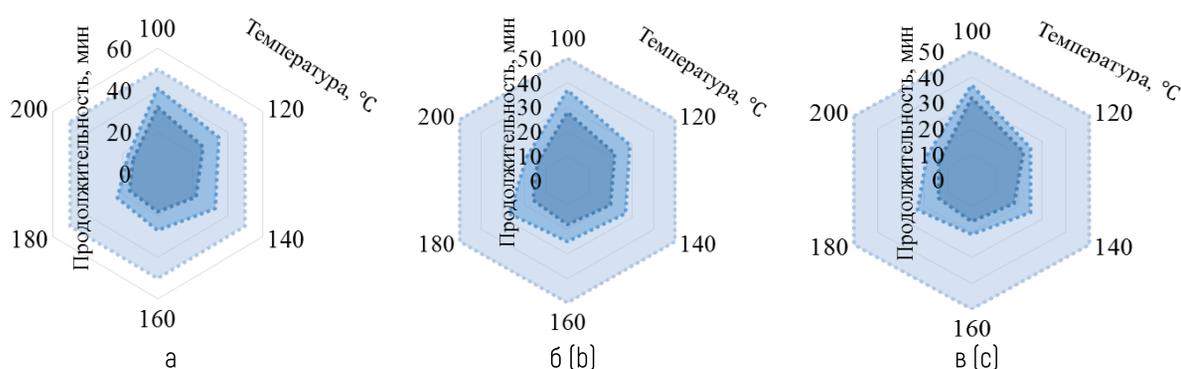


Рисунок 1 – Влияние продолжительности и температуры термообработки образцов поли[АН-со-АМПС] на их растворимость в ДМФ (при содержании кислотного сомомера: а – 20 %, б – 25 %, в – 30 %)

Figure 1 – Effect of duration and temperature of heat treatment of poly[AN-co-AMPS] samples on their solubility in DMF (with an acid comonomer content of: a – 20 %, b – 25 %, c – 30 %)

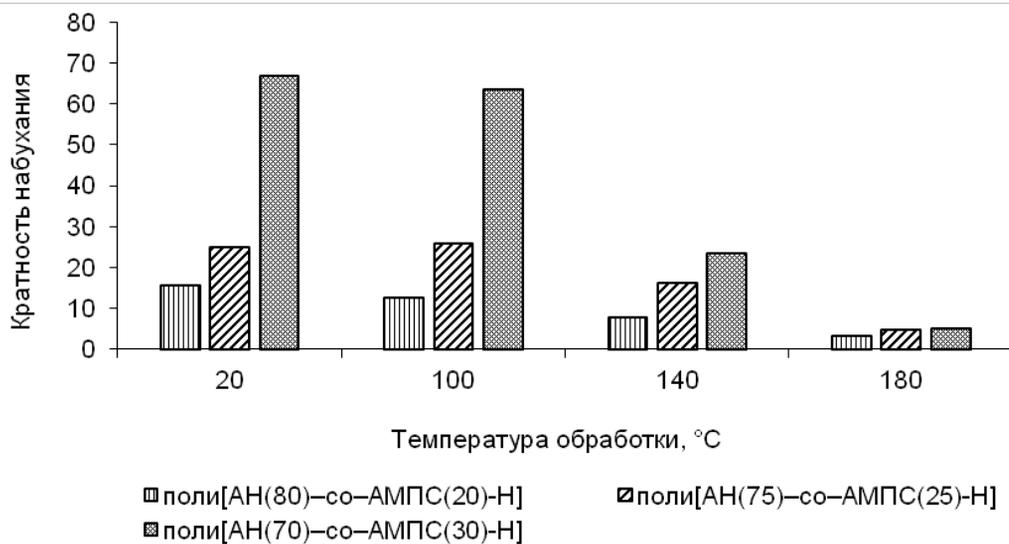


Рисунок 2 – Влияние температуры термообработки гранулированных ионитов на основе поли[АН-со-АМПС] в течение часа на их набухание в воде
 Figure 2 – Effect of heat treatment temperature of granular ion exchange resins based on poly[AN-co-AMPS] for one hour on their swelling in water

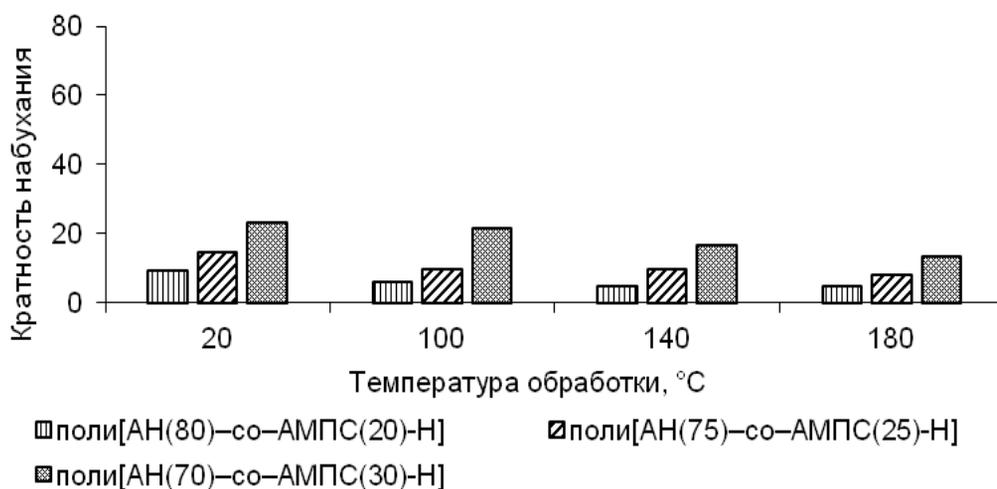


Рисунок 3 – Влияние температуры термообработки гранулированных ионитов на основе поли[АН-со-АМПС] в течение часа на их набухание в 0,1 н растворе NaOH
 Figure 3 – Effect of heat treatment temperature of granulated ion exchange resins based on poly[AN-co-AMPS] for one hour on their swelling in a 0.1N NaOH solution

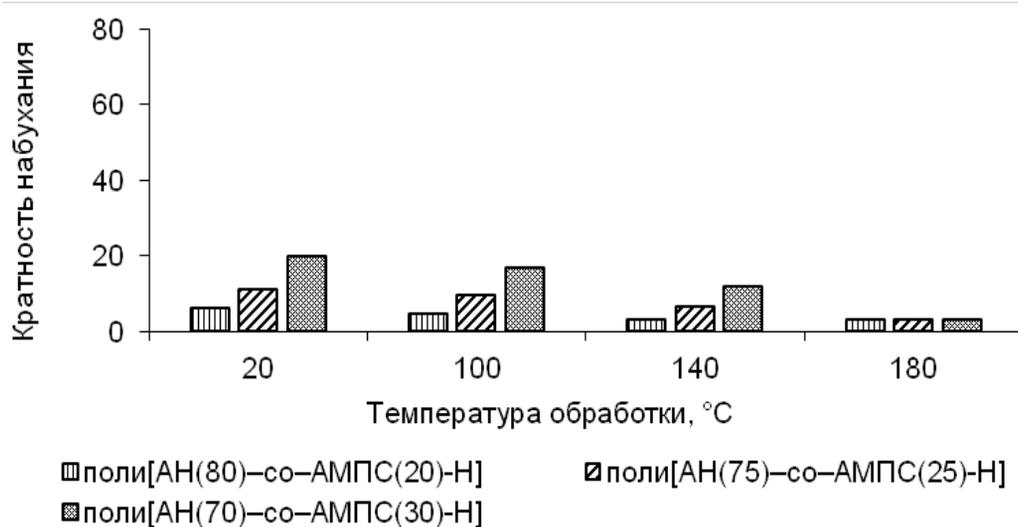


Рисунок 4 – Влияние температуры термообработки гранулированных ионитов на основе поли[АН–со–АМПС] в течение часа на их набухания в 0,1 н растворе HCl
 Figure 4 – Effect of heat treatment temperature of granular ion exchange resins based on poly[AN–co–AMPS] for one hour on their swelling in a 0.1 N HCl solution

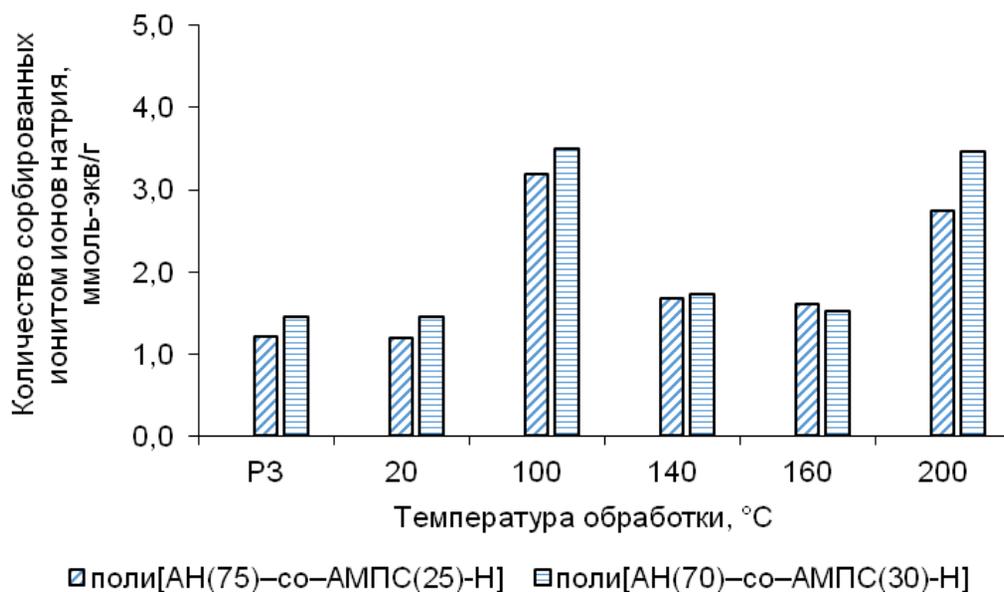


Рисунок 5 – Влияние термообработки на COE (количество ионов Na⁺, сорбированных из 0,1 н раствора NaOH) ионитов на основе поли[АН–со–АМПС-Н]
 Figure 5 – Effect of heat treatment on the COE (the amount of Na⁺ ions sorbed from a 0.1 N NaOH solution) of ion exchange resins based on poly[AN–co–AMPS-N]

фактических значений СОЕ. Дальнейшее повышение температуры до 140–180 °С приводит к компактилизации надмолекулярной структуры, что уменьшает доступность функциональных группировок и снижает СОЕ.

Что касается термообработки образцов при 200 °С, то повышение СОЕ можно объяснить высокой вероятностью протекания при указанной температуре окислительных процессов, приводящих к накоплению в полимерном субстрате карбоксильных групп.

Таким образом, сложный характер зависимости сорбционной активности ионитов от температуры их термообработки может быть обусловлен изменением при высоких температурах полимерной структуры сорбента, протеканием конкурирующих процессов: сшивки макромолекул и окисления с образованием карбоксильных групп.

На рисунках 6, 7 представлены результаты изучения сорбционной способности термообработанных образцов поли[АН(75)–со–АМПС(25)] и поли[АН(70)–со–АМПС(30)], соответственно, по отношению к ионам цинка и никеля.

Из данных, представленных на рисунке 6, видно, что количество ионов цинка, сорбированных немодифицированным образцом поли[АН(75)–со–АМПС(25)], значительно превышает СОЕ (по ионам Na⁺). Термообработка ионита при 100 и 140 °С приводит к некоторому повышению сорбционной способности по ионам цинка. Дальнейшее повышение температуры модификации до 160–200 °С приводит к уменьшению количества сорбированных ионов цинка. В случае ионов никеля превышения количества сорбированных ионов, по сравнению с расчетным и экспериментальными значениями СОЕ, не наблюдается ни до термообработки, ни после нее. Более того, имеется тенденция к снижению сорбционной активности сорбента на основе поли[АН(75)–со–АМПС(25)] по отношению к никелю. Такой результат позволяет надеяться на увеличение избирательности сорбции ионов цинка ионитами на основе поли[АН(75)–со–АМПС(25)] в сравнении с ионами никеля.

