

Модификация поливинилового спирта боратами

Любовь Н. Студеникина¹ lubov-churkina@ya.ru  0000-0001-6613-4974
 Вероника Е. Углова¹ veronika200312@gmail.com
 Игорь В. Коленко¹ kolenko.igor.55@gmail.com
 Александр А. Мельников² melnikov.shura@inbox.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Модификация поливинилового спирта (ПВС) боратами позволяет регулировать основные эксплуатационные показатели водорастворимых пленок - температуру и время растворимости, прочность. Потребность в повышении водостойкости пленок на основе ПВС связана с конкретными областями их применения, например при создании защитных оболочек в растениеводстве или экобезопасной разовой посуды и проч. Цель работы - сравнительная оценка основных эксплуатационных показателей пленок ПВС с различной молекулярной массой, модифицированного боратами различной природы. Объекты исследования: пленочные образцы низкогидролизованного ПВС трех различных марок (05-88, 17-88, 24-88), имеющих одинаковую степень гидролиза (88%), но отличающихся молекулярной массой (ММ) и как следствие - вязкостью раствора (для ПВС 05-88, 17-88, 24-88 составляющей 4,5÷6,5, 20,0÷26,0, 44,0÷56,0 мПа*с соответственно), модифицированные боратами в различном соотношении (тетраборатом натрия в количестве 0,125 ÷ 2,0 масс.% и борной кислотой в количестве 2,5 ÷ 10,0 масс.%). Методы исследования: водорастворимость образцов оценивали визуально при погружении в воду с температурой 20°C, сорбцию водяного пара оценивали стандартным статическим (эксикаторным) методом определения изотерм сорбции паров воды полимерными материалами, прочностные показатели пленок в сухом и паронасыщенном состоянии определяли по ГОСТ 11262-17 с помощью разрывной машины РМ-50 с программным обеспечением «Stretch Test». Установлено, что влияние природы сшивателя на свойства модифицированных пленок существенно отличается для ПВС с различной ММ. Тетраборат натрия приводит к быстрому гелеобразованию р-ра ПВС, что проявляется интенсивнее с увеличением ММ полимера, поэтому его введение ограничено 2,0, 1,0 и 0,5 масс.% соответственно для ПВС 05-88, 17-88 и 24-88; при шивке борной кислотой эффект гелеобразования отсутствует. Тетраборат натрия неэффективен для повышения водостойкости ПВС с низкой ММ, хотя улучшает его прочностные показатели; борная кислота эффективно сшивает ПВС (особенно с высокой ММ), что проявляется в значительном увеличении времени растворения пленок. Максимальный эффект сшивки, сопровождающийся значительным повышением водостойкости, наблюдался в случае модификации средне- и высокомолекулярного ПВС борной кислотой в количестве не менее 5,0 масс.% от массы полимера.

Ключевые слова: поливиниловый спирт, борная кислота, тетраборат натрия, модификация, водостойкость, прочность.

Modification of polyvinyl alcohol with borates

Lyubov N. Studenikina¹ lubov-churkina@ya.ru  0000-0001-6613-4974
 Veronika E. Uglova¹ veronika200312@gmail.com
 Igor V. Kolenko¹ kolenko.igor.55@gmail.com
 Alexandr A. Melnikov² melnikov.shura@inbox.ru

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Modification of polyvinyl alcohol (PVA) with borates allows to regulate the main performance indicators of water-soluble films - temperature and time of solubility, strength. The need to increase the water resistance of PVA-based films is associated with specific areas of their application, for example, when creating protective shells in plant growing or eco-friendly disposable tableware, etc. The aim of the work is a comparative assessment of the main performance indicators of PVA films with different molecular weights modified with borates of different nature. Objects of study: film samples of low-hydrolyzed PVA of three different grades (05-88, 17-88, 24-88) having the same degree of hydrolysis (88%), but differing in molecular weight (MW) and, as a consequence, solution viscosity (for PVA 05-88, 17-88, 24-88 comprising 4.5÷6.5, 20.0÷26.0, 44.0÷56.0 mPa*s, respectively), modified with borates in different ratios (sodium tetraborate in an amount of 0.125÷2.0 wt.% and boric acid in an amount of 2.5÷10.0 wt.%). Research methods: water solubility of samples was assessed visually by immersion in water with a temperature of 20°C, water vapor sorption was assessed using the standard static (desiccator) method for determining water vapor sorption isotherms by polymeric materials, strength properties of films in a dry and vapor-saturated state were determined according to GOST 11262-17 using an RM-50 tensile testing machine with Stretch Test software. It was found that the influence of the crosslinker nature on the properties of modified films differs significantly for PVA with different MW. Sodium tetraborate leads to rapid gelation of the PVA solution, which is more intense with an increase in the MW of the polymer, therefore its introduction is limited to 2.0, 1.0 and 0.5 wt.%, respectively, for PVA 05-88, 17-88 and 24-88; when crosslinking with boