

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКАЯ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 31.07.2026

Статья принята к публикации: 10.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 678.6+661.7+631.4

**Синтез и свойства композиционных гидрогелей на основе желатина,
окисленного крахмала и акриловой кислоты для водосбережения в
условиях засушливого климата**

Нарзуллаев Бахтиёр Абдуллаевич
аспирант

Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, Ташкентская область, Ташкентский р-н, п/о Шуро-базар
E-mail: baktiyor.narzullayev.97@mail.ru

Ширинов Шавкат Давлатович
д-р техн. наук, PhD

вед. науч. сотр. Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, Ташкент

**Synthesis and properties of composite hydrogels based on gelatin, oxidized
starch and acrylic acid for water retention in arid climates**

Narzullayev Bakhtiyor
graduate student of Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent region, Tashkent district, p / o Shuro Bazaar

Shirinov Shavkat
doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD)
Leading Research Fellow, Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Нарзуллаев Б.А., Ширинов Ш.Д. Синтез и свойства композиционных гидрогелей на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты для водосбережения в условиях засушливого климата // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23293>

Аннотация

В настоящей работе представлены результаты синтеза и исследования композиционных гидрогелей на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты, предназначенных для эффективного удержания влаги в почве и повышения рациональности использования водных ресурсов в сельском хозяйстве. Целью работы является синтез композиционных гидрогелей на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты и установление влияния содержания акриловой кислоты на их структурные особенности, кинетику набухания и водопоглощающую способность для определения оптимального состава гидрогеля, обладающего высокой влагоудерживающей способностью.

Композитные гидрогели были получены методом свободнорадикальной полимеризации с использованием различных концентраций акриловой кислоты. Структурные особенности синтезированных материалов изучены методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR), подтвердившим успешное образование трёхмерной полимерной сети и формирование химических связей между компонентами гидрогеля. Исследовано влияние содержания акриловой кислоты на кинетику набухания и водопоглощающую способность материалов. Установлено, что увеличение концентрации акриловой кислоты способствует росту гидрофильности полимерной матрицы и повышению степени набухания до оптимального значения. Наиболее высокие показатели продемонстрировал образец AAJ-4, содержащий 50 % акриловой кислоты, максимальная равновесная водопоглощающая способность которого составила 536 г/г. Показано, что дальнейшее увеличение содержания акриловой кислоты приводит к снижению водопоглощения вследствие увеличения плотности поперечных сшивок. Предложен механизм частичной биоразлагаемости гидрогелей, основанный на гидролитическом разрушении ковалентных сложноэфирных связей и диссоциации ионных поперечных сшивок. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный композиционный гидрогель сочетает высокую водоудерживающую способность, интенсивную кинетику набухания и контролируемую частичную биоразлагаемость, что делает его перспективным материалом для применения в условиях дефицита водных ресурсов, повышения влагообеспеченности почв и создания экологически безопасных влагосберегающих технологий в сельском хозяйстве.

Abstract

This paper presents the results of the synthesis and characterization of composite hydrogels based on gelatin, oxidized starch, and acrylic acid. These hydrogels are designed to effectively retain soil moisture and improve water efficiency in agriculture. The aim of this study is to synthesize composite hydrogels based on gelatin, oxidized starch, and acrylic acid and to determine the effect of acrylic acid content on their structural properties, swelling kinetics, and water absorption capacity. This helps determine the optimal hydrogel composition with high water retention capacity.

The composite hydrogels were obtained by free-radical polymerization using various acrylic acid concentrations. The structural properties of the synthesized materials were studied using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), confirming the successful formation of a three-

dimensional polymer network and the formation of chemical bonds between the hydrogel components. The effect of acrylic acid content on swelling kinetics and water absorption capacity of the materials was also studied. It was found that increasing the acrylic acid concentration promotes increased hydrophilicity of the polymer matrix and increases the swelling ratio to an optimal value. Sample AAJ-4, containing 50 % acrylic acid, demonstrated the highest values, with a maximum equilibrium water absorption capacity of 536 g/g. A further increase in acrylic acid content was shown to decrease water absorption due to an increase in cross-link density. A mechanism for the partial biodegradability of hydrogels based on the hydrolytic destruction of covalent ester bonds and the dissociation of ionic cross-links was proposed. The results indicate that the developed composite hydrogel combines high water-holding capacity, intense swelling kinetics, and controlled partial biodegradability, making it a promising material for use in conditions of water scarcity, for increasing soil moisture availability, and for the development of environmentally friendly, water-saving technologies in agriculture.

Ключевые слова: композиционный гидрогель, желатин, окисленный крахмал, акриловая кислота, набухание, водопоглощение, частичная биоразлагаемость, FTIR, водоудержание, сельское хозяйство.

Keywords: Composite hydrogel, gelatin, oxidized starch, acrylic acid, swelling, water absorption, partial biodegradability, FTIR, water retention, agriculture.

Введение

В условиях изменения климата и опустынивания, когда уменьшение количества осадков и увеличение испарения приводят к значительным потерям воды и резкому снижению продуктивности, по оценкам, к 2050 году около 6 миллиардов человек столкнутся с нехваткой воды. Кроме того, традиционные методы водосбережения, такие как капельное орошение и микроспринклеры, часто характеризуются высокими затратами на внедрение и эксплуатацию [1;8]. В таких условиях биоразлагаемые гидрогели представляют собой перспективную платформу для сельского хозяйства, обеспечивающую эффективное сохранение воды, стабилизацию влажности почвы и контролируемое высвобождение агрохимикатов [3;9].

Однако отмечается, что чрезмерное применение гидрогелей может привести к дефициту кислорода в корневой зоне и застою воды, а также что биополимерные гидрогели обладают недостаточной механической прочностью. В связи с этим подчеркивается необходимость разработки недорогих и прочных композитных материалов для их практического применения [5;7].

Современные обзорные исследования показывают, что гидрогели способны поглощать и удерживать воду в почве, а затем постепенно высвобождать воду и питательные вещества посредством механизма «десвеллинга-диффузии» (deswelling — уменьшение объёма набухшей полимерной сети: в увлажнённой среде гидрогель набухает, а при высыхании среды или поглощении воды растениями вследствие транспирации снижение внутреннего осмотического давления и релаксация полимерной сети вызывают её сжатие и уменьшение объёма). Благодаря этому снижаются потери питательных веществ вследствие вымывания и повышается урожайность сельскохозяйственных культур [7;6].

Плотность эластически активных цепей, приходящихся на единицу объёма полимерной сети, характеризует степень её сшивки, тогда как количество гидрофильных функциональных групп является одним из основных факторов, определяющих водоудерживающую способность гидрогеля. В качестве ключевых требований к идеальному почвенному кондиционеру рекомендуются сверхвысокая водопоглощающая способность, биоразлагаемость и наличие ковалентно-сшитой полимерной сети [2].

Комплексные исследования показывают, что гидрогели способны удерживать удобрения в режиме «фиксация–контролируемое высвобождение», обеспечивая их высвобождение примерно в два раза медленнее по сравнению с внесением в водном растворе. Это способствует снижению вымывания питательных веществ и сокращению выбросов N_2O . Кроме того, насыщенная гидрогелем полимерная сеть стабилизирует структуру почвы и создаёт благоприятные условия для развития корневой системы растений [4;10].

Целью настоящей работы является синтез композиционных гидрогелей на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты, а также исследование влияния содержания акриловой кислоты на их структурные характеристики, кинетику набухания и водопоглощающую способность с целью определения оптимального состава гидрогеля для эффективного удержания влаги в почве и рационального использования водных ресурсов в сельском хозяйстве.

Экспериментальная часть. Композитный гидрогель был синтезирован методом свободнорадикальной полимеризации. На первом этапе был приготовлен раствор акриламида (AAm). Для этого 10,0 г акриламида растворяли в 50 г дистиллированной воды при перемешивании на магнитной мешалке до полного растворения. Затем готовили раствор желатина: 3,0 г желатина добавляли к 15 г дистиллированной воды и перемешивали на магнитной мешалке при комнатной температуре до полного растворения.

На следующем этапе готовили раствор сшивающего агента. Для этого 0,25 г N,N'-метиленабисакриламида (МБА) полностью растворяли в 10 г дистиллированной воды. Одновременно готовили раствор инициатора, растворяя 0,40 г персульфата аммония (APS) в 9 г дистиллированной воды. Поскольку раствор APS является источником свободных радикалов, его готовили непосредственно перед проведением эксперимента для сохранения активности. Для регулирования pH реакционной среды готовили рабочий раствор, растворяя 4,0 г гидроксида натрия (NaOH) в 40 г дистиллированной воды.

Синтезированный гидрогель был всесторонне охарактеризован с использованием современных аналитических методов для изучения его физико-химических свойств, морфологии и водопоглощающей способности.

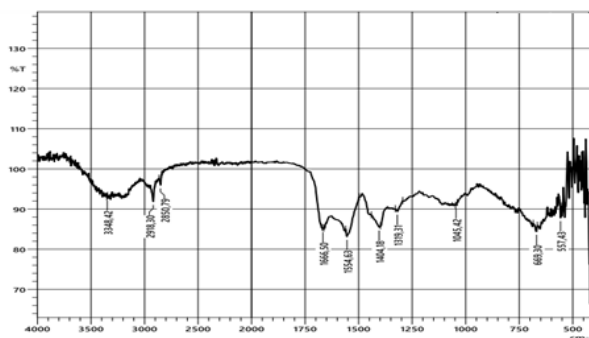


Рисунок 1. ИК-Фурье спектр синтезированного композитного гидрогеля

В ИК-спектре широкий пик поглощения при 3384 см^{-1} указывает на образование прочных водородных связей между гидроксильными и амидными группами. Это свидетельствует о сильных межмолекулярных взаимодействиях между желатином, окисленным крахмалом и полиакриламидом в процессе формирования гидрогелевой сетки. Пики Amide I и Amide II при 1666 см^{-1} и 1555 см^{-1} подтверждают сохранение амидных групп в желатине и полиакриламиде. Характерный пик связи $\text{C}=\text{C}$ ($\sim 1610\text{--}1625\text{ см}^{-1}$), наблюдаемый в свободном мономере акриламида, в спектре не наблюдается. Это указывает на успешное завершение полимеризации акриламида. Сильное поглощение при 1045 см^{-1} соответствует связям $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ и $\text{C}-\text{O}$ крахмала, что подтверждает успешное включение окисленного крахмала в полимерную сетку.

Результаты и их обсуждение. Целью настоящего обзора является систематизация современных подходов к синтезу гидрогелей на основе биополимеров, анализ факторов, влияющих на степень их набухания, а также комплексное рассмотрение основных направлений их применения в сельском хозяйстве. Анализ литературных данных показывает, что гидрогели обладают значительным потенциалом для регулирования влажности почвы и контролируемого высвобождения питательных веществ и агрохимических соединений, что соответствует принципам устойчивого сельского хозяйства. Вместе с тем остаются недостаточно изученными особенности взаимодействия гидрогелей с различными видами растений, влияние условий окружающей среды на их эффективность, отсутствует научный консенсус относительно оптимального выбора типа биополимера, его концентрации и способа применения, а также недостаточно исследованы долгосрочные последствия их использования для почвенной микробиоты и экосистем. Кроме того, большинство существующих исследований выполнено в лабораторных условиях, тогда как внедрение данной технологии в крупномасштабное сельскохозяйственное производство сталкивается с технологическими и логистическими ограничениями и требует дальнейшей оценки её экономической эффективности в реальных условиях эксплуатации.

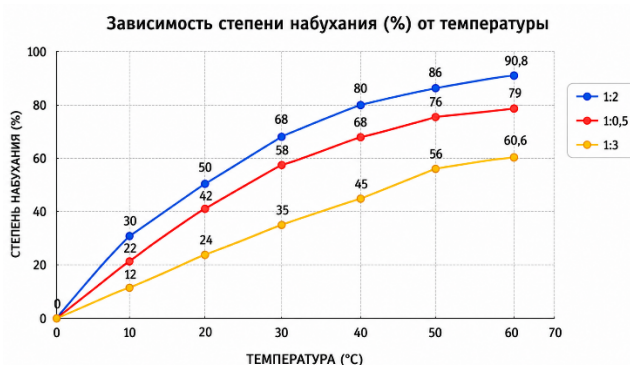


Рисунок 2. Влияние температуры на степень набухания композитных гидрогелей с различным соотношением компонентов

Основная научная новизна данной работы заключается в установлении того, что биоразложение трёхмерной полимерной сети на основе биополимеров протекает преимущественно по двум взаимодополняющим механизмам, сопровождающимся деполимеризацией биополимерных компонентов. Первый механизм основан на гидролитическом разрушении ковалентно-сшитой трёхмерной сети, образованной за счёт связей типа $(-O-CO-)$, соединяющих две или более полимерные цепи. В водной среде под действием кислотного или щелочного катализа происходит нуклеофильная атака, приводящая к гидролизу сложноэфирных связей и разрушению узлов пространственной сети $(-COO-R \rightarrow -COOH + R-OH)$. Второй механизм связан с диссоциацией ионных сшивок (например, $-COO^- \cdots Ca^{2+} \cdots OOC^-$), которая происходит вследствие увеличения ионной силы среды, катионного обмена $(Ca^{2+} \leftrightarrow Na^+/K^+/NH_4^+)$ или протонирования карбоксильных групп при низких значениях pH, что приводит к разрушению физической пространственной структуры гидрогеля.

Акриловая кислота оказывает существенное влияние на процесс биоразложения благодаря наличию ионизируемых карбоксильных групп $(-COOH/-COO^-)$, которые значительно повышают гидрофильность и степень набухания гидрогеля. В результате облегчается диффузия воды внутрь полимерной сети, что способствует ускорению процессов биоразложения. В предлагаемом гидрогеле деградация преимущественно обусловлена разрушением биополимерных фрагментов и гидролизующимися полимерными связями, тогда как полимерная цепь, сформированная акриловой кислотой, характеризуется значительно более высокой устойчивостью к разложению и деградирует существенно медленнее. В связи с этим разработанная система может быть отнесена к классу частично биоразлагаемых гидрогелей.

Таблица 1.

Кинетические параметры водопоглощения гидрогеля AAJ-4 в зависимости от времени

№	Время (часы)	Q/Q_e (%)	Водопоглощение, Q (г/г)	Средняя скорость всасывания (г/г·час)
1	0	0.0	0.0	—
2	3	$\approx 30.4^*$	163.0	54.33
3	6	60.8	325.9	54.33
4	12	82.3	441.1	19.20
5	18	93.7	502.2	10.18

В таблице 1 представлена кинетика водопоглощения гидрогеля ААJ-4 в зависимости от времени. Наиболее интенсивное водопоглощение наблюдается на начальной стадии набухания (0–6 ч) со средней скоростью 54,33 г/(г·ч/ч). Эта стадия связана с высокой концентрацией свободных гидрофильных функциональных групп и значительным градиентом концентрации между полимерной матрицей и водной средой. По мере насыщения гидрогеля скорость водопоглощения постепенно снижается до 19,20 г/(г·ч/ч) через 12 ч и до 10,18 г/(г·ч/ч) через 18 ч, что связано с уменьшением свободного объема полимерной сетки и достижением состояния набухания, близкого к равновесному. Через 18 ч гидрогель достигает 93,7 % от равновесной водопоглощающей способности (502,2 г/г), что указывает на высокую эффективность удержания воды и быстрое формирование стабильной трехмерной гидрофильной структуры.

В заключение В настоящей работе методом свободнорадикальной полимеризации были успешно синтезированы частично биоразлагаемые композиционные гидрогели на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты. Результаты ИК-Фурье-спектроскопии подтвердили формирование трёхмерной полимерной сети за счёт образования поперечных сшивок между компонентами гидрогеля.

Установлено, что содержание акриловой кислоты оказывает существенное влияние на кинетику набухания и водопоглощающую способность гидрогелей. С увеличением концентрации акриловой кислоты возрастает гидрофильность полимерной сети благодаря наличию ионизируемых карбоксильных групп, что способствует ускорению диффузии воды и повышению степени набухания. Среди исследованных образцов наилучшие показатели продемонстрировал гидрогель ААJ-4, содержащий 50 % акриловой кислоты, который достиг максимальной равновесной водопоглощающей способности 536 г/г. При этом через 6 часов степень водопоглощения составила 60,8 %, а через 18 часов достигла 93,7 % от равновесного значения. Дальнейшее увеличение содержания акриловой кислоты до 60 % сопровождалось снижением водопоглощения вследствие повышения плотности сшивки полимерной сети и уменьшения её подвижности.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный композиционный гидрогель ААJ-4 сочетает высокую вододерживающую способность, интенсивную кинетику набухания и контролируемую частичную биоразлагаемость. Благодаря этим свойствам материал представляет значительный практический интерес в качестве влагосберегающего и экологически безопасного суперабсорбента для сельского хозяйства, особенно в условиях дефицита водных ресурсов и засушливого климата.

Список литературы

1. Ahmed, E.M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review / E.M. Ahmed // Journal of Advanced Research. – 2015. – Т. 6, № 2. – Р. 105–121.
2. Guilherme, M.R. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for agricultural and environmental applications / M.R. Guilherme, F.A. Aouada, A.R. Fajardo [et al.] // European Polymer Journal. – 2021. – Т. 150.

3. Ismail, H. Starch-based hydrogels: Present status and applications / H. Ismail, M. Irani, Z. Ahmad // International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials. – 2021. – Т. 70, № 10. – P. 709–725.
4. Kabiri, K. Superabsorbent hydrogel composites and nanocomposites: A review / K. Kabiri, H. Omidian, M.J. Zohuriaan-Mehr, S. Doroudiani // Polymer Composites. – 2020. – Т. 41, № 2. – P. 373–398.
5. Li, X. Biopolymer-based hydrogels for water retention and controlled release in agricultural applications / X. Li, Y. Zhao, H. Chen [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. – 2023. – Т. 236.
6. Montesano, F.F. Biodegradable superabsorbent hydrogels for agricultural applications: A review / F.F. Montesano, A. Parente, P. Santamaria [et al.] // Agronomy. – 2022. – Т. 12.
7. Rosiak, J.M. Hydrogels and their medical and agricultural applications / J.M. Rosiak, F. Yoshii // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2019. – Т. 236. – P. 370–375.
8. Thakur, V.K. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites / V.K. Thakur, M.K. Thakur // Carbohydrate Polymers. – 2021. – Т. 257.
9. Wang, W. Recent advances in biodegradable superabsorbent hydrogels for sustainable agriculture / W. Wang, Y. Zhang, J. Liu [et al.] // Carbohydrate Polymers. – 2023. – Т. 301.
10. Zhang, H. Preparation and characterization of biodegradable gelatin-based hydrogels with enhanced swelling properties / H. Zhang, X. Wang, Y. Liu [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. – 2022. – Т. 139.