

УДК 544.773.432

Е. В. Лаевская, Е. В. Воробьева, М. А. Астахова, А. Д. Воробьев, С. В. Буча
Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси

ВЛАГОУДЕРЖИВАЮЩИЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ

Статья посвящена получению и исследованию свойств влагоудерживающих композиций на основе лигносульфонатов и крахмала в присутствии поливинилового спирта. Показано, что в зависимости от условий синтеза и набухания, соотношения и молекулярной массы компонентов влагопоглощение композиций может изменяться в пределах 30–165 г/г. Влагопоглощение синтезированной композиции увеличивается в диапазоне соотношений компонентов модифицированный картофельный крахмал : лигносульфонаты : поливиниловый спирт, равном 1 : (1–2) : (0,1–0,2), уменьшается при повышении температуры синтеза более чем на 140°C и продолжительной термообработке. Влагопоглощение возрастает при увеличении содержания остаточной влаги в гидрогеле и достигает максимального значения при 20–22%. При использовании низкомолекулярной фракции лигносульфонатов в качестве компонента композиции необходимо увеличить долю поливинилового спирта выше 20%.

Влагопоглощение синтезированной композиции увеличивается при набухании в растворе в интервале pH 4–7 и имеет обратную зависимость от размера частиц гелевой композиции. Влагопоглощение и влагоудерживающие свойства не зависят от природы катиона в ряду $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{NH}_4^+$. Для интенсификации процесса влагопоглощения крупными частицами геля (более 10 мм) можно использовать перемешивание, замену раствора набухания. Отмечено сходство физико-химических свойств набухшего геля с почвенными коллоидами, что позволяет рекомендовать синтезированные продукты к использованию в агрохимии в качестве биологически разлагаемых и экологически безопасных «аккумуляторов влаги» и структурообразователей почв.

Ключевые слова: влагоудерживающие композиции, биоразлагаемые полимеры, гидрогели, влагопоглощение, крахмал, лигносульфонаты, поливиниловый спирт.

Для цитирования: Лаевская Е. В., Воробьева Е. В., Астахова М. А., Воробьев А. Д., Буча С. В. Влагоудерживающие композиции на основе биоразлагаемых полимеров // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 1 (289). С. 63–70.

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-289-8.

E. V. Layevskaya, E. V. Vorobieva, M. A. Astakhova, A. D. Vorobiov, S. V. Bucha
Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus

MOISTURE-RETAINING COMPOSITIONS BASED ON BIODEGRADABLE POLYMERS

The article focuses on the production and investigation of moisture-retaining compositions based on lignosulfonates and starch in the presence of polyvinyl alcohol. It was shown that, depending on the synthesis and swelling conditions, the ratio and molecular weight of the components, the moisture absorption of the compositions can vary within the range of 30 to 165 g/g. The moisture absorption of the synthesized composition increases with component ratios of modified potato starch : lignosulfonates : polyvinyl alcohol as 1 : (1–2) : (0.1–0.2), and decreases with the increase in synthesis temperature above 140°C and prolonged thermal treatment. The moisture absorption increases with the residual moisture content in the hydrogel and reaches its maximum value at 20–22%. When using the low-molecular-weight fraction of lignosulfonates as a component of the composition, an increase in the polyvinyl alcohol content above 20% is necessary.

The moisture absorption of the synthesized composition increases during swelling in a solution with a pH range of 4–7 and shows an inverse dependence on the particle size of the gel composition. The moisture absorption and moisture-retaining properties are independent of the nature of the cation in the series $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{NH}_4^+$. To intensify the moisture absorption process of large gel particles (more than 10 mm), stirring or replacement of the swelling solution can be applied. The physical and chemical properties of the swollen gel show similarities with soil colloids, which suggests that the synthesized products can be recommended for use in agrochemistry as biodegradable and environmentally safe “moisture accumulators” and soil structure formers.

Keywords: moisture-retaining compositions, biodegradable polymers, hydrogels, moisture absorption, starch, lignosulfonates, polyvinyl alcohol.

For citation: Layevskaya E. V., Vorobieva E. V., Astakhova M. A., Vorobiov A. D., Bucha S. V. Moisture-retaining compositions based on biodegradable polymers. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 1 (289), pp. 63–70 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-2669-2025-289-8.

Введение. Влагодерживающие полимерные материалы находят широкое применение в различных областях – медицине, пищевой промышленности, агрохимии, производстве строительных материалов, предметов санитарно-гигиенического назначения. Способность таких материалов сорбировать и удерживать в течение длительного времени большие количества воды и водных растворов обусловлены наличием трехмерной сетчатой структуры, образованной макромолекулами полимеров, с относительно малой плотностью поперечных сшивок. Число узлов сшивки не меняется при взаимодействии с водой, однако расстояние между узлами сшивки в полимерной цепи может значительно увеличиваться за счет набухания [1–4].

