https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-96

МРНТИ:52.47.27

А. Кливенко[1]*, Г. Елемесова[1], В. Бакланов[2], О. Букина[2], Ю. Бакланова[2]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
[2]Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан
180010 Республика Казахстан, г. Курчатов, улица Бейбіт атом 10
*e-mail: alexeyklivenko@mail.ru

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ В КАЧЕСТВЕ КАНДИДАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОРБЦИИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Аннотация: *Синтезирована серия полиэлектролитных гидрогелей на основе акриламида (AAm) и акрилата натрия (SA), сшитых N,N'-метилен-бис-акриламидом, с различными соотношениями мономеров. Образцы получены методом свободнорадикальной сополимеризации, после чего изучены их равновесная степень набухания в воде, чувствительность к ионной силе среды, температуре и pH, а также механические характеристики и термическая устойчивость. Установлено, что увеличение доли акрилата натрия приводит к росту водопоглощения вследствие повышения концентрации ионизированных карбоксилатных групп и усиления электростатического отталкивания между фрагментами полимерной сетки. Одновременно наблюдается снижение модуля Юнга, свидетельствующее об уменьшении жесткости материала. Повышение концентрации соли вызывает примерно трехкратное уменьшение степени набухания из-за экранирования зарядов противоионами. Напротив, повышение температуры до 80 °C и увеличение pH среды способствуют набуханию гидрогелей. Термогравиметрический анализ показал многостадийный характер термической деструкции и сохранение высокой стабильности образцов до 200 °C. Полученные результаты подтверждают возможность направленного регулирования физико-химических и механических свойств гидрогелей путем изменения соотношения AAm/SA и демонстрируют перспективность разработанных материалов в качестве эффективных сорбентов для очистки и переработки жидких радиоактивных отходов различного состава в практических условиях их эксплуатации.*

Ключевые слова: *питьевая вода, зона чрезвычайного радиационного риска, жесткость воды, кальций, магний, натрий, калий.*

Введение

Полимерные гидрогели представляют собой сшитые полимерные молекулы значительно набухающие в воде [1-3]. Наличие сшивок предотвращает растворение полимерной матрицы, что придает гидрогелям некоторые свойства, которые отличают их от других типов материалов. Во-первых, гидрогели способны удерживать значительное количество воды – до нескольких килограмм на грамм сухого вещества, во-вторых, набухший гидрогель предотвращает текучесть жидкости, это свойство широко используется при создании гигиенических средств, в-третьих, набухший гидрогель способен медленно отдавать накопленную воду, что определяет его использование в качестве кондиционера почв [4-7]. Варьируя химический состав гидрогелей можно получать функциональные материалы, способные не только аккумулировать значительное количество воды, но и сорбировать из растворов различные вещества.

Водные растворы от работы ядерных реакторов являются жидкими радиоактивными отходами (ЖРО), которые требуют предотвращения текучести, а также надежного связывания радионуклидов, содержащихся в них. Известен способ применения гидрогелей на основе крахмала и частиц магнетита для дезактивации модельных растворов, содержащих растворимые соли урана [8]. Известен способ получения гидрогелей на основе целлюлозы и гексацианоферрата калия для удаления ионов цезия-137 из водных растворов [9] и их использования для сорбции ионов цезия из различных модельных растворов, в том числе и содержащих другие ионы. Данный сорбент показал высокую сорбционную емкость в отношении ионов цезия.

©А. Кливенко, Г. Елемесова, В. Бакланов, О. Букина, Ю. Бакланова, 2026

Исследование синтеза и характеристик новых двухфазных гибридных композиционных гидрогелей, состоящих из интеркалированных комплексов природного минерала бентонита с гексаферроцианидом меди, которые вводятся в объем полимерной матрицы. Установлено, что последовательная модификация бентонита гексаферроцианидом меди и введение в его объем сшитых сополимеров акриламида и акриловой кислоты путем полимеризации in situ способствуют формированию гетерогенной пористой структуры в полученном гибридном материале. Показана высокая сорбционная способность полученного гибридного композита по отношению к радионуклидам (ЖРО и описан механизм связывания ионов металлов-радионуклидов с компонентами гибридной композиции [10]. Целью настоящего исследования была разработка полимерного гидрогеля, способного набухать в водных средах, иметь достаточную механическую прочность, степень набухания и термическую стабильность для эффективной сорбции жидких радиоактивных отходов.

Материалы и методы

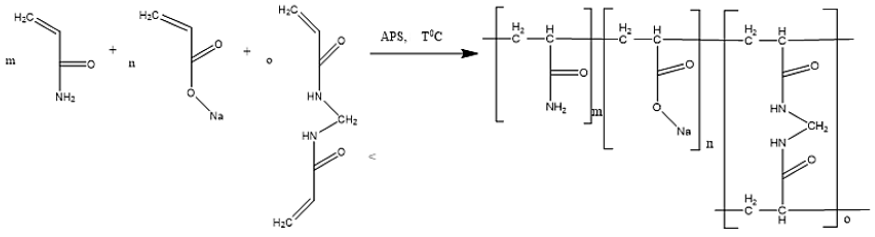
Синтез гидрогелей

Полиэлектролитные гидрогели различного на основе акриламида (AAm) и акрилата натрия (SA) были получены методом свободнорадикальной сополимеризации. Для синтеза гидрогелей, заданные количества мономеров, сшивающего агента и бентонита растворяли в дистиллированной воде при постоянном перемешивании. Акрилат натрия (SA) предварительно получали нейтрализацией акриловой кислоты раствором гидроксида натрия. В полученный раствор добавляли рассчитанные количества инициаторов – 10%-ных растворов персульфата аммония (ПСА) и тетраметилэтилендиамина (TMED) по 0,1 мл каждого, после чего смесь тщательно перемешивали до полного растворения компонентов. Реакционную смесь помещали в синтетическую емкость и продували аргоном в течение 15-20 минут для удаления растворённого кислорода. Процесс свободнорадикальной сополимеризации проводили при температуре 60°C в течение 3 часов при постоянном перемешивании. Образовавшийся гидрогель нарезали на фрагменты толщиной около 0,5 см, высушивали при комнатной температуре и использовали для последующих исследований. В результате синтеза была получена серия образцов с переменным исходным составом. Вариации исходных смесей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношения масс реагентов для синтеза полиэлектролитных гидрогелей с изменением соотношения мономеров AAм/SA

Соотношение AAм/SA, %	95/5	90/10	85/15	80/20	75/25
Состав исходных мономерных смесей	Масса, г				
Бентонит	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Вода	9	9	9	9	9
MBAA	0.0107	0.0107	0.0107	0.0107	0.0107
AAm	0.4645	0.4151	0.4068	0.3903	0.2430
SA	0.0248	0.0742	0.0825	0.0990	0.2464

На рисунке 1 приведена схема получения гидрогелей.



APS – персульфат аммония

Рисунок 1 – Схема получения гидрогелей на основе AAm-SA

Исследование кинетики набухания гидрогелей

Кинетика набухания гидрогелей изучалась в деионизированной воде методом гравиметрического анализа. Для этого предварительно высушенные и взвешенные образцы гидрогеля помещали в ёмкость с дистиллированной водой при температуре 24 °C и оставляли

для набухания. Через заданные промежутки времени (5, 10, 15, 30, 60, 180, 1440, 2880 и 4320 минут) образцы извлекали из раствора, аккуратно удаляли излишки влаги с поверхности при помощи фильтровальной бумаги и вновь взвешивали. После измерения образцы возвращали в ту же среду для продолжения процесса набухания.

Степень набухания гидрогелей определяли по формуле:

$$SD = \frac{m_t - m_0}{m_0}$$

где

SD – степень набухания гидрогеля, г/г

m_t – масса образца в момент времени, г

m_0 – масса сухого образца, г

Исследования влияния различных факторов на степень набухания гидрогелей

Степень набухания гидрогелей определяли гравиметрическим методом. Для этого предварительно высушенный образец помещали в стакан с дистиллированной водой или раствором и выдерживали в течение 24 часов до достижения равновесного состояния. После этого образец извлекали, удаляли влагу с поверхности фильтровальной бумагой и взвешивали. При исследовании влияния температуры измерения выполнялись при температурах 20°C, 40°C, 60°C и 80°C. При исследовании влияния ионной силы исследование проводили в водных растворах с различной концентрацией хлорида натрия (от 1 до 150 г/л). При исследовании влияния pH эксперименты проводились в растворах с различным значением pH от 2 до 12.

Исследование механических свойств гидрогелей

Механические характеристики гидрогелей были изучены с использованием текстурного анализатора TA.XTplus (Stable Micro Systems, Mason Technology, Великобритания). Измерения проводились в режиме сжатия при комнатной температуре. Каждый образец тестировался трижды, после чего рассчитывались средние значения полученных данных. Для приложения нагрузки к образцу использовался цилиндрический стальной зонд P/75 диаметром 75 мм, регистрирующий изменения сжимающей силы в зависимости от расстояния и времени. По полученным данным строились диаграммы зависимости «напряжение-деформация».

Параметры испытаний были следующими:

- начальная скорость перемещения зонда – 1 мм/с;
- скорость тестирования – 0,5 мм/с;
- сила отпускания – 0,2 г;
- режим «удалённая цель» с расстоянием 1,5 мм.

Значение напряжения (σ), выражающее силу, приходящуюся на единицу площади, рассчитывали по формуле:

$$\sigma = F/S$$

где F – максимальная сила сжатия, а S – площадь основания зонда.

Термогравиметрическое исследование гидрогелей

Термическую стабильность гидрогелей исследовали с использованием термоанализатора STA 449 F3 Jupiter (Shimadzu, Япония). Образцы массой 8 мг подвергали нагреву в диапазоне температур 25-800°C со скоростью 10 °C/мин в атмосфере азота.

Результаты и их обсуждение

Исследование степени набухания гидрогелей показало, что образцы состава AAm_{85}/SA_{15} имеют наибольшую степень набухания (рис. 2). Таким образом с ростом содержания акриалата натрия в составе наблюдается увеличение степени набухания. Такой эффект объясняется тем, что заряженные звенья акрилата натрия при диссоциации растягивают полимерную цепь за счет электростатического отталкивания одноименно заряженных звеньев.

На рисунке 3 представлены образцы гидрогелей как в сухом, так и в набухшем состоянии.

Изображение позволяет визуально оценить различие в размерах набухшего и высушенного образцов гидрогелей.

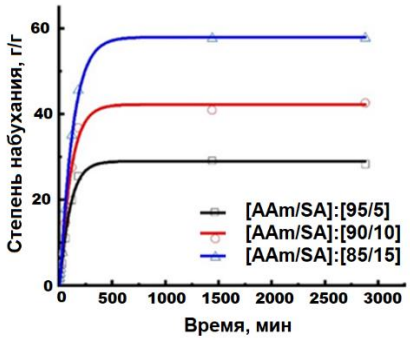


Рисунок 2 – Зависимость степени набухания гидрогелей от времени

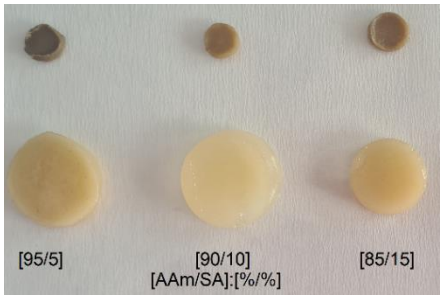


Рисунок 3 – Высушенные (верхний ряд) и набухшие (нижний ряд) образцы гидрогелей

Влияние ионной силы на степень набухания гидрогелей

На рисунке 4 показана зависимость степени набухания полиэлектролитных гидрогелей от концентрации соли в растворе.

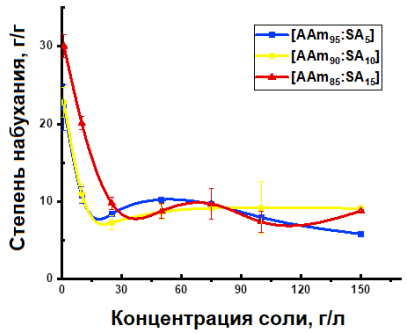


Рисунок 4 – Зависимость степени набухания гидрогелей от концентрации соли

Как видно из рисунка 4, степень набухания гидрогелей заметно снижается с ростом концентрации соли. Резкое уменьшение степени набухания в 3 раза при повышении концентрации соли от 0 до 20 г/л объясняется уменьшением осмотического давления между полимерной матрицей и внешним раствором. В растворах с высокой ионной силой происходит экранирование зарядов на полимерных цепях и снижение разности осмотического давления, которая является основной движущей силой процесса набухания. В результате уменьшается проникновение воды внутрь геля, и равновесная степень набухания достигает более низких значений.

Влияние температуры на степень набухания гидрогелей

Хотя химическая структура синтезированных гелей не предполагает значительного изменения объема гелей от температуры, тем не менее влияние температуры на степень набухания гелей изучалось. На рисунке 5 показана зависимость степени набухания гидрогелей температуры раствора.

Как видно из рисунка 5, с повышением температуры до 80°C наблюдается заметное увеличение способности гидрогелей к набуханию. В целом для гидрогелей повышение температуры способствует росту степени набухания.

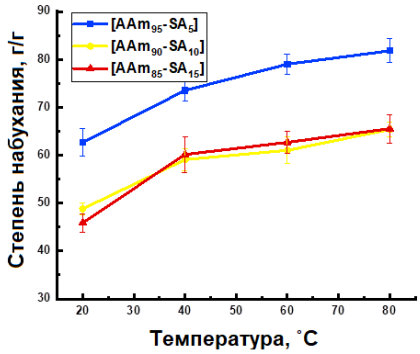


Рисунок 5 – Зависимость степени набухания гидрогелей от температуры

Такое поведение связано с увеличением кинетической энергии молекул воды при более высокой температуре, что облегчает их проникновение в полимерную сетку и ускоряет процесс диффузии. Кроме того, частичное ослабление межмолекулярных водородных связей внутри полимера при нагревании способствует увеличению подвижности макромолекулярных цепей, что также приводит к расширению структуры и росту степени набухания.

Влияние кислотно-щелочной среды на степень набухания гидрогелей

На рисунке 6 представлена зависимость степени набухания гидрогелей от pH среды.

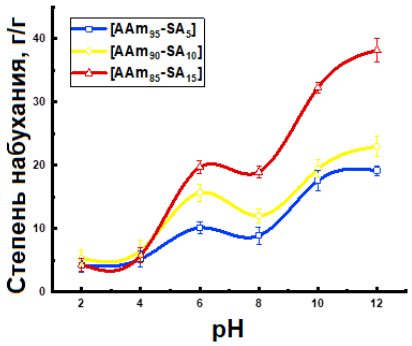


Рисунок 6 – Влияние значения pH на степень набухания гидрогелей

Как показано на рисунке 6, в кислой среде степень набухания гидрогелей возрастает по мере увеличения pH. Этот эффект связан с уменьшением концентрации протонов, которые в кислой среде экранируют отрицательно заряженные группы полимера, ослабляя электростатическое отталкивание между ними. При повышении pH зарядовая плотность на полимерных цепях возрастает, что способствует усилению электростатического отталкивания и, следовательно, расширению структуры геля. В диапазоне pH 6-8 степень набухания остается практически постоянной, что указывает на достижение равновесия между ионизированными ($–COO^-$) и недиссоциированными (–COOH) группами, обеспечивающего стабильную структуру геля. При pH выше 8 происходит полная ионизация карбоксильных групп с образованием карбоксилатных форм ($–COO^-$), что может вызывать частичный гидролиз полимерной матрицы. Это приводит к снижению прочности структуры и повышению водопроницаемости, в результате чего наблюдается дополнительное увеличение степени набухания гидрогеля.

Исследование механической прочности гидрогелей

Механическая прочность гидрогелей количественно оценивается модулем Юнга, который рассчитывается как тангенс угла наклона кривой зависимости приложенного напряжения от степени деформации образца. На рисунке 7 представлены зависимости модулей Юнга гидрогелей от их состава.

Как видно из рисунка 7 с уменьшением содержания акриламида и увеличением доли акрилата натрия модуль Юнга снижается, так как акриламид формирует плотную и жесткую сетку, а акрилат натрия повышает гидрофильность и приводит к образованию более рыхлой и менее упругой структуры, что уменьшает механическую прочность гидрогелей.

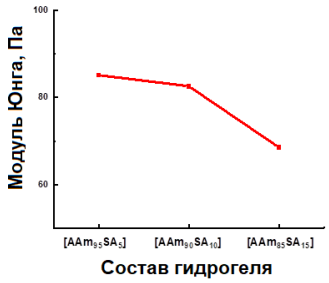


Рисунок 7 – Модуль Юнга гидрогелей в зависимости от состава AAm-SA

Механическая прочность гидрогелей определяется плотностью сшивок в их трёхмерной сетчатой структуре, которая напрямую зависит от концентрации мономеров в исходной смеси. При более высоком содержании мономеров в процессе полимеризации образуется больше реакционноспособных центров, участвующих в реакциях сшивания. Это способствует формированию большего количества ковалентных связей между полимерными цепями и, соответственно, более плотной сетчатой структуры. При этом с ростом содержания мономера и сшивающего агента уменьшается размер пор между полимерными цепями, что приводит к образованию более компактной структуры. Такая плотная сеть ограничивает подвижность молекул воды внутри матрицы гидрогеля, способствуя повышению его механической стабильности.

Термогравиметрическое исследование гидрогелей

Термогравиметрический анализ гидрогеля, показывает многостадийный характер термической деструкции (рис. 8).

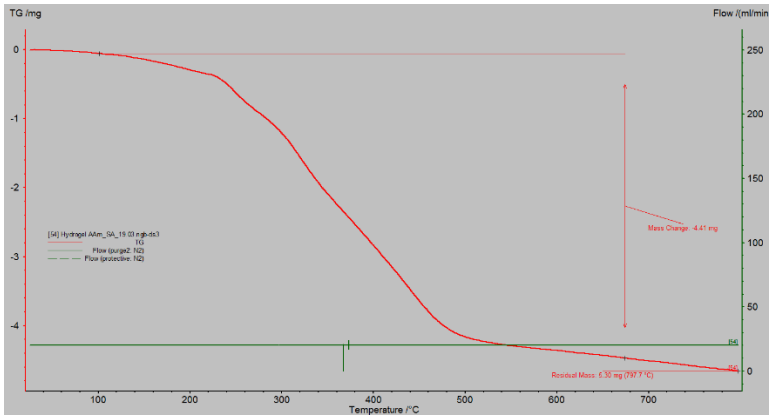


Рисунок 8 – Термогравиметрическая кривая гидрогеля AAm_{95}-SA_5

На начальном участке до приблизительно 180-200°C наблюдается незначительное снижение массы, которое может быть связано преимущественно с удалением физически сорбированной и связанной воды из полимерной сетки. Относительно небольшая величина этой потери свидетельствует о том, что перед анализом образец был достаточно хорошо высушен.

В интервале приблизительно 200-250°C появляется более выраженное изменение массы, что может быть связано с началом термической деструкции полимерной сетки и изменением структуры функциональных групп полиакриламидного фрагмента. Основная потеря массы наблюдается в диапазоне примерно 250-500°C. Этот участок соответствует интенсивной термодеструкции полимерной матрицы и, вероятно, включает несколько перекрывающихся процессов, связанных с разрушением амидных групп полиакриламида, деградацией углеродной цепи, а также термическими превращениями карбоксилатных групп полиакрилата натрия.

После 500°C скорость потери массы существенно уменьшается. Тем не менее, постепенное снижение массы продолжается вплоть до температуры около 800 °C, что указывает на дальнейшее разложение термически устойчивых фрагментов полимерной сетки и формирование углеродсодержащего остатка. При конечной температуре анализа

остаточная масса составила около 5.30 мг, что соответствует приблизительно 54.6% первоначальной массы образца, тогда как общая потеря массы составила 4.41 мг (45.4%).

Таким образом, гидрогель демонстрирует относительно высокую термическую стабильность до порядка 200°C, после чего начинается последовательная термодеструкция полимерной сетки. Наиболее интенсивное разложение происходит в диапазоне 250-500°C. Наличие значительного остатка после нагревания до порядка 800°C может быть связано с образованием термостабильного углеродистого остатка, а также с наличием неорганических компонентов/натриевых продуктов превращения акрилатных групп.

Заключение

В результате проведённого исследования установлены основные закономерности изменения физико-химических и эксплуатационных характеристик гидрогелей на основе акриламида (AAm) и акрилата натрия (SA), сшитых N,N′-метиленбисакриламидом.

Установлено, что увеличение содержания акрилата натрия приводит к повышению степени набухания гидрогелей. Наибольшая степень набухания наблюдалась для состава AAm_{85}/SA_{15}, что связано с увеличением количества ионизированных карбоксилатных групп и усилением электростатического отталкивания между заряженными звеньями полимерной сетки.

Показано существенное влияние ионной силы раствора на набухание гидрогелей. При увеличении концентрации соли от 0 до 20 г/л степень набухания снижается примерно в 3 раза вследствие экранирования зарядов полимерной сетки и уменьшения осмотической разности между гидрогелем и внешним раствором.

Повышение температуры среды до 80°C, напротив, сопровождается увеличением степени набухания. Это связано с повышением подвижности молекул воды и макромолекулярных цепей, а также облегчением диффузии воды в трёхмерную полимерную сетку.

Исследование влияния pH показало увеличение степени набухания в кислой области при повышении pH, практически постоянную степень набухания в диапазоне pH 6-8 и дополнительное увеличение набухания при pH > 8. Наблюдаемая зависимость обусловлена изменением степени ионизации карбоксильных групп полимерной сетки и, при высоких значениях pH, возможным частичным гидролизом полимерной матрицы.

Установлено, что увеличение доли акрилата натрия сопровождается снижением модуля Юнга. Повышение содержания акриламида и сшивающего агента, напротив, способствует формированию более плотной трёхмерной сетки, уменьшению размеров пор и повышению механической стабильности гидрогелей. Таким образом, изменение соотношения AAm/SA позволяет регулировать соотношение между способностью к набуханию и механической прочностью материала.

Термогравиметрический анализ образца AAm_{95}/SA_5 показал многостадийный характер термической деструкции. До 180-200°C наблюдается преимущественно удаление сорбированной и связанной воды, тогда как наиболее интенсивная потеря массы происходит в диапазоне 250-500°C и связана с деструкцией органической полимерной матрицы. При температуре около 800°C остаточная масса составляет 54,6%, при общей потере массы 45,4%. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой термической стабильности гидрогеля до ~200°C и наличии значительной термически устойчивой остаточной фазы после высокотемпературной обработки.

В целом результаты показывают, что состав AAm/SA может быть использован в качестве гидрогелевого сорбента жидких радиоактивных отходов. Выявленные закономерности позволяют целенаправленно подбирать состав полимерной сетки в зависимости от требований к её водопоглощающей способности, механической стабильности и устойчивости в различных эксплуатационных условиях.

Список литературы

1. Filippova O.E. «Umnye» polimernye gidrogeli / O.E. Filippova // Priroda. – 2005. – № 8. – S. 11-17. https://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/08_05/GELS.HTM.Preparation and characterization of a preformed polyampholyte particle gel composite for conformance control in oil recovery / I. Gussenov et al // Polymers. – 2023. – Vol. 15, № 20, Art. 4095. https://doi.org/10.3390/polym15204095. (in Russian).

2. Preparation and characterization of preformed polyelectrolyte and polyampholyte gel particles for plugging of high-permeability porous media / G. Yelemessova et al // Gels. – 2024. – Vol. 10, № 9, Art. 562. https://doi.org/10.3390/gels10090562.
3. Synthesis and characterization of preformed particle gels (PPG) to increase oil recovery / G.T. Yelemessova et al // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Chemistry and Technology. – 2023. – № 4. – P. 79-91. https://doi.org/https://doi.org/10.32014/2023.2518-1491.194.
4. Restoring the natural vegetation on strongly eroded volcanic soils of Cape Verde (West Africa) / W. Van Cotthem et al // Soil Technology. – 1991. – Vol. 4, № 2. – P. 183-189. https://doi.org/10.1016/0933-3630(91)90030-Q.
5. Hydrophobic aggregation in aqueous solutions of hydrophobically modified polyacrylamide in the vicinity of overlap concentration / Y. Shashkina et al // Polymer. – 2003. – Vol. 44, № 8. – P. 2289-2293. https://www.x-mol.com/paper/5166314.
6. Gussenov I. Bulk gels for permeability reduction in fractured and matrix reservoirs / I. Gussenov, N. Nuraje, S. Kudaibergenov // Energy Reports. – 2019. – Vol. 5. – P. 733-746. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.012.
7. Surface decontamination of uranium using a starch-based magnetic strippable hydrogel / J. Li et al // Nuclear Engineering and Design. – 2025. – Vol. 442, Art. 114199. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114199.
8. Nanostructured potassium copper hexacyanoferrate-cellulose hydrogel for selective and rapid cesium adsorption / Y. Kim et al // Chemical Engineering Journal. – 2017. – Vol. 313. – P. 1042-1050. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.136.
9. Mamytbekov G.K. Synthesis and investigation of the properties of biphasic hybrid composites based on bentonite, copper hexacyanoferrate, acrylamide and acrylic acid hydrogel / G.K. Mamytbekov, D.A. Zheltov, Y.R. Nurtazin // Polymers. – 2023. – Vol. 15, № 12, Art. 2586. https://doi.org/10.3390/polym15122586.

Благодарности: *Исследования выполнены при финансовой поддержке КН МНВО РК в рамках программно-целевого финансирования BR24993140 «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки жидких радиоактивных отходов».*

А. Кливенко[1]*, Г. Елемесова[1], В. Бакланов[2] , О. Букина[2] , Ю. Бақланова[2]
[1]Шәкәрім университеті ,
071412 Қазақстан Республикасы, Семей қ., көш. Глинки, 20А
[2]Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институты
180010 Қазақстан Республикасы, Курчатов қаласы, Бейбіт атом көшесі, 10
*e-mail: alexeyklivenko @ mail.ru

СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ СОРБЦИЯЛАУҒА АРНАЛҒАН КАНДИДАТ МАТЕРИАЛДАР РЕТІНДЕ ПОЛИМЕРЛІК ГИДРОГЕЛЬДЕРДІҢ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ ҚАСИЕТТЕРІ

Акриламид (AAm) және натрий акрилаты (SA) негізіндегі полиэлектролит гидрогельдерінің сериясы синтезделіп, n,n'-метилен-бис-акриламидпен өзара байланысқан, мономерлердің әртүрлі қатынасы бар. Үлгілер еркін радикалды сополимерлеу әдісімен алынады, содан кейін олардың судағы ісіну дәрежесі, ортаның иондық күшіне, температураға және pH сезімталдығы, механикалық сипаттамалары мен термиялық тұрақтылығы зерттеледі. Натрий акрилатының үлесінің жоғарылауы иондалған карбоксилат топтарының концентрациясының жоғарылауына және полимерлі тор фрагменттері арасындағы электростатикалық итерудің жоғарылауына байланысты судың сіңуінің жоғарылауына әкелетіні анықталды. Сонымен қатар, Юнг Модулінің төмендеуі байқалады, бұл материалдың қаттылығының төмендеуін көрсетеді. Тұз концентрациясының жоғарылауы зарядтардың антиондармен қорғалуына байланысты ісіну дәрежесінің шамамен үш есе төмендеуіне әкеледі. Керісінше, температураның 80 °C дейін көтерілуі және ортаның pH жоғарылауы гидрогельдердің ісінуіне ықпал етеді. Термогравиметриялық талдау термиялық деструкцияның көп сатылы сипатын және үлгілердің жоғары тұрақтылығын 200°C дейін сақтауды көрсетті. алынған нәтижелер гидрогельдердің физика-химиялық және механикалық қасиеттерін AAm/SA қатынасын өзгерту арқылы бағытталған реттеу мүмкіндігін растайды және оларды пайдаланудың практикалық жағдайларында әртүрлі құрамдағы сұйық радиоактивті қалдықтарды тазарту және өңдеу үшін тиімді сорбенттер ретінде әзірленген материалдардың перспективасын көрсетеді.

Түйін сөздер: *полимер гидрогельдері, акриламид, сұйық радиоактивті қалдықтар, механикалық беріктік, термиялық тұрақтылық, ісіну дәрежесі.*

A. Klivenko[1]*, G. Elemesova[1] , V. Baklanov[2] , O. Bukina[2] , Yu. Baklanova[2]
[1]Shakarim University,
071412 Republic of Kazakhstan, Semey, st. Glinki, 20 A
[2]Institute of Atomic Energy of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan
180010 Republic of Kazakhstan, Kurchatov city, Beybit atom street 10
*e-mail: alexeyklivenko @ mail. ru

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF POLYMER HYDROGELS AS CANDIDATE MATERIALS FOR THE SORPTION OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE

A series of polyelectrolyte hydrogels based on acrylamide (AAm) and sodium acrylate (SA) crosslinked with N,N'-methylene bis-acrylamide with different monomer ratios has been synthesized. The samples were obtained by free radical copolymerization, after which their equilibrium degree of swelling in water, sensitivity to the ionic strength of the medium, temperature and pH, as well as mechanical characteristics and thermal stability were studied. It was found that an increase in the proportion of sodium acrylate leads to an increase in water absorption due to an increase in the concentration of ionized carboxylate groups and increased electrostatic repulsion between polymer mesh fragments. At the same time, there is a decrease in the Young's modulus, indicating a decrease in the stiffness of the material. An increase in the salt concentration causes an approximately threefold decrease in the degree of swelling due to the shielding of charges by counterions. On the contrary, an increase in temperature to 80°C and an increase in the pH of the medium contribute to the swelling of hydrogels. Thermogravimetric analysis showed the multi-stage nature of thermal degradation and the preservation of high stability of samples up to 200 °C. The results obtained confirm the possibility of directional regulation of the physico-chemical and mechanical properties of hydrogels by changing the AAm/SA ratio and demonstrate the prospects of the developed materials as effective sorbents for the purification and processing of liquid radioactive waste of various compositions in practical conditions of their operation.

Key words: *polymer hydrogels, acrylamide, liquid radioactive waste, mechanical strength, thermal stability, swelling degree.*

Сведения об авторах

Алексей Николаевич Кливенко* – PhD, ассоциированный профессор, директор Shakarim Lab, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: alexeyklivenko@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8971-686X.

Гульнур Тайбековна Елемесова – PhD, руководитель лаборатории анализа кормов и почв Shakarim Lab, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: kussainova_g91@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1074-7111.

Виктор Владимирович Бакланов – PhD, ассоциированный профессор, Директор филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Юлия Юрьевна Бакланова – начальник отдела материаловедческих испытаний, филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Ольга Сергеевна Букина – начальник лаборатории испытаний конструкционных и топливных материалов; филиал Институт атомной энергии РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Казахстан; e-mail: o.bukina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2564-0421.

Авторлар туралы мәліметтер

Алексей Николаевич Кливенко – PhD, қауымдастырылған профессор, Shakarim Lab директоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: alexeyklivenko@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8971-686X.

Гульнур Тайбековна Елемесова – PhD, Shakarim Lab жем-шөп талдау зертханасының жетекшісі, Шәкәрім университет, Қазақстан Республикасы; e-mail: kussainova_g91@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1074-7111.

Виктор Владимирович Бакланов – PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалының директоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Юлия Юрьевна Бакланова – ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалының материалтану сынақтары бөлімінің жетекшісі, Қазақстан Республикасы; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Ольга Сергеевна Букина – конструкциялық және отын материалдарын сынау зертханасының жетекшісі, «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК Атом энергиясы институты филиалы, Қазақстан Республикасы; e-mail: o.bukina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2564-0421.

Information about the authors

Alexey Klivenko – PhD, Associate Professor, Director of Shakarim Lab, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: alexeyklivenko@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8971-686X.

Gulnur Yelemessova – PhD, head of the feed Analysis Laboratory Shakarim Lab, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kussainova_g91@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1074-7111.

Viktor Baklanov – PhD, associate professor, Director of the branch «Institute of Atomic Energy» of the RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Yulia Baklanova – Head of the Department of Materials Science Testing, «Institute of Atomic Energy» RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Olga Bukina – Head of the Laboratory for Testing Structural and Fuel materials, Branch of the Institute of Atomic Energy of the RSE «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan», Kazakhstan; e-mail: o.bukina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2564-0421.

Поступила в редакцию 03.06.2026
Поступила после доработки 25.07.2026
Принята к публикации 03.09.2026