Термообработка образцов поли[АН(70)–со–АМПС(30)] при различных температурах приводит к резкому уменьшению их сорбционной способности по отношению к

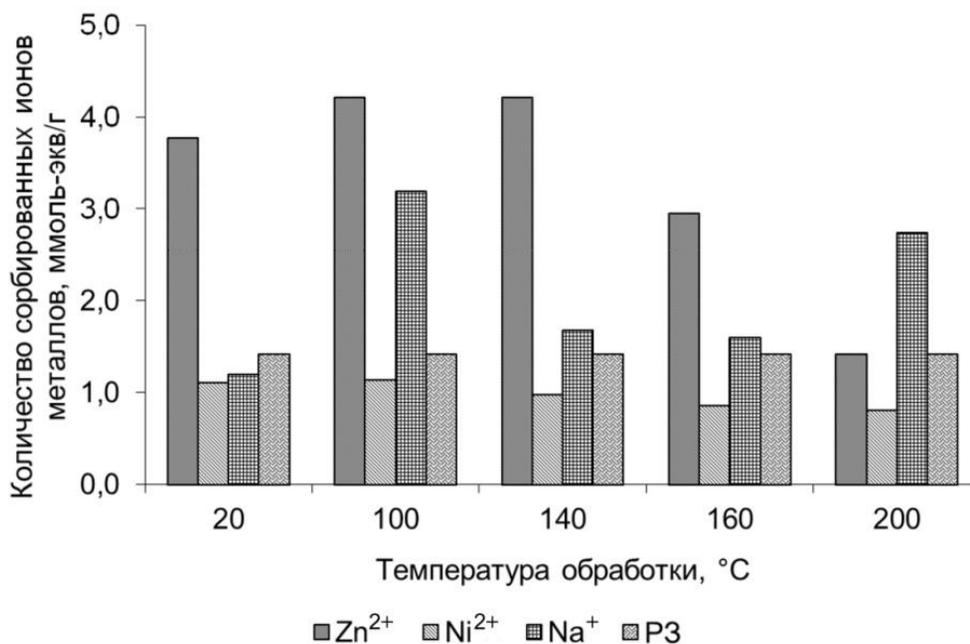


Рисунок 6 – Влияние температуры термообработки поли[АН(75)–со–АМПС(25)] на количество ионов металлов, сорбированных из 0,1 N растворов сорбатов
 Figure 6 – Effect of heat treatment temperature of poly[АН(75)–со–АМПС(25)] on the amount of metal ions sorbed from 0,1 N sorbate solutions

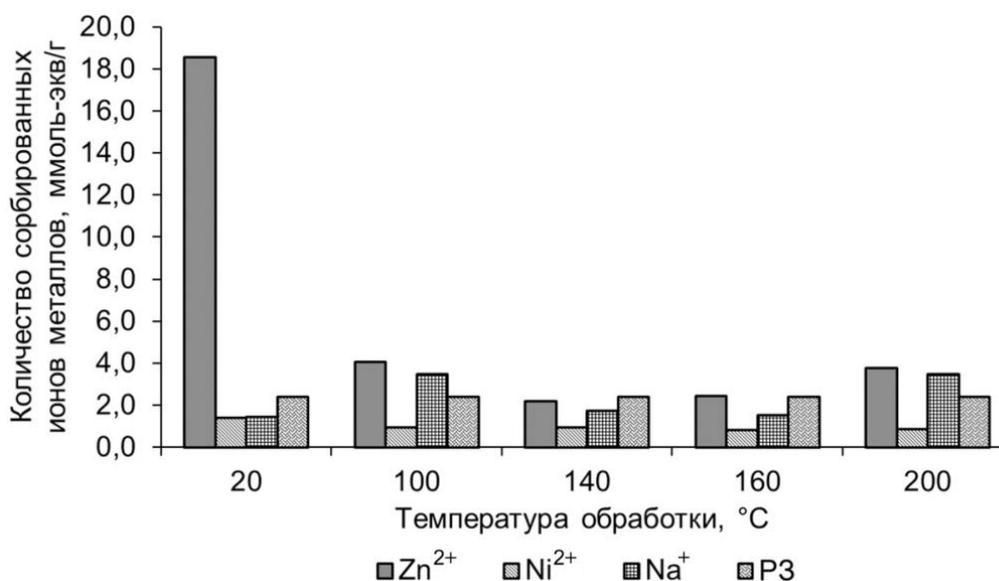


Рисунок 7 – Влияние температуры термообработки поли[АН(70)–со–АМПС(30)] на количество ионов металлов, сорбированных из 0,1 N растворов сорбатов
 Figure 7 – Effect of heat treatment temperature of poly[AN(70)–co–AMPS(30)] on the amount of metal ions sorbed from 0.1 N sorbate solutions

ионам цинка. При этом сорбционная активность ионита на основе поли[АН(70)–со–АМПС(30)] снижается до значений, близких к сорбционной активности ионита на основе поли[АН(75)–со–АМПС(25)]. Важно отметить и то, что результате термообработки при 100 и 200 °C, для ионита, содержащего в своей структуре 30 % (масс.) АМПС, отмечается некоторый рост сорбционной способности к ионам цинка.

Выводы

Модификация ионитов на основе сополимеров АН и АМПС путем термообработки приводит к снижению их способности к набуханию и растворению в водных средах и в диметилформамиде. При этом изменение сорбционных свойств ионитов на основе поли[АН–со–АМПС] в результате термообработки имеет сложный характер. Так, в результате выдерживания образцов с определенной длительностью при температурах 100 и 200 °C их СОЕ увеличивается, а при температурах 140 и 180 °C – уменьшается. Установлено, что практически во всех случаях количество сорбированных ионов Zn²⁺ превышает значения СОЕ. В то же время сорбционная активность ионитов по отношению к ионам Ni²⁺ в результате тер-

мообработки существенно не изменяется и составляет (1,00±0,15) ммоль-экв/г, что во всех случаях ниже значения СОЕ (по ионам натрия).

Это позволяет полагать, что сорбция цинка ионитами на основе поли[АН–со–АМПС] основана не только на процессах ионного обмена, но и на возможности комплексообразования с ионитом, имеющим определенную первичную структуру.

Таким образом, в результате проведенной работы продемонстрирована возможность изменения степени набухания ионогенных сополимеров на основе АН и АМПС, а также их сорбционной активности в результате термической обработки, что позволяет рассматривать перспективы использования рассматриваемых сорбентов в процессах селективного разделения ионов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Гафурова, Д.А., Шахидова, Д.Н., Мухамедиев, М.Г. и Мухамедов, Г.И. (2014). Механизм каталитического влияния гидроксилamina на реакцию полиакрилонитрила с азотсодержащими основаниями. *Журнал физической химии*, Т. 88, № 11, С. 1851–1854.

Ергожин, Е.Е., Чалов, Т.К., Никитина, А.И. и ХакиMBOLATOва, К.Х. (2015). Изучение селективности сорбции катионов тяжелых металлов новым макропористым анионитом. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, Т. 58, № 10, С. 85–89.

Нестеронок, П.В., Косандрович, Е.Г., Шаченкова, Л.Н. и Коршунова, Т.А. (2014). Каталитический способ получения полиамфолитов на основе полиакрилонитрильного волокна. *Вести Национальной академии наук Республики Беларусь. Серия химических наук*, № 4, С. 80–87.

Петухова, Ю.Н., Кисель, А.В. и Ильина, С.И. (2019). Перспективы применения ионитов в химической технологии. *Евразийский Союз Ученых*, № 12 (69), С. 4–6. doi: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.5.69.503.

Щербина, Л.А. (2022). Синтез ионогенных волокнообразующих сополимеров акрилонитрила и 2-акриламид-2-метилпропансульфокислоты в диметилформамиде. *Химические волокна*, 2022, № 1, С. 14–20.

Щербина, Л.А., Чикунская, В.М., Огородников, В.А. и Будкуте, И.А. (2022). Получение и свойства материалов на основе ионогенных сополимеров акрилонитрила и 2-акриламид-2-метилпропансульфокислоты. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки*, № 2, С. 91–97.

Ahmad, O.S., Bedwell, T.S., Esen, C.A. and Garcia-Cruz, S.A. (2019). Piletsky Molecularly imprinted polymers in electrochemical and optical sensors. *Trends in Biotechn.*, V. 37, No. 3., pp. 294–309.

Bouchoum, Hayat, Benmoussa, Dounia, Jada, Amane, Tahiri, Mohamed and Cherkaoui, Omar (2019). Synthesis of amidoximated polyacrylonitrile fibers and its use as adsorbent for Cr (VI) ions removal from aqueous solutions. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 38, No. 5, P. 1–10, DOI 10.1002/ep.

Jin, So Yeon, Kim, Min Hee, Jeong, Young Gyu, Yoon, Young Il and Park, Won Ho (2017). Effect of alkaline hydrolysis on cyclization reaction of PAN nanofibers. *Materials and Design*, Vol. 124, pp. 69–77. doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.066.