В течение последних лет во всем мире особое внимание уделяют получению биоразлагаемых гидрогелей, которые способны при определенных условиях разлагаться на нейтральные для окружающей среды вещества. Такого рода гидрогели востребованы при создании медицинских изделий широкого профиля (шовных и перевязочных материалов, изделий для остеосинтеза и систем доставки лекарств пролонгированного действия), в качестве биоразлагаемой упаковки, находят применение в качестве осушителей, сорбентов и суперсорбентов, «аккумуляторов влаги» в почвах, удобрений пролонгированного типа, структурообразователей почв и т. д. [4–7].

Биоразлагаемые материалы получают на основе природных полимеров, к которым относятся различного вида крахмала (картофельный, кукурузный, пшеничный, рисовый и др.), лигнин, целлюлоза, а также синтетических и искусственных полимеров – производных лигнина, поливинилового спирта, полимолочной кислоты (полилактида), сополиэфиров на основе алифатических диолов и карбоновых кислот и др. [7, 8].

Перспективно и экономически выгодно создание биоразлагаемых гидрогелей на основе производных лигнина и крахмала из-за их постоянного воспроизводства. Крахмал в больших количествах извлекают из растительного сырья, в первую очередь, из картофеля и кукурузы. По химическому составу крахмал является полисахаридом, состоит из водорастворимой амилозы, имеющей линейное строение, и амилопектина с разветвленным строением, в каждом структурном звене которых содержатся гидроксильные группы [7]. Лигносальфонаты (соли лигносальфоновых кислот) представляют собой водорастворимые сульфированные производные лигнина, образующиеся в процессе переработки древесины. Благодаря

наличию спиртовых, фенольных, эфирных, альдегидных и сульфогрупп лигносальфонаты могут связываться в комплексы с природными и синтетическими полимерами. При взаимодействии с катионами биологически значимых металлов они образуют хелатные комплексы, которые нашли широкое применение в сельском хозяйстве для снижения заболеваемости растений и регулирования содержания хлорофилла в фотосинтетических структурах [9, 10].

Сшивающими агентами для полисахаридов, лигнина выступают эпихлоргидрин и глутаральдегид, некоторые спирты и карбоновые кислоты [11–14]. Анализ литературных данных показал, что вопросы получения водоудерживающих материалов на основе крахмала, лигносальфонатов, поливинилового спирта, несмотря на очевидную перспективность их использования, мало изучены.

Настоящая работа посвящена получению и исследованию свойств гидрогелей на основе лигносальфонатов и крахмала в присутствии поливинилового спирта.

Основная часть. В работе использовали крахмал картофельный (ГОСТ 7699–78 «Крахмал картофельный. Технические условия»), лигносальфонаты (ЛС) (ТУ 13-0281036-029-94 «Лигносальфонаты технические. Технические условия»), поливинилового спирта (ПВС) марки 16/1 (ГОСТ 10779–78 «Спирт поливиниловый. Технические условия») с молекулярной массой $4,0 \cdot 10^4$ и $9,5 \cdot 10^4$, лимонную кислоту (ГОСТ 31726–2012 «Добавки пищевые. Кислота лимонная безводная Е330. Технические условия»).

Модификация картофельного крахмала заключалась в следующем: крахмал в количестве 10 г помещали в колбу на 200 мл, добавляли определенное количество воды, нагревали до $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$ и выдерживали в течение 40 мин на водяной бане. Полученную систему охлаждали до комнатной температуры, после чего добавляли лимонную кислоту в количестве 1,5–3,0% от массы крахмала, нагревали до $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ и выдерживали при данной температуре 2–4 ч при постоянном перемешивании. Полученный продукт модификации картофельного крахмала (МК) использовали для синтеза гидрогелей.

Лигносальфонаты (содержание сухих веществ 50,5%, pH раствора 4,5) фракционировали методом дробного осаждения с использованием этанола в качестве осадителя. Содержание низкомолекулярной фракции в исследуемом образце составляло 30%.

Молекулярную массу определяли вискозиметрически по уравнению Марка – Куна – Хаувинка

с константами, приведенными в [15]. Вискозиметрические измерения растворов проводили, используя капиллярный вискозиметр Уббелоде с диаметром капилляра 0,86 мм. Время истечения раствора измеряли с точностью до 0,1 с; температуру раствора – с точностью до 0,5°C. Для подавления эффекта полиэлектролитного набухания в раствор вводили 0,1 н. раствор хлорида натрия. Средние молекулярные массы для нефракционированного образца ЛС составляли $2,7 \cdot 10^4$, высоко- и низкомолекулярной фракций – $5,5 \cdot 10^4$ и $0,4 \cdot 10^4$ соответственно.

Синтез композиции проводили следующим образом. Смесь водных растворов полимеров (модифицированного крахмала, лигносульфонатов, поливинилового спирта), взятых в определенном соотношении по действующему веществу, выдерживали в кислой среде (рН ниже 2) при температуре 110–130°C до образования геля, охлаждали до 70–80°C, а затем добавляли щелочной раствор (гидроксида аммония, калия, натрия), полученный набухший гель измельчали.

Влагопоглощение W , г/г, определяли в соответствии с формулой как отношение массы поглощенной гелем воды к массе сухого геля.

Для исследования влагоудерживающих свойств композиции и определения содержания гелефракции при набухании 1 г синтезированного продукта помещали в дистиллированную воду и после набухания в течение заданного времени пропускали через сито с размером ячеек 0,05 мм. Затем определяли массу и объем раствора, прошедшего через сито, а также массу гелевой фракции.

Потери массы гелей при набухании за счет частичного растворения компонентов гидрогеля оценивали по массе сухого остатка геля после определения степени набухания.

Полимерная композиция на основе биоразлагаемых компонентов – крахмала, модифицированного лимонной кислотой, лигносульфонатов и поливинилового спирта, полученная при термообработке подкисленной смеси исходных компонентов, представляет собой гель с влагопоглощением от 30 до 165 г/г. Основными факторами, оказывающими влияние на степень набухания геля, являются условия синтеза (рН и температура), соотношение и молекулярная масса компонентов, условия набухания синтезированной композиции.

При исследовании композиции МК : ЛС : ПВС установлено, что содержащие избыток лигносульфонатов или крахмала гидрогели характеризовались частичной потерей массы при набухании, а композиции с высоким содержанием ПВС – низкой степенью набухания. На основании экспериментальных данных выбраны следующие соотношения компонентов в композиции МК : ЛС : ПВС = 1 : (1–2) : (0,1–0,2).

Полученная композиция проявляет влагоудерживающие свойства при условии синтеза в кислой среде (рН менее 2) при температуре выше 100°C. Экспериментальные данные, характеризующие влагопоглощение образцов, приготовленных в одинаковых условиях (рН исходной смеси 1,5; соотношение компонентов в композиции МК : ЛС : ПВС = 1 : 1 : 0,1; рН среды набухания 7) и обработанных при различных продолжительности и температуре термообработки, свидетельствуют о том, что понижение температуры процесса ниже 110°C приводит к получению продукта с низкой плотностью сшивок, со временем растворяющегося при набухании. При повышении температуры выше 140°C и увеличении продолжительности термообработки влагопоглощение гидрогеля снижается (таблица). Условием получения композиции с влагопоглощающими свойствами является образование нерастворимой полимерной основы, однако полученный при высокой температуре сшитый продукт не способен к набуханию. Необходимо регулировать количество сшивок в полимерной основе для получения нерастворимой, редкосшитой полимерной пространственной структуры. Предпочтительная температура процесса получения «набухающей» композиции составляет 120–130°C (таблица).

В случае полного удаления влаги (термообработка до постоянной массы) композиция теряет способность к набуханию, так как в данном случае образуется структура с большим количеством сшивок. Влагопоглощение возрастает при увеличении содержания остаточной влаги в гидрогеле и достигает максимального значения при 20–22%. Дальнейшее увеличение содержания остаточной влаги в образцах приводит к уменьшению набухания.

Влагопоглощение образцов, полученных из полимерной композиции МК : ЛС : ПВС = 1 : 1 : 0,1 при рН синтеза 1,5 и рН набухания 7, в зависимости от температуры и продолжительности термообработки

Температура, °С	Влагопоглощение, г/г, при продолжительности, ч			
	0,5	1	2	3
110	Частичное растворение	Частичное растворение	Частичное растворение	156,4
120	Частичное растворение	165,3	164,1	154,8
130	154,8	158,6	145,5	129,4
140	118,6	102,4	88,6	76,5
160	73,5	55,6	40,6	21,2
180	19,2	16,8	14,1	12,5

В кислой среде (рН от 2 до 4) влагопоглощение полученной композиции растет незначительно для вариантов с различным соотношением компонентов (рис. 1). По мере повышения рН от 4 до 7 наблюдается увеличение набухания, причем лучше других набухает гидрогель с относительно невысоким содержанием ПВС. При рН выше 7 способность композиции поглощать воду остается неизменной.

Количество поглощаемой воды композициями на основе лигносульфонатов и поливинилового

спирта при одинаковом составе, условиях синтеза и набухания увеличивается с ростом молекулярной массы компонентов (рис. 2). В случае низкомолекулярного ЛС получение влагопоглощающей композиции возможно только при использовании смеси с содержанием ПВС не менее 20%. С увеличением содержания высокомолекулярного компонента в исходной смеси плотность сетки повышается, однако в процессе набухания сшитой композиции низкомолекулярный компонент частично растворяется в жидкой фазе.

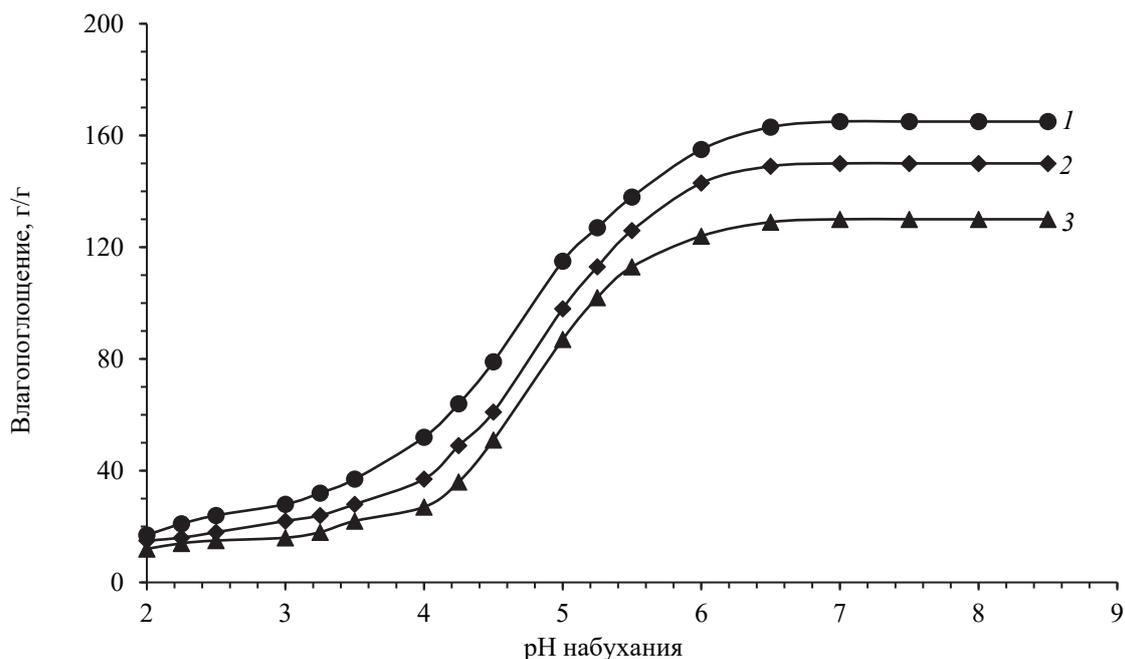


Рис. 1. Степень набухания полимерной композиции в зависимости от рН при соотношении МК : ЛС : ПВС, равном:
1 – 1 : 1 : 0,1; 2 – 1 : 2 : 0,2; 3 – 1 : 1 : 0,2

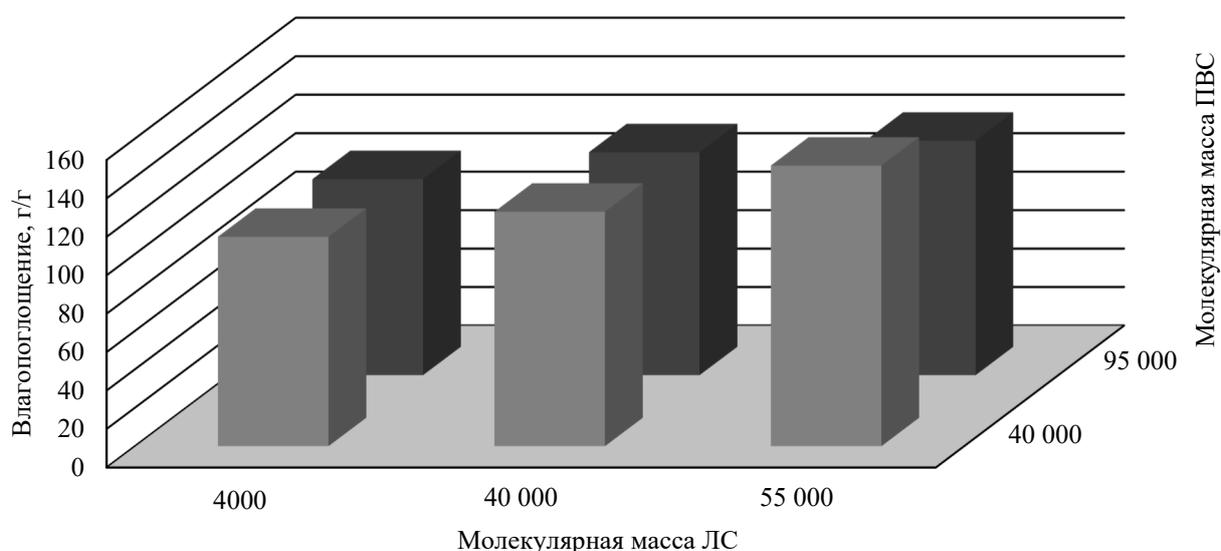


Рис. 2. Влагопоглощение композиций (время набухания 1 ч) в зависимости от молекулярной массы лигносульфонатов и поливинилового спирта

Поведение компонентов композиции в процессе синтеза зависит от их конформационного состояния [8]. В сильноокислой среде макромолекулы исследуемых полимеров с компактной глобулизированной конфигурацией, благодаря присутствию гидроксильных, фенольных, сульфогрупп, склонны к образованию гомо- и гетероассоциатов. Можно предположить, что в кислой среде макромолекулы компонентов композиции образуют ассоциаты, стабилизированные водородными связями между протондонорными и протонакцепторными группами. Клубки макромолекул изолированы и не смешиваются друг с другом, что может быть обусловлено как конформационным несоответствием реагирующих молекул, так и гидратацией части функциональных групп, не вовлеченных в образование водородных связей, что сохраняет способность полимерных ассоциатов оставаться в растворенном состоянии. Термообработка и удаление влаги стимулируют образование связей между функциональными группами полимеров, в первую очередь, с «внешней» стороны макромолекулярных клубков. После окончания термообработки в процессе набухания в щелочных и нейтральных средах сшитые между собой клубки макромолекул разворачиваются и набухают, поглощая раствор. Механизм набухания сводится к проникновению молекул растворителя в полимерные клубки и сольватации участков полимерных цепей, что облегчает дальнейшее проникновение молекул растворителя в гель и приводит к увеличению его массы и объема.

Результаты исследования влагоудерживающих свойств композиции представлены на рис. 3.

В течение первого часа полученный продукт активно поглощает воду, однако при набухании его консистенция меняется от гелеобразного до текучего состояния. Масса гелевой фракции двухкомпонентной композиции (ЛС : ПВС) уменьшается через 4 ч в 1,6 раза (рис. 3). При набухании композиции ЛС : ПВС в жидкую фазу выделяются низкомолекулярные компоненты, не участвующие в процессе сшивки с ПВС и не включенные в полимерную сетку. Степень набухания композиции, в состав которой входит также модифицированный крахмал, растет в течение 1,5–2,0 ч, о чем свидетельствует увеличение массы гелевой фракции. Изменение массы гелевой фракции в композиции с крахмалом меньше по сравнению с композицией ЛС : ПВС, мало зависит от содержания в композиции лигносульфонатов и составляет 12–14%. Это, вероятно, связано с тем, что модификация крахмала лимонной кислотой способствует образованию циклического ангидрида и реакции этерификации карбоксильных и гидроксильных групп компонентов композиции [8], что приводит к получению дополнительных сшивок в полимерной сетке гидрогеля.

Показано, что скорость набухания влагоудерживающей композиции МК : ЛС : ПВС = 1 : 1 : 0,1 зависит от размера набухающих частиц (рис. 4), что обусловлено различной скоростью диффузии растворителя в гидрогель. Замена раствора набухания для удаления непрореагировавших компонентов и перемешивание обеспечивают более интенсивное протекание процесса набухания и получение гидрогеля с максимальным влагопоглощением за более короткий промежуток времени.

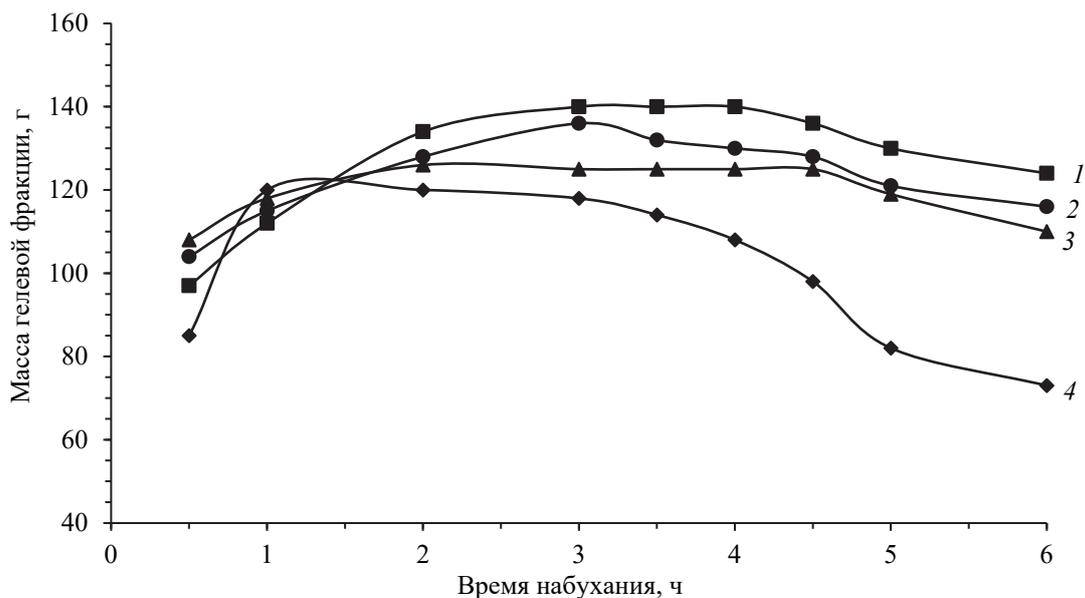


Рис. 3. Масса гелевой фракции синтезированной композиции в зависимости от времени набухания при следующих составах композиции:
 1 – МК : ЛС : ПВС = 1 : 1 : 0,1; 2 – МК : ЛС : ПВС = 1 : 2 : 0,1;
 3 – МК : ЛС : ПВС = 1 : 3 : 0,1; 4 – ЛС : ПВС = 1 : 0,1

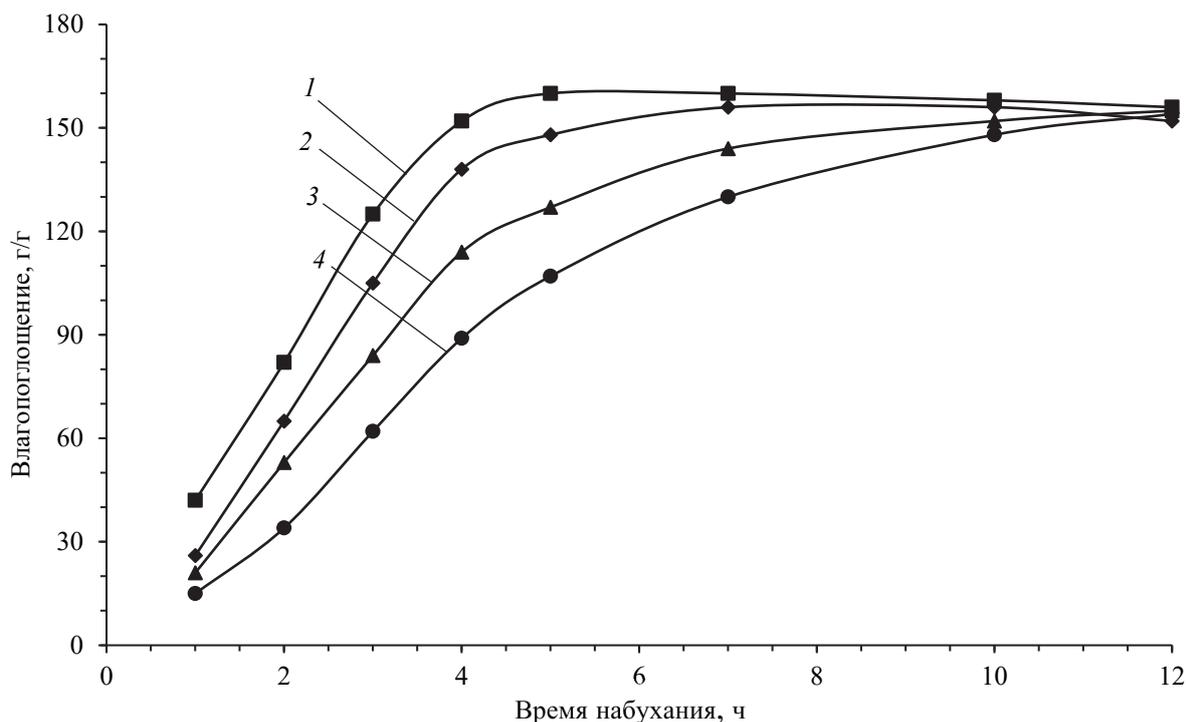


Рис. 4. Зависимость влагопоглощения композиции (МК : ЛС : ПВС = 1 : 1 : 0,1) от времени набухания для частиц разного размера:
1 – 0,5 мм; 2 – 5 мм; 3 – 10 мм; 4 – 20 мм

Экспериментально установлено, что в растворах с катионами аммония, калия, натрия при длительном набухании наблюдается получение равномерных по структуре гелей. Отмечено, что влагопоглощение и влагоудерживающие свойства композиции МК : ЛС : ПВС мало зависят от природы и размера катиона.

Равновесно набухший в растворе гидроксида калия или аммония гель диспергировали до фракции с размером частиц 0,3–0,5 мм. Полученная дисперсия, содержащая набухшие частицы геля, с физической точки зрения сравнима с почвенными коллоидами, которые формируются из глинистых минералов, гумусовых веществ, белков. В коллоидно-дисперсном состоянии в почве могут находиться полисахариды, лигнин, клетки наиболее мелких бактерий, диаметр которых соответствует диаметру коллоидных частиц. При внесении в почву дисперсии геля происходит улучшение агрофизических свойств почвы, основанное на том, что насыщенные влагой полимерные гранулы окружаются почвенными коллоидами, агрегируют с ними. Увеличение коллоидной массы приводит к улучшению физических характеристик почвы, таких как структурность, плотность, воздухоемкость, влагоемкость [15]. Внесение набухшей диспергированной композиции в почву и ее распределение в корнеобитаемом слое способствуют образованию почвенной структуры, уменьшению связности тяжелых по гранулометрическому составу почв, сохранению от вымывания

коллоидов, обуславливающих важнейшие агрономические свойства почвы. Использование влагоудерживающей композиции в агрохимии для сохранения влаги в зоне корневой системы растений позволит направленно регулировать режим водного и минерального питания в условиях прорастания семян, роста и развития растений. Полученные гидрогели могут найти применение в качестве «аккумуляторов влаги», структурообразователей почв или основы для создания удобрений пролонгированного типа для растений, произрастающих на кислых или нейтральных почвах.

Заключение. Синтезирована композиция на основе биоразлагаемых природных полимеров (картофельный крахмал, лигносульфонаты) и поливинилового спирта, обладающая влагопоглощающими и влагоудерживающими свойствами. Установлена зависимость функциональных свойств синтезированных композиций от условий синтеза и набухания, соотношения и молекулярной массы компонентов. Равновесно набухший в растворе гидроксида калия или аммония (рН 4–7) гель, диспергированный до фракции с размером частиц 0,3–0,5 мм, равномерно распределяется в почве, одновременно структурируя ее. Показана возможность использования синтезированной композиции на основе биоразлагаемых полимеров в качестве экологически безопасных влагоудерживающих добавок в почву.

Список литературы

1. El-Neser E. M. Effect of chemical structure on the properties of some hydrogels prepared by using gamma radiation polymerization // *Polymers for Advanced Technologies*. 2005. Vol. 16, no. 6. P. 489–494. DOI: 10.1002/pat.607.
2. The Microstructure and Swelling Properties of Poly Acrylic Acid-Acrylamide Grafted Starch Hydrogels / D. Ma [et al.] // *Journal of Macromolecular Science, Part B. Physics*. 2016. Vol. 55, no. 11. P. 1124–1133. DOI: 10.1080/00222348.2016.1242552.
3. Гидрогелевые покрытия на основе фосфата целлюлозы в качестве пролонгированного носителя лекарственных средств / Т. Л. Юркштович [и др.] // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 1. С. 62–73. DOI: 10.17308/sorpchrom.2023.23/10994.
4. Preparation and characterization of starch/PVA blend for biodegradable packaging material / F. Parvin [et al.] // *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 123–125. P. 351–354. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.123-125.351.
5. Caló E., Khutoryanskiy V. V. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products // *European Polymer Journal*. 2015. Vol. 65. P. 65–81. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024.
6. Пашкова Л. И. Полимерные гидрогели на основе сшитого поливинилового спирта: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.06. Москва, 2012. 131 с.
7. Суворова А. И., Тюкова И. С., Труфанова Е. И. Биоразлагаемые полимерные материалы на основе крахмала // *Успехи химии*. 2000. Т. 69, № 5. С. 494–504. DOI: 10.1070/rc2000v069n05abeh000505.
8. Крутько Э. Т., Прокопчук Н. Р., Глоба А. И. Технология биоразлагаемых полимерных материалов. Минск: БГТУ, 2014. 105 с.
9. Хабаров Ю. Г., Вешняков В. А., Кузяков Н. Ю. Получение и применение комплексов лигносульфоновых кислот с катионами железа // *Лесной журнал*. 2019. № 5. С. 167–187. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.167.
10. Инн У., Резанович А., Горинг Д. Химия и биохимия лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз. М.: Лесная пром-сть, 1969. 273 с.
11. Лазнев К. В., Агабеков В. Е. Микросферы из сшитого глутаральдегидом поливинилового спирта для иммуномагнитной сепарации клеток // *Изв. Нац. акад. наук Беларуси, Сер. хим. наук*. 2020. Т. 5, № 4. С. 391–398. DOI: 10.29235/1561-8331-2020-56-4-391-398.
12. Прогресс в получении биоразлагаемых композиционных материалов на основе крахмала (обзор) / Е. Н. Подденежный [и др.] // *Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого*. 2015. № 2. С. 31–41.
13. Shulga S., Shulga O., Simurova N. Modification of potato starch with adipic acid and research of modification product as raw materials for food biodegradable packaging // *Ukrainian Food Journal*. 2021. Vol. 10, no. 3. P. 564–575. DOI: 10.24263/2304-974x-2021-10-3-10.
14. Citric acid-derived in situ crosslinkable biodegradable polymers for cell delivery / D. Gyawali [et al.] // *Biomaterials*. 2010. Vol. 3. P. 9092–9105. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2010.08.022.
15. Данилова Т. Н. Влияние полимерных гелей на диапазон доступной влаги дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Агрофизика*. 2020. № 3. С. 17–22. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.03.03.

References

1. El-Neser E. M. Effect of chemical structure on the properties of some hydrogels prepared by using gamma radiation polymerization. *Polymers for Advanced Technologies*, 2005, vol. 16, no. 6, pp. 489–494. DOI: 10.1002/pat.607.
2. Ma D., Zhu B., Cao B., Wang J., Zhang J. The Microstructure and Swelling Properties of Poly Acrylic Acid-Acrylamide Grafted Starch Hydrogels. *Journal of Macromolecular Science, Part B. Physics*, 2016, vol. 55, no. 11, pp. 1124–1133. DOI: 10.1080/00222348.2016.1242552.
3. Jurkshtovich T. L., Jurkshtovich N. K., Golub N. V., Kosterova R. I., Pristromova Ju. I., Solomevich S. O. Hydrogel coatings based on cellulose phosphate as a prolonged drug carrier. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy* [Sorptions and chromatographic processes], 2023, vol. 23, no. 1, pp. 62–73. DOI: 10.17308/sorpchrom.2023.23/10994 (In Russian).
4. Parvin F., Rahman Md., Islam J., Khan M., Saadat A. Preparation and characterization of starch/PVA blend for biodegradable packaging material. *Advanced Materials Research*, 2010, vol. 123–125, pp. 351–354. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.123-125.351.
5. Caló E., Khutoryanskiy V. V. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal*, 2015, vol. 65, pp. 65–81. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024.
6. Pashkova L. I. *Polimernyye gidrogeli na osnove sshitogo polivinilovogo spirta. Dissertatsiya kandidata khimicheskikh nauk* [Polymer hydrogels based on cross-linked polyvinyl alcohol. Dissertation PhD (Chemistry)]. Moscow, 2012. 131 p. (In Russian).

7. Suvorova A. I., Tyukova I. S., Trufanova E. I. Biodegradable polymeric materials based on starch. *Uspekhi khimii* [Advances in Chemistry], 2000, vol. 69, no. 5, pp. 494–504. DOI: 10.1070/rc2000v069n05abeh000505.
8. Krut'ko E. T., Prokopchuk N. R., Globa A. I. *Tekhnologiya biorazlagaemykh polimernykh materialov* [Technology of biodegradable polymeric materials]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 105 p. (In Russian).
9. Khabarov Yu. G., Veshnyakov V. A., Kuzyakov N. Yu. Preparation and application of lignosulfonic acid complexes with iron cations. *Lesnoy zhurnal* [Forestry magazine], 2019, no. 5, pp. 167–187. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.167 (In Russian).
10. Inn U., Rezanovich A., Goring D. *Khimiya i biokhimiya lignina, tsellyulozy i gemitsellyuloz* [Chemistry and biochemistry of lignin, cellulose and hemicelluloses]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 273 p. (In Russian).
11. Laznev K. V., Agabekov V. E. Slutaraldehyde-crosslinked polyvinyl alcohol microspheres for immunomagnetic cell separation. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi, Seriya khimicheskikh nauk* [Proceeding of the National academy of science of Belarus. Chemical series], 2020, vol. 5, no. 4, pp. 391–398. DOI: 10.29235/1561-8331-2020-56-4-391-398 (In Russian).
12. Poddenezhnyy E. N., Boyko A. A., Alekseenko A. A., Drobyshevskaya N. E., Ureckaya O. V. Progress in obtaining biodegradable composite materials based on starch (review). *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi], 2015, no. 2, pp. 31–41 (In Russian).
13. Shulga S., Shulga O., Simurova N. Modification of potato starch with adipic acid and research of modification product as raw materials for food biodegradable packaging. *Ukrainian Food Journal*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 564–575. DOI: 10.24263/2304-974x-2021-10-3-10.
14. Gyawali D., Nair P., Zhang Y., Tran R., Zhang C., Samchukov M., Makarov M., Kim H., Yang J. Citric acid-derived in situ crosslinkable biodegradable polymers for cell delivery. *Biomaterials*, 2010, vol. 3, pp. 9092–9105. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2010.08.022.
15. Danilova T. N. Effect of polymer gels on the range of available moisture in sod-podzolic sandy loam soil. *Agrofizika* [Agrophysics], 2020, no. 3, pp. 17–22. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.03.03 (In Russian).

Информация об авторах

Лаевская Елена Васильевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: layeuskaua@gmail.com

Воробьева Елена Викторовна – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

Астахова Марина Александровна – научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: manya88ama@mail.ru

Воробьев Артем Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: avorobiov@igic.bas-net.by

Буча Светлана Васильевна – научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bucha1003@gmail.com

Information about the authors

Layevskaya Elena Vasil'yevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1 Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: layeuskaya@gmail.com

Vorobieva Elena Viktorovna – DSc (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1 Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

Astakhova Marina Aleksandrovna – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1 Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: manya88ama@mail.ru

Vorobiov Artem Dmitrievich – PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1 Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: avorobiov@igic.bas-net.by

Bucha Svetlana Vasil'yevna – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1 Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bucha1003@gmail.com

Поступила 09.10.2024