



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 148–158

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 148–158

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-2-148-158>, EDN: CMHZQH

Научная статья

УДК 547.458.6+[54.057+544.723]

## Влияние архитектуры трёхмерной сетки графт-сополимера ксантана с акриламидом на его сорбционные свойства в модельных средах различной химической природы



А. К. Смирнов , Е. Р. Сиськова, А. Б. Шиповская

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Смирнов Антон Константинович, аспирант Института химии, [anton.smirnov.98@yandex.ru](mailto:anton.smirnov.98@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4759-3432>

Сиськова Евгения Романовна, студент 3-го курса Института химии, [yevgeniya.siskova@mail.ru](mailto:yevgeniya.siskova@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-2178-3413>

Шиповская Анна Борисовна, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой полимеров на базе ООО «АКРИПОЛ» Института химии, начальник отдела высокомолекулярных соединений Образовательно-научного института наноструктур и биосистем, [shipovskayaab@yandex.ru](mailto:shipovskayaab@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1916-4067>

**Аннотация.** Графт-сополимеры на основе природных полисахаридов являются перспективными материалами для создания био-разлагаемых сорбентов с регулируемым комплексом свойств. В работе методом радикальной микроволновой полимеризации синтезированы девять образцов водонабухающего графт-сополимера ксантана с акриламидом. Исследовано влияние стадии введения (иницирование, рост или обрыв цепи) сшивающего агента и массового соотношения компонентов химической реакции, определяющих архитектуру полимерной сетки, на сорбционные характеристики полученного материала. Установлено, что сорбционная способность графт-сополимера в воде (рН 7) и водно-солевой среде (20% NaCl,  $I = 3.4$  М, рН 7) достигает 15.0 г/г, что превышает водопоглощающую способность описанных в литературе ксантан-содержащих сорбентов. Сорбционная способность в 0.1 М HCl ( $I = 0.1$  М, рН 4) и 0.1 М NaOH ( $I = 0.1$  М, рН 10) снижается до 10.3 г/г, но по сравнению с аналогичными сорбентами остаётся достаточно высокой. Степень сорбции водной фазы коррелирует с архитектурой пространственной сетки: максимальное водопоглощение характерно для образцов с высокой долей полиакриламида, синтезированных при введении сшивающего агента на стадиях роста или обрыва цепи. На процесс водопоглощения в кислой и щелочной средах дополнительное влияние оказывают конформационные изменения ксантановой матрицы, гидролиз полиакриламидных ветвей, а также расположение, количество и плотность швов макроцепей. При этом сорбционные свойства материала сохраняются в условиях повторяющихся циклов набухания–сушка. Обнаружено также, что синтезированные образцы графт-сополимера проявляют способность селективного извлечения водной фазы из водонефтяной эмульсии. В модельном эксперименте с использованием почвогрунта и тест-растений выявлена влагоудерживающая способность и нетоксичность исследованного графт-сополимера. Совокупность полученных результатов позволяет рассматривать синтезированный графт-сополимер ксантана с акриламидом в качестве перспективного экологически безопасного сорбционного материала для очистки природных и технических вод, извлечения воды из специфических водоземulsionных сред, влагоудерживающих агентов для сельского хозяйства и агробиотехнологий.

**Ключевые слова:** графт-сополимер, ксантан, акриламид, микроволновое излучение, сорбция, водопоглощение, устойчивость

**Для цитирования:** Смирнов А. К., Сиськова Е. Р., Шиповская А. Б. Влияние архитектуры трёхмерной сетки графт-сополимера ксантана с акриламидом на его сорбционные свойства в модельных средах различной химической природы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 148–158. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-2-148-158>, EDN: CMHZQH

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

**Influence of the three-dimensional network architecture of xanthan gum-graft-polyacrylamide copolymer on its sorption properties in model media of different chemical nature**

А. К. Smirnov , Е. R. Siskova, А. B. Shipovskaya

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Anton K. Smirnov, [anton.smirnov.98@yandex.ru](mailto:anton.smirnov.98@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4759-3432>

Evgenia R. Siskova, [yevgeniya.siskova@mail.ru](mailto:yevgeniya.siskova@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-2178-3413>

Anna B. Shipovskaya, [shipovskayaab@yandex.ru](mailto:shipovskayaab@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1916-4067>

© Смирнов А. К., Сиськова Е. Р., Шиповская А. Б., 2026



**Abstract.** Graft copolymers based on natural polysaccharides are promising materials for the development of biodegradable sorbents with a tunable set of properties. In this work, nine samples of a water-swelling graft copolymer of xanthan gum with acrylamide have been synthesized via radical microwave polymerization. The influence of the crosslinking agent introduction stage (initiation, propagation, or termination) and the mass ratio of the chemical reaction components, which determine the polymer network architecture, on the sorption characteristics of the obtained material have been investigated. It has been established that the sorption capacity of the graft copolymer in water (pH 7) and in a saline medium (20% NaCl,  $I = 3.4$  M, pH 7) reaches 15.0 g/g, which exceeds the water absorption capacity of xanthan-containing sorbents described in the literature. The sorption capacity in 0.1 mM HCl ( $I = 0.1$  mM, pH 4) and 0.1 mM NaOH ( $I = 0.1$  mM, pH 10) decreases to 10.3 g/g but remains relatively high compared to similar sorbents. The degree of aqueous phase sorption correlates with the architecture of the spatial network: maximum water absorption is characteristic of samples with a high proportion of polyacrylamide, synthesized by introducing the crosslinking agent at the propagation or termination stages. The water absorption process in acidic and alkaline media is additionally influenced by conformational changes in the xanthan matrix, hydrolysis of polyacrylamide chains, as well as the location, number, and density of crosslinks of the macromolecular chain segments. The synthesized graft copolymer samples exhibit the ability to selectively extract the aqueous phase from a water-oil emulsion. The preservation of the material's sorption properties under repeated swelling-drying cycles has been observed. In a model experiment using potting soil and test plants, the water-retention capacity of the studied samples has been revealed, as well as the absence of phytotoxicity. The combination of the obtained results allows the synthesized xanthan gum graft copolymers with acrylamide to be considered as promising environmentally friendly sorbent materials for the purification of natural and industrial waters, the extraction of water from specific water-emulsion media, and as water-retention agents for agriculture and agribiotechnology.

**Keywords:** graft copolymer, xanthan, acrylamide, microwave radiation, sorption, swelling, stability

**For citation:** Smirnov A. K., Siskova E. R., Shipovskaya A. B. Influence of the three-dimensional network architecture of xanthan gum-graft-polyacrylamide copolymer on its sorption properties in model media of different chemical nature. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 148–158 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-2-148-158>, EDN: CMHZQH

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Поиск и разработка высокоэффективных сорбентов на основе высокомолекулярных соединений, способных поглощать и удерживать большое количество воды, является важной задачей полимерного материаловедения [1–3]. Водопоглощающие сорбционные материалы находят применение в разных сферах промышленности и сельского хозяйства, включая агроэкологические приложения. Поскольку такие сорбенты используются для решения задач ресурсосбережения, ремедиации и мелиорации, к ним предъявляются высокие стандарты качества и эффективности [4, 5]. Полимерный материал должен обладать высокой сорбционной способностью, быть экологически безопасным и устойчивым к широкому спектру химических сред, а также выдерживать многократное использование [6].

Перспективным решением видится применение биоразлагаемых сорбентов на основе разветвленных графт-сополимеров, получаемых модификацией природных полисахаридов (целлюлозы, хитозана, пуллулана, альгинатов, ксантана и др.) посредством ковалентного присоединения синтетических полимерных цепей [7–9]. Это позволяет совместить в сорбционном материале биоразлагаемость и экологичность природной матрицы с прецизионными функциональными свойствами синтетического компонента. Важным преимуществом приви-

той сополимеризации является возможность регулирования молекулярной структуры и, соответственно, свойств сорбента путем варьирования типа прививаемого мономера, а также длины и плотности упорядочения боковых цепей. Модификация параметров и условий синтеза, включая соотношение компонентов, время реакции, тип и концентрацию сшивающего агента, позволяет на базе одного графт-сополимера создать несколько разновидностей сорбционных материалов, которые могут быть использованы для решения различных задач в области сорбции [10–12].

Особый интерес в ряду природных полисахаридов представляет ксантан, что обусловлено сочетанием уникальных реологических свойств с устойчивостью данного полимера в широком диапазоне pH и ионной силы среды, а также наличием в элементарных звеньях боковых макроцепей реакционноспособных карбоксильных групп [13, 14]. Это обуславливает его перспективность для создания «интеллектуальных» сорбентов, функциональные характеристики которых могут быть оптимизированы посредством модификации пространственной структуры полимерной матрицы [15, 16].

Ранее нами было установлено, что архитектура полимерной сетки водонабухающего графт-сополимера ксантана с акриламидом, задаваемая введением сшивающего агента на стадии инициирования ( $t_i$ ), роста ( $t_p$ ) или обрыва цепи ( $t_r$ ) и соотношением природной и



синтетической составляющих, влияет на равновесную степень набухания полимера в воде и кинетику сорбции модельных красителей [10]. С практической точки зрения, для детального изучения водопоглощающих характеристик графт-сополимера необходимы исследования в модельных средах, максимально имитирующих реальные условия эксплуатации материала. Важным является изучение сорбционных свойств и стабильности полимера в условиях химического стресса, например, в кислых и щелочных средах, высокоминерализованных рассолах, а также в водно-нефтяных эмульсиях, где на процесс сорбции могут влиять поверхностные явления и конкурентное поглощение компонентов. Проведение данных исследований представляет собой обязательный этап для осуществления прогнозирования и повышения эффективности практического применения сорбента. Так, в отличие от ксантана, полиакриламид нестабилен в щелочных средах и подвержен процессу гидролиза. Однако продукт его сополимеризации с полисахаридом, благодаря присущей графт-сополимерам компенсации недостатков как природной, так и синтетической составляющих, должен проявлять синергетический эффект, объединяя положительные свойства обоих компонентов.

Цель работы – исследование сорбционных свойств графт-сополимера ксантана с акриламидом, в котором варьируются параметры архитектуры трёхмерной сетки, в смешанных водных средах разной химической природы, уровня pH и ионной силы, имитирующих поведение сорбционного материала в реальных условиях промышленной эксплуатации.

## Материалы и методы

### Материалы

В работе использовали порошкообразный образец ксантана (КС) со средневязкостной молекулярной массой 1700 кДа от TNN group DL (Далянь, Китай), 40% водный раствор акриламида (АА) и порошок N,N-метиленабисакриламида (МБА) от ООО «АКРИПОЛ» (Саратов, РФ), персульфат аммония (ПСА) компании Hebei Fiza Technology Co., Ltd (Хэбэй, Китай), 95% этиловый, изопропиловый спирты и хлорид натрия ХЧ от АО «ВЕКТОН» (Санкт-Петербург, РФ), соляную кислоту фик-

санал от АО «НПИП «Уралхиминвест» (Уфа, РФ), гидроксид натрия ХЧ от ЗАО ЛАВЕРНА (Москва, РФ), дистиллированную воду.

В качестве модельных сорбционных сред выбраны водные растворы NaCl, HCl и NaOH, нефть и водонефтяная эмульсия. 20% раствор NaCl (pH 7;  $I = 3.4$  М) и 0.1 мМ раствор NaOH (pH 10;  $I = 0.1$  мМ) готовили растворением расчётных навесок в дистиллированной воде по стандартной методике. 0.1 мМ раствор HCl (pH 4,  $I = 0.1$  мМ) готовили из фиксанала. Эмульсию «вода в нефти» получали введением дистиллированной воды в нефтяную фазу в объёмном соотношении нефть:вода = 70:30 при механическом перемешивании.

### Микроволновый синтез графт-сополимера

Синтез графт-сополимера проводили по методике, описанной в работе [10], с десятикратным увеличением количеств исходных реагентов при сохранении их стехиометрического соотношения. В реакционную колбу последовательно вносили 120 мл 1% раствора ксантана, 30 мл 1% раствора ПСА и заданный объём 40% раствора АА. Массу АА ( $m_{AA}$ ) в реакционной смеси варьировали в диапазоне 8–32 г, масса КС ( $m_{КС}$ ) оставалась постоянной, 1.2 г. Полимеризацию проводили под действием микроволнового излучения (MW, 700 Вт) в течение 3 мин ( $t$ ) и введением сшивающего агента МВА на стадии иницирования ( $t_i = 0$  мин), либо роста ( $t_p = 1$  мин) или завершения роста цепи ( $t_f = 3$  мин). По окончании реакции продукт очищали от гомополимера и непрореагировавшего мономера промывкой водно-этанольной смесью (80:20). Затем осаждали в аналогичной смеси при температуре 4°C в течение 48 ч. Синтезированный продукт высушивали при 70°C до достижения постоянной массы и измельчали до порошкообразного состояния и среднего размера частиц  $5 \pm 2$  мкм. Далее графт-сополимер будем обозначать как КС-прив-ПАА-№, где ПАА – боковые цепи полиакриламида, № – номер образца в табл. 1.

### Методы исследования

Гравиметрические измерения проводили на аналитических весах Ohaus Discovery (США), точность взвешивания  $\pm 0.01$  мг.

Степень прививки рассчитывали по формуле

$$G = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100\%,$$



Таблица 1 / Table 1

**Характеристика образцов графт-сополимера КС-прив-ПАА**  
**Characteristics of XG-g-PAA graft copolymer samples**

№ КС-прив-ПАА / No. XG-g-PAAm	Условия синтеза / Synthesis conditions		Степень прививки G, % / Grafting degree G, %
	Соотношение $m_{КС} : m_{АА}$ в реакционной смеси, г:г / $m_{XG} : m_{AA}$ ratio in the reaction mixture, g:g	Стадия введения сшивающего агента / Stage of crosslinking agent introduction	
1	1.2:8	$t_i$	530
2		$t_p$	640
3		$t_f$	815
4	1.2:16	$t_i$	1440
5		$t_p$	1790
6		$t_f$	1475
7	1.2:32	$t_i$	2910
8		$t_p$	3150
9		$t_f$	3120

где  $m_0$  и  $m_1$  – масса взятого в реакцию полисахарида и синтезированного графт-сополимера соответственно, г.

Водопоглощающую способность ( $W$ , г/г) привитого сополимера в воде ( $W_{H_2O}$ , контроль), водно-солевой ( $W_{NaCl}$ ), водно-кислотной ( $W_{HCl}$ ) и водно-щелочной средах ( $W_{NaOH}$ ), нефти ( $W_H$ ) и водонефтяной эмульсии ( $W_{эм}$ ) оценивали иммерсионным методом, выдерживая образцы в сорбционной среде при  $22 \pm 2^\circ C$  течение 48 ч ( $t_c$ ). Водопоглощение рассчитывали по формуле

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100\%,$$

где  $m_0$  и  $m_1$  – масса воздушно-сухого и набухшего образца графт-сополимера соответственно, г.

Стабильность графт-сополимера оценивали путем циклического попеременного процесса сорбция–десорбция. Сорбционный процесс проводили в дистиллированной воде как описано выше в течение 24 ч. Перед каждым циклом сорбции образцы, набухшие до равновесного значения  $W_{H_2O}$ , высушивали в сушильном шкафу 2В-151 (РФ) при  $70^\circ C$  до воздушно-сухого состояния. Продолжительность опыта составила 6 циклов.

Влагоудерживающие свойства графт-сополимера изучали на модели почвогрунта ООО «ФАБРИКА ГРУНТОВ» (Екатеринбург, РФ) и тест-растений пшеницы *Triticum aestivum* L. с мочковатой корневой системой и льна *Linum usitatissimum* L. со стержневой. Образец графт-

сополимера массой 0.5 г предварительно выдерживали в воде до достижения равновесной степени сорбции, затем помещали в 250 г почвогрунта, в который высаживали тест-семена и поливали 250 мл воды (экспериментальная группа). Выращивание тест-растений проводили согласно технологии их посадки и ухода в течение 15 сут с регулярным поливом в объеме 250 мл воды один раз в пять суток. Аналогичные эксперименты в идентичных условиях проводили на исходном почвогрунте без добавления полимера (контрольная группа). Сравнительный анализ экспериментальной и контрольной групп проводили по параметрам всхожести, длины корней и побегов тест-растения.

**Результаты и их обсуждение**

*Сорбционные свойства графт-сополимера КС-прив-ПАА в водной среде при варьировании ионной силы и pH*

В результате радикальной MW-полимеризации были синтезированы девять образцов сшитого графт-сополимера ксантана с акриламидом, различающихся по параметрам архитектуры пространственной сетки. Различия достигались за счет изменения стадии и, соответственно, времени добавления в реакционную смесь сшивающего агента, который вводили на этапах инициирования ( $t_i = 0$  мин), роста ( $t_p = 1$  мин) или обрыва цепи ( $t_f = 3$  мин).



Также варьировалось массовое соотношение исходных компонентов реакции: ксантана ( $m_{КС}$ ) и акриламида ( $m_{АА}$ ).

Образцы графт-сополимера КС-прив-ПАА-[1, 4, 7], полученные при введении МВА на этапе инициирования, характеризуются хаотично сшитой плотной пространственной сеткой, охватывающей как боковые ответвления ПАА, так и основную цепь КС [10]. Образцы КС-прив-ПАА-[2, 5, 8,] и КС-прив-ПАА-[3, 6, 9], т.е. полученные при введении МВА на стадии роста боковых ответвлений или обрыва кинетических цепей, имеют более рыхлую сетчатую структуру, образованную преимущественно посредством сшивания цепей ПАА, с меньшим количеством узлов и увеличенным расстоянием между ними для КС-прив-ПАА-[3, 6, 9]. При этом в процессе введения МВА на поздних стадиях полимеризации наблюдается увеличение степени прививки графт-сополимера (см. табл. 1). Значения  $G$  возрастают и с повышением массовой доли взятого в реакцию АА, достигая максимальных показателей для образцов КС-прив-ПАА-[7–9].

Синтезированные образцы графт-сополимера продемонстрировали способность к водопоглощению во всех исследованных

сорбатах, включая воду, водно-солевую, водно-кислотную, водно-щелочную и водно-нефтяную среды. Разрушения и деградации графт-сополимера в течение сорбционных экспериментов не обнаружено. Рассмотрим отдельно сорбционные свойства образцов в каждой из указанных сред.

#### Сорбция воды

Процесс поглощения воды (рН 7) образцами привитого сополимера КС-прив-ПАА характеризуется классическими закономерностями: зависимость  $W_{H_2O} = f(t_c)$  подчиняется закону Фика с достижением равновесных значений степени сорбции (рис. 1, а). Фаза интенсивного набухания наблюдается в течение 10 ч, а равновесное значение  $W_{H_2O}$  достигается за 24 ч. Реализуемые значения водопоглощения варьируются в диапазоне 9.7–14.7 г/г и сравнительно высокие. Более того, образцы КС-прив-ПАА-[6, 9] демонстрируют значения  $W_{H_2O}$ , превышающие таковые для описанных в литературе графт-сополимеров КС с АА [15, 17]. Степень поглощения воды возрастает при увеличении доли ПАА в графт-сополимере и, соответственно, степени прививки образцов, а также при введении сшивающего агента на более поздней стадии полимеризации (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Характеристика сорбционной способности образцов графт-сополимера КС-прив-ПАА в сорбционных средах различной химической природы**  
**Characteristics of the sorption capacity of samples of graft copolymer KS-priv-PAА in sorption media of various chemical nature**

№	Сорбционные среды / Sorption Media					
	Водная среда / Aqueous medium				Нефтяная среда, об.% / Oil medium, vol.%	
	H <sub>2</sub> O рН 7 (контроль / control)	20% NaCl рН 7 $I = 3.4$ М	0.1 мМ HCl рН 4 $I = 0.1$ мМ	0.1 мМ NaOH рН 10 $I = 0.1$ мМ	Нефть:вода / Oil:water 70:30	Нефть / Oil 100
	Степень сорбции, г/г / Degree of sorption, g/g					
	$W_{H_2O}$	$W_{NaCl}$	$W_{HCl}$	$W_{NaOH}$	$W_{ЭМ}$	$W_H$
1	9.74±2.39	11.69±1.05	10.10±1.10	10.20±0.61	6.0	0.4
2	8.89±1.21	11.82±0.67	9.25±0.47	10.25±2.35	5.6	0.2
3	10.30±4.93	7.12±4.50	3.68±0.80	1.11±0.33	0.1	0.1
4	10.02±1.65	12.50±1.31	8.62±0.14	9.21±0.25	7.5	0.1
5	10.94±1.94	13.25±2.89	7.01±1.20	7.71±2.02	6.7	0.1
6	14.47±1.90	15.04±3.84	8.72±0.86	10.77±2.33	4.4	0.1
7	11.57±2.57	8.41±1.95	6.80±0.89	7.19±0.70	8.3	0.3
8	12.72±1.61	12.86±3.06	9.52±1.12	9.67±0.52	–	–
9	14.72±3.59	12.73±6.03	10.12±2.05	9.37±0.93	5.5	0.1

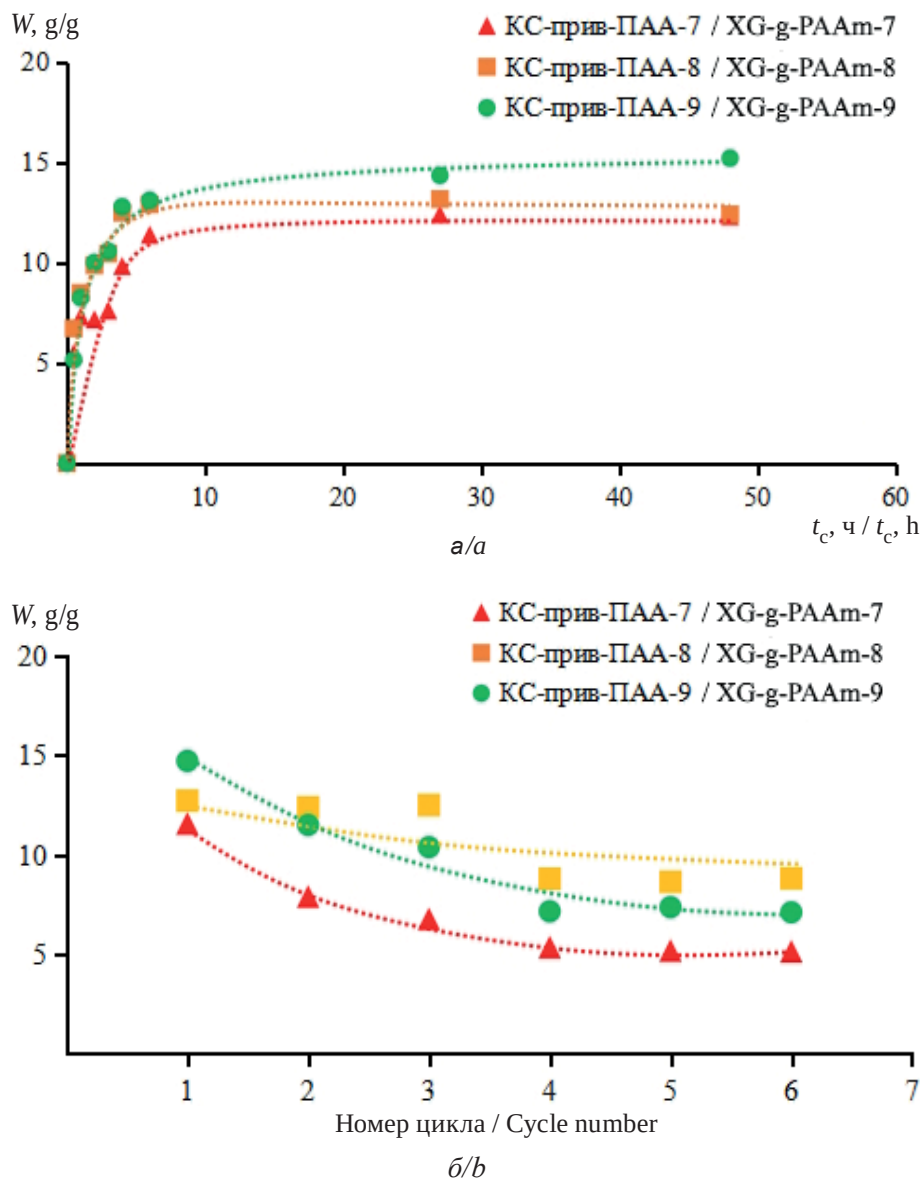


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции воды (а) и изменение водопоглощающей способности в зависимости от цикла сорбция–десорбция (б) для образцов графт-сополимера КС-прив-ПАА-[7–9]

Fig. 1. Kinetic curves of water sorption (a) and changes in water absorption capacity depending on the “swelling–drying” cycle (b) for samples of the graft copolymer XG-g-PAA-[7–9]

Процесс сушки образцов, подвергшихся предварительному набуханию в воде до равновесного значения  $W_{H_2O}$ , до воздушно-сухого состояния не оказывает существенного негативного влияния на их фундаментальные сорбционные свойства. Несмотря на то что графт-сополимер снижает первоначальную сорбционную способность в результате шести циклов сорбция–десорбция ( $\Delta W_{H_2O} = 30–50\%$ ), эти изменения не являются значимыми для полисахаридсодержащих сорбентов (см. рис. 1, б,

показано на примере образцов КС-прив-ПАА-[7–9]). При этом воспроизводимость сорбционных свойств материала в условиях повторяющихся циклов набухание–сушка в значимой степени зависит от структурных особенностей графт-сополимера. Так, наиболее устойчивым к многократному набуханию в воде после высушивания оказался образец КС-прив-ПАА-8, полученный введением МВА на стадии роста ( $t_p$ ) и с максимальным содержанием ПАА. На протяжении трёх циклов его сорбционная



способность снижается не более, чем на 5%. Образцы КС-прив-ПАА-[7, 9] также показали хорошую воспроизводимость водопоглощения, сохранив около 50% своей сорбционной способности даже после шестого цикла попеременного набухания и сушки.

#### Сорбция 20% водного раствора NaCl

Выбор для исследования сорбционных свойств графт-сополимера высококонцентрированной солевой среды ( $I = 3.4$  М) обусловлен её близостью к свойствам природных высокоминерализованных рассолов. Анализ сорбционных параметров графт-сополимера в водно-солевом растворе, т.е. в условиях, соответствующих контрольной среде по значению pH, но с повышенной ионной силой, также как и в  $H_2O$  показал высокую сорбционную способность образцов,  $W_{NaCl} = 7.1-15.0$  г/г (см. табл. 2). Примечательно, что в солевом растворе степень набухания КС-прив-ПАА с высокой долей ПАА ( $m_{КС} : m_{ПАА} = 1.2:32$  г/г) сопоставима с водной средой, а с малой и средней – превышает таковую. Наилучшую сорбционную способность продемонстрировали образцы КС-прив-ПАА со средней долей ПАА ( $m_{КС} : m_{ПАА} = 1.2:16$  г/г), особенно КС-прив-ПАА-6.

#### Сорбция 0.1 мМ растворов HCl и NaOH

Водопоглощающая способность графт-сополимера в кислой (pH 4) и щелочной средах (pH 10) при равной  $I = 0.1$  мМ несколько ниже, чем в воде и солевом растворе (см. табл. 2), но достаточно высокая по сравнению с аналогичными ксантан-содержащими сорбентами [15, 17]. Как и в случае водопоглощения в  $H_2O$  и  $NaCl + H_2O$ , на степень сорбции значимое влияние оказывают структурные параметры трёхмерной пространственной сетки графт-сополимера. Для образцов с минимальной долей ПАА, КС-прив-ПАА-[1–3], наблюдается повышение водопоглощения в ряду  $t_f \rightarrow t_p \rightarrow t_i$ . Однако у образцов КС-прив-ПАА-[7–9], характеризующихся высокой долей ПАА в сополимере, в этом же ряду водонабухание убывает. Для КС-прив-ПАА-[4–6] видимой корреляции не отмечено. Зависимость водопоглощающей способности от соотношения  $m_{КС} : m_{ПАА}$  также показывает сложный характер: водопоглощение в случае КС-прив-ПАА-[1, 4, 7] повышается с уменьшением доли ПАА, тогда как для КС-прив-ПАА-[3, 6, 9] наблюдается обратная за-

висимость. Для образцов КС-прив-ПАА-[2, 5, 8] явной корреляции не установлено.

Наблюдаемые закономерности, вероятно, можно объяснить сочетанием структурных особенностей графт-сополимера. В первую очередь, отклик ксантановой матрицы на изменение pH среды. В кислой среде COOH-группы КС недиссоциированы (нейтральны), электростатическое отталкивание минимально, следовательно, макроцепь приобретает компактную свёрнутую конформацию. В щелочной среде, наоборот, группы частично диссоциированы, что способствует разбуханию макро клубков за счёт электростатического отталкивания одноимённозаряженных функциональных групп. Такое поведение может частично нивелироваться в избытке ионов  $Na^+$ , что приведёт к экранированию заряда и поджиманию клубков.

Кроме того, полиакриламидные ответвления в условиях обеих ионных сред могут подвергаться гидролизу с образованием COOH-групп. Так, при pH 4 процесс протекает сравнительно медленно и с побочной реакцией имидизации, что замедляет гидролиз. При pH 10 гидролиз протекает более эффективно, однако он замедляется формированием водородных связей между образовавшимися –COOH и –NH<sub>2</sub> группами близлежащих и/или смежных сегментов макроцепей, а также образованием соли полиакриловой кислоты –COO–Na<sup>+</sup>.

Немалое влияние на сорбционные свойства графт-сополимера в кислой и щелочной средах оказывает стадия введения сшивающего агента, которая задаёт топологию поперечных контактов [10]. Раннее введение (стадия иницирования  $t_i$ ) способствует образованию связей с участием ксантанового остова, формируя плотную сетчатую структуру. Позднее введение (стадия обрыва  $t_p$ ) приводит к сшиванию преимущественно полиакриламидных цепей, создавая более эластичную и рыхлую сетку.

Рассмотрим предполагаемые взаимодействия на примере образцов КС-прив-ПАА-[1–3], т.е. с малой долей ПАА, при их набухании в водно-кислотной среде. Полисахаридная матрица (основная макроцепь) стремится к сжатию, а полиакриламидные цепи (боковые ответвления) начинают подвергаться гидролизу. Ожидается, что в таких условиях образцы должны проявлять низкую водопоглощающую способность,



однако для образца КС-прив-ПАА-1 она максимальна. Возможно, это связано с тем, что раннее введение сшивающего агента (стадия  $t_i$ ) способствует образованию более плотной сетки и сшивок как между КС и ветвями ПАА, так и звеньями полисахарида. В результате МБА, как скрепка, удерживает ксантановую матрицу от сжатия. КС-прив-ПАА-2 близок по свойствам к первому образцу, вероятно, по причине образования незначительно меньшего числа узлов сшивки на КС и менее плотной трёхмерной сетки. Малая доля ПАА в данном случае не оказывает сильного влияния на локализацию узлов. На стадии обрыва цепи ( $t_p$ ) вероятность образования таких связей заметно снижается, что приводит к резкому уменьшению водопоглощающей способности. Наблюдаемая аналогичная закономерность в щелочной среде, по-видимому, обусловлена сжатием ксантановой матрицы и полиакриламидных ответвлений вследствие экранирования  $-\text{COO}^-$  групп избытком  $\text{Na}^+$ . Низкие значения водопоглощения в  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$  и  $\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}$  у образца КС-прив-ПАА-3 могут быть обусловлены негативным откликом графт-сополимера на сорбционную среду. Это выражается в коллапсе структуры ксантановой матрицы и аналогичном коллапсе и гидролизе полиакриламидных ответвлений вследствие меньшего количества сшивок-скрепок в сравнении с КС-прив-ПАА-[1, 2].

В случае КС-прив-ПАА-[7–9] с максимальной долей ПАА доминирующим фактором становится поведение боковых ответвлений и сорбционные закономерности согласуются с водонабуханием в водной среде. Вероятно, для образцов данной группы влияние кислотного и щелочного гидролиза минимально вследствие большего числа  $-\text{NH}_2$ -групп, что замедляет и без того не быстрый процесс гидролиза. КС-прив-ПАА-[4–6] со средней долей ПАА являются промежуточными образцами, для которых влияние всех трёх факторов на сорбционные характеристики относительно сбалансировано.

#### Сорбция воды из водонефтяной эмульсии

Результаты изучения сорбционных характеристик демонстрируют высокий потенциал графт-сополимера КС с ПАА в области очистки водных сред. В связи с этим проведена оценка его эффективности для решения актуальной задачи нефтедобывающей отрасли, связанной с обезвоживанием водонефтяных эмульсий.

Оказалось, что все образцы обладают сорбционной способностью по отношению к водной фазе эмульсии «вода в нефти», поскольку адсорбция углеводородов исходной нефти практически нулевая, а водонефтяной эмульсии достигает 5.5–8.3 г/г (см. табл. 2). Наибольшую эффективность показали объекты, синтезированные с введением сшивающего агента на стадиях инициирования ( $t_i$ ) и роста ( $t_p$ ). Чем выше доля ПАА в сополимере, тем выше его сорбционная ёмкость, что характерно для всех стадий введения сшивающего агента. Такая тенденция объясняется формированием более рыхлой полимерной сетки при увеличении содержания ПАА и, соответственно, облегчением диффузии и иммобилизации молекул воды на сорбенте. Важно отметить, что в условиях водонефтяной эмульсии процесс набухания графт-сополимера сопровождается не только поглощением воды, но и возможной ко-сорбцией полярных компонентов нефти и ионов, присутствующих в водной фазе. Данный факт необходимо учитывать при оценке реальной эффективности материала для обезвоживания эмульсий.

#### *Влагоудерживающие свойства графт-сополимера КС-прив-ПАА*

Для тестирования влагоудерживающей способности графт-сополимера в почвогрунте выбраны образцы КС-прив-ПАА-[7–9] с максимальной сорбционной способностью. Объекты характеризуются высоким содержанием синтетических боковых ответвлений и отличаются стадией введения сшивающего агента.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что ксантансодержащий сорбент проявляет свойства влагоудерживающего агента. При фиксированном объёме полива (250 мл) внесение графт-сополимера в почвогрунт продлевает период поддержания оптимального уровня влажности на 20–24 ч по сравнению с контрольной группой. Наблюдаемый эффект, предположительно, обусловлен способностью сетчатой структуры сополимера удерживать влагу и постепенно высвобождать её по мере высыхания почвы.

Анализ морфометрических параметров тест-растений пшеницы *T. aestivum* L. и льна *L. usitatissimum* L. показал, что к завершению эксперимента все объекты экспериментальной группы достигли параметров, сопоставимых с контрольной группой (рис. 2). Для пшеницы

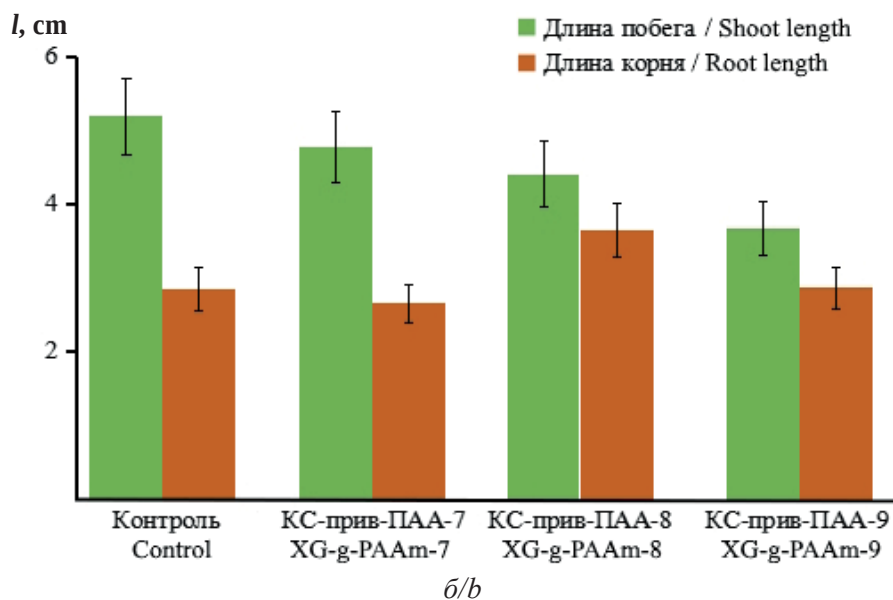
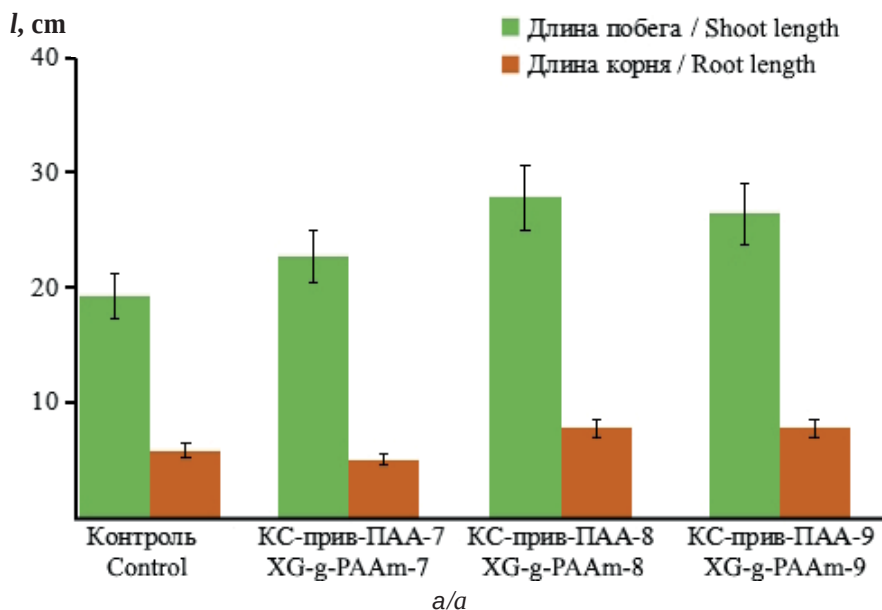


Рис. 2. Параметры тест-растений пшеницы *T. aestivum* L. (а) и льна *L. usitatissimum* L. (б), выращенных в почвогрунте без и с добавкой графт-сополимера КС-прив-ПАА (цвет онлайн)

Fig. 2. Parameters of test plants of wheat *T. aestivum* L. (a) and flax *L. usitatissimum* L. (b), grown in potting soil without and with the addition of the XG-g-PAA graft copolymer (color online)

было отмечено значительное превышение длины наземной и подземной частей проростков по сравнению с проростками, выращенными в почвогрунте без добавления графт-сополимера. В случае льна наблюдалась тенденция к увеличению длины корневой системы, наиболее выраженная при выращивании тест-растения в почвогрунте с добавлением КС-прив-ПАА-[8, 9].

Таким образом, результаты тестирования продемонстрировали не только высокую вла-

гоудерживающую способность исследованных образцов КС-прив-ПАА, но и отсутствие у них фитотоксичности. Учитывая воспроизводимость параметров водопоглощения в циклическом процессе набухания–сушка (см. рис. 1, б), практическое применение графт-сополимера КС с АА может способствовать оптимизации режима орошения сельскохозяйственных культур, сокращая частоту полива при обеспечении необходимой влажности почвы в межполивный период.



## Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что образцы графт-сополимера КС-прив-ПАА демонстрируют высокую сорбционную активность по отношению к воде при ее сорбировании из водно-солевых, водно-кислотных, водно-щелочных и водонефтяных сред. Количественные характеристики водопоглощающей способности КС-прив-ПАА зависят от параметров пространственной сетки и конформационных особенностей межузловых участков полимерных цепей, которые определяются стадией введения сшивающего агента и долей боковых синтетических ответвлений. В некоторых случаях сорбционная способность превышает степень набухания известных ксантансодержащих графт-сополимеров [15, 17], что позволяет рассматривать синтезированный графт-сополимер в качестве высокоэффективного сорбционного материала. Сорбент проявляет механическую стабильность в условиях высококонцентрированного рассола с высокой ионной силой, что характерно исключительно для КС и не свойственно индивидуальному ПАА, а также обладает способностью извлекать водную фазу из водонефтяной эмульсии, что выделяет его среди сорбционных материалов как на основе ПАА, так и КС. Кроме того, выявлена возможность многократного применения графт-сополимера в различных циклических сорбционных процессах, а также в качестве влагоудерживающей добавки для сельскохозяйственных земель.

## Список литературы

1. Zhang Y., Chen L., Wang H., Li J. Biodegradable superabsorbent hydrogels for soil moisture management // *Carbohydrate Polymers*. 2022. Vol. 292. Art. 119693. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119693>
2. Данилова Т. Н., Табынбаева Л. К., Кененбаев С. Б., Бойко В. С. Роль абсорбента AQUASORB в улучшении водоудерживающей способности почв // *Агрофизика*. 2018. Т. 2. С. 1–8. <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2018.02.01>
3. Behera S., Mahanwar P. A. Superabsorbent polymers in agriculture and other applications: A review // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2020. Vol. 59, № 4. P. 341–356. <https://doi.org/10.1080/25740881.2019.1647239>
4. Soil remediation and plants: Prospects and challenges / eds. K. Hakeem, M. Sabir, M. Ozturk, A. R. Mermut. Academic Press, Elsevier, 2014. 752 p.
5. Копчик Г. Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // *Почвоведение*. 2014. № 7. С. 851–868. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14070077>
6. Максимова Ю. Г., Щетко В. А., Максимов А. Ю. Полимерные гидрогели в сельском хозяйстве (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58, № 1. С. 23–42. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.1.23rus>
7. Мочалова А. Е., Круглова Е. Н., Юнин П. А., Апрятина К. В., Смирнова О. Н., Смирнова Л. А. Получение привитых и блок-сополимеров хитозана с виниловыми мономерами, их структура и свойства // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 2015. Т. 57, № 2. С. 99–112. <https://doi.org/10.7868/S2308113915020114>
8. Кузнецова Ю. Л., Морозова Е. А., Вавилова А. С., Маркин А. В., Смирнова О. Н., Захарычева Н. С., Лякаев Д. В., Семенычева Л. Л. Синтез биодegradуемых привитых сополимеров желатина и полиметилметакрилата // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 1. С. 22–29. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2020-0-1-22-29>
9. Kumar D., Pandey J., Raj V., Kumar P. A review on the modification of polysaccharide through graft copolymerization for various potential applications // *The Open Medicinal Chemistry Journal*. 2017. Vol. 11. Art. 109. <https://doi.org/10.2174/1874104501711010109>
10. Smirnov A. K., Pelipenko D. F., Shmakov S. L., Zakharevich A. M., Shipovskaya A. B. Effect of the crosslinker introduction stage on the structure and properties of xanthan gum–acrylamide graft copolymer // *Polymers*. 2025. Vol. 17. Art. 2841. <https://doi.org/10.3390/polym17212841>
11. Кудышкин В. О., Абрарова З. М., Бозоров Н. И., Жумартова У. У., Усманова М. М., Ашуров Н. Ш., Рашидова С. Ш. Особенности синтеза привитых сополимеров хитозана и акриловой кислоты // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 2024. Т. 66, № 1. С. 23–30. <https://doi.org/10.31857/S2308113924010035>
12. Li J., Ji J., Xia J., Li B. Preparation of konjac glucomannan-based superabsorbent polymers by frontal polymerization // *Carbohydrate Polymers*. 2012. Vol. 87, no. 1. P. 757–763. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.060>
13. Zheng M., Lian F., Zhu Y., Zhang Y., Liu B., Zhang L., Zheng B. pH-responsive poly (xanthan gum-g-acrylamide-g-acrylic acid) hydrogel: Preparation, characterization, and application // *Carbohydrate Polymers*. 2019. Vol. 210. P. 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.052>
14. Patel A. Synthesis of acrylamide grafted xanthan gum by microwave assisted method: Ftir characteristics and acute oral toxicity study // *International Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2016. Vol. 7, № 1. P. 129–145.
15. Jindal R., Kaith B. S., Mittal H. Rapid synthesis of acrylamide onto xanthan gum based hydrogels un-



der microwave radiations for enhanced thermal and chemical modifications // *Polymers from Renewable Resources*. 2011. Vol. 2, № 3. P. 105–116. <https://doi.org/10.1177/204124791100200302>

16. Jalali M. A., Koohi A. D., Sheykhan M. Experimental study of the removal of copper ions using hydrogels of xanthan, 2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid, montmorillonite: Kinetic and equilibrium study // *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 142. P. 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.01.033>
17. Tang S., Gong Z., Wang Z., Gao X., Zhang X. Multifunctional hydrogels for wound dressings using xanthan gum and polyacrylamide // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. Vol. 217. P. 944–955. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.181>

## References

1. Zhang Y., Chen L., Wang H., Li J. Biodegradable superabsorbent hydrogels for soil moisture management. *Carbohydrate Polymers*, 2022, vol. 292, art. 119693. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119693>
2. Danilova T. N., Tabynbaeva L. K., Kenenbaev S. B., Boyko V. S. The role of AQUASORB absorbent in improving soil water-holding capacity. *Agrophysics*, 2018, vol. 2, pp. 1–8 (in Russian). <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2018.02.01>
3. Behera S., Mahanwar P. A. Superabsorbent polymers in agriculture and other applications: A review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2020, vol. 59, no. 4, pp. 341–356. <https://doi.org/10.1080/25740881.2019.1647239>
4. Hakeem K., Sabir M., Ozturk M., Mermut A. R., eds. *Soil remediation and plants: Prospects and challenges*. Academic Press, Elsevier, 2014. 752 p.
5. Koptsik G. N. Modern approaches to the remediation of soils contaminated with heavy metals (literature review). *Eurasian Soil Science*, 2014, no. 7, pp. 851–868. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14070077>
6. Maksimova Yu. G., Shchetko V. A., Maksimov A. Yu. Polymer hydrogels in agriculture (review). *Agricultural Biology*, 2023, vol. 58, no. 1, pp. 23–42 (in Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2023.1.23rus>
7. Mochalova A. E., Kruglova E. N., Yunin P. A., Apryatina K. V., Smirnova O. N., Smirnova L. A. Preparation of graft and block copolymers of chitosan with vinyl monomers, their structure and properties. *Polymer Science. Series B*, 2015, vol. 57, no. 2, pp. 99–112. <https://doi.org/10.7868/S2308113915020114>
8. Kuznetsova Yu. L., Morozova E. A., Vavilova A. S., Markin A. V., Smirnova O. N., Zakharycheva N. S., Lyakaev D. V., Semenycheva L. L. Synthesis of biodegradable graft copolymers of gelatin and polymethyl methacrylate. *All Materials. Encyclopedic Reference*, 2020, no. 1, pp. 22–29 (in Russian). <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2020-0-1-22-29>
9. Kumar D., Pandey J., Raj V., Kumar P. A review on the modification of polysaccharide through graft copolymerization for various potential applications. *The Open Medicinal Chemistry Journal*, 2017, vol. 11, art. 109. <https://doi.org/10.2174/1874104501711010109>
10. Smirnov A. K., Pelipenko D. F., Shmakov S. L., Zakharevich A. M., Shipovskaya A. B. Effect of the crosslinker introduction stage on the structure and properties of xanthan gum–acrylamide graft copolymer. *Polymers*, 2025, vol. 17, art. 2841. <https://doi.org/10.3390/polym17212841>
11. Kudyshkin V. O., Abrarova Z. M., Bozorov N. I., Zhumartova U. U., Usmanova M. M., Ashurov N. Sh., Rashidova S. Sh. Features of the synthesis of graft copolymers of chitosan and acrylic acid. *Polymer Science. Series B*, 2024, vol. 66, no. 1, pp. 23–30 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2308113924010035>
12. Li J., Ji J., Xia J., Li B. Preparation of konjac glucomannan-based superabsorbent polymers by frontal polymerization. *Carbohydrate Polymers*, 2012, vol. 87, no. 1, pp. 757–763. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.060>
13. Zheng M., Lian F., Zhu Y., Zhang Y., Liu B., Zhang L., Zheng B. pH-responsive poly (xanthan gum-g-acrylamide-g-acrylic acid) hydrogel: Preparation, characterization, and application. *Carbohydrate Polymers*, 2019, vol. 210, pp. 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.052>
14. Patel A. Synthesis of acrylamide grafted xanthan gum by microwave assisted method: Ftir characteristics and acute oral toxicity study. *International Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 129–145.
15. Jindal R., Kaith B. S., Mittal H. Rapid synthesis of acrylamide onto xanthan gum based hydrogels under microwave radiations for enhanced thermal and chemical modifications. *Polymers from Renewable Resources*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 105–116. <https://doi.org/10.1177/204124791100200302>
16. Jalali M. A., Koohi A. D., Sheykhan M. Experimental study of the removal of copper ions using hydrogels of xanthan, 2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid, montmorillonite: Kinetic and equilibrium study. *Carbohydrate Polymers*, 2016, vol. 142, pp. 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.01.033>
17. Tang S., Gong Z., Wang Z., Gao X., Zhang X. Multifunctional hydrogels for wound dressings using xanthan gum and polyacrylamide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, vol. 217, pp. 944–955. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.181>

Поступила в редакцию 06.02.2026; одобрена после рецензирования 16.03.2026; принята к публикации 27.03.2026  
The article was submitted 06.02.2026; approved after reviewing 16.03.2026; accepted for publication 27.03.2026