Rani, Soni, Praveen, Gazala and Kumar Gajendra (2018). Synthesis and characterization of copolymer film of acrylic acid with acrylonitrile and hydroxylamine treatment of the acrylic copolymer. *VSRD International Journal of Technical & Non-Technical Research*, Vol. IX, No. 2, pp. 83–88.

Rani, Soni, Praveen, Gazala and Kumar Gajendra (2018). Synthesis, Study and Characterization of Amidoximated Acrylic Copolymer. *Journal of Engineering Research and Application*, Vol. 8. No. 3, pp. 54–60.

Sen, Kushal (2003). Thermal behavior of acrylonitrile carboxylic acid copolymers. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 88, pp. 685–698. doi.org/10.1002/APP11637.

Tham, H.M., Wang, K.Y., Hua, D., Japip, S. and Chung, T.S. (2017). From ultrafiltration to nanofiltration: hydrazine cross-linked polyacrylonitrile hollow fiber membranes for organic solvent nanofiltration. *J. Membr. Sci.*, Vol. 542, pp. 289–299. doi.org/10.1016/j.memsci.2017.08.024.

Toms, R.V., Balashov, M.S., Shaova, A.A., Gerval'd, A.Yu., Prokopov, N.I., Plutalova, A.V., Grebenkina, N.A. and Chernikova, E.V. (2020). Copolymers of Acrylonitrile and Acrylic Acid: Effect of Composition and Distribution of Chain Units on the Thermal Behavior of Copolymers. *Polymer Science. Series B*, Vol. 62, pp. 102–115. doi: 10.1134/S1560090420020086.

Wang, C. and Xin, Z. (2025). Effects of itaconic acid and ammonium itaconic acid on cyclization and thermal stabilization of narrow polydispersity polyacrylonitrile terpolymers synthesized in continuous flow. *J Polym Res.* 32, pp. 42–51. doi.org/10.1007/s10965-025-04267-6.

REFERENCES

- Gafurova, D.A., Shakhidova, D.N., Mukhamediyev, M.G. and Mukhamedov, G.I. (2014). The mechanism of the catalytic effect of hydroxylamine on the reaction of polyacrylonitrile with nitrogen-containing bases [Mekhanizm kataliticheskogo vliyaniya gidroksilamina na reaktsiyu poliakrilonitrila s azotsoderzhashchimi osnovaniyami]. *Zhurnal fizicheskoy khimii = Russian Journal of Physical Chemistry*, vol. 88, No. 11, pp. 1851–1854 [In Russian].
- Ergozhin, E.E., Chalov, T.K., Nikitina, A.I. and Khakimbatova, K.Kh. (2015). Study of the selectivity of heavy metal cation sorption by a new macroporous anion exchanger [Izucheniye selektivnosti sorptsii kationov tyazhelykh metallov novym makroporistym anionitom]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = News of higher educational institutions Chemistry and chemical technology*, vol. 58, No. 10, pp. 85–89 [In Russian].
- Nesteronok, P.V., Kosandrovich, E.G., Shachenkova, L.N. and Korshunova, T.A. (2014). Catalytic method for producing polyampholytes based on polyacrylonitrile fiber [Kataliticheskiy sposob polucheniya poliamfolitov na osnove poliakrilonitril'nogo volokna]. *Vesti Natsional'noy akademii nauk Respubliki Belarus'. Seriya khimicheskikh nauk = News of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus. Ser. of Chemical Sciences*, No. 4, pp. 80–87 [In Russian].
- Petukhova, Yu.N., Kisel, A.V. and Ilyina, S.I. (2019). Prospects for the Application of Ion Exchangers in Chemical Technology [Perspektivy primeneniya ionitov v khimicheskoy tekhnologii]. *Yevraziyskiy Soyuz Uchenykh = Eurasian Union of Scientists*, No. 12 (69), pp. 4–6. doi: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.5.69.503 [In Russian].
- Shcherbina, L.A. (2022). Synthesis of Ionogenic Fiber-Forming Copolymers of Acrylonitrile and 2-Acrylamide-2-methylpropanesulfonic Acid in Dimethylformamide. [Sintez ionogennykh voloknoobrazuyushchikh sopolimerov akrilonitrila i 2-akrilamid-2-metilpropansulfokisloty v dimetilformamide]. *Khimicheskkiye volokna = Chemical Fibers*, 2022, No. 1, pp. 14–20 [In Russian].
- Shcherbina, L.A., Chikunskaya, V.M., Ogorodnikov, V.A., and Budkute, I.A. (2022). Preparation and Properties of Materials Based on Ionogenic Copolymers of Acrylonitrile and 2-Acrylamide-2-methylpropanesulfonic Acid [Polucheniye i svoystva materialov na osnove ionogennykh sopolimerov akrilonitrila i 2-akrilamid-2-metilpropansulfokisloty]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. Seriya 1. Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki = Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and Technical Sciences*, No. 2, pp. 91–97 [In Russian].
- Ahmad, O.S., Bedwell, T.S., Esen, C.A. and Garcia-Cruz, S.A. (2019). Piletsky Molecularly imprinted polymers in electrochemical and optical sensors. *Trends in Biotechn.*, V. 37, No. 3, pp. 294–309.
- Bouchoum, Hayat, Benmoussa, Dounia, Jada, Amane, Tahiri, Mohamed and Cherkaoui, Omar (2019). Synthesis of amidoximated polyacrylonitrile fibers and its use as adsorbent for Cr (VI) ions removal from aqueous solutions. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 38, No.5, P. 1–10, DOI 10.1002/ep.
- Jin, So Yeon, Kim, Min Hee, Jeong, Young Gyu, Yoon, Young Il and Park, Won Ho (2017). Effect of alkaline hydrolysis on cyclization reaction of PAN nanofibers. *Materials and Design*, Vol. 124, pp. 69–77. doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.066.
- Rani, Soni, Praveen, Gazala and Kumar Gajendra (2018). Synthesis and characterization of copolymer film of acrylic acid with acrylonitrile and hydroxylamine treatment of the acrylic copolymer. *VSRD International Journal of Technical & Non-Technical Research*, Vol. IX, No. 2, pp. 83–88.
- Rani, Soni, Praveen, Gazala and Kumar Gajendra (2018). Synthesis, Study and Characterization of Amidoximated Acrylic Copolymer. *Journal of Engineering Research and Application*, Vol. 8. No. 3, pp. 54–60.
- Sen, Kushal (2003). Thermal behavior of acrylonitrile carboxylic acid copolymers. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 88, pp. 685–698. doi.org/10.1002/APP11637.
- Tham, H.M., Wang, K.Y., Hua, D., Japip, S. and Chung, T.S. (2017). From ultrafiltration to nanofiltration: hydrazine cross-linked polyacrylonitrile hollow fiber membranes for organic solvent nanofiltration. *J. Membr. Sci.*, Vol. 542, pp. 289–299. doi.org/10.1016/j.memsci.2017.08.024.

Toms, R.V., Balashov, M.S., Shaova, A.A., Gerval'd, A.Yu., Prokopov, N.I., Plutalova, A.V., Grebenkina, N.A. and Chernikova, E.V. (2020). Copolymers of Acrylonitrile and Acrylic Acid: Effect of Composition and Distribution of Chain Units on the Thermal Behavior of Copolymers. *Polymer Science. Series B*, Vol. 62, pp. 102–115. doi: 10.1134/S1560090420020086.

Wang, C. and Xin, Z. (2025). Effects of itaconic acid and ammonium itaconic acid on cyclization and thermal stabilization of narrow polydispersity polyacrylonitrile terpolymers synthesized in continuous flow. *J Polym Res.* 32, pp. 42–51. doi.org/10.1007/s10965-025-04267-6

Информация об авторах

Information about the authors

Чикунская Вера Михайловна

Старший преподаватель, кафедра «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь.

Огородников Валерий Анатольевич

Кандидат химических наук, доцент, кафедра «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь.

Щербина Леонид Александрович

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь. E-mail: htvms@tut.by

Будкоте Ирина Александровна

Кандидат технических наук, доцент, кафедра «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь.

Vera M. Chykunskaya

Senior Lecturer of the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus.

Valery A. Ogorodnikov

Candidate of Sciences (in Chemistry), Associate Professor at the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus.

Leonid A. Shcherbina

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor, Chair of the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus. E-mail: htvms@tut.by

Iryna A. Budkute

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor at the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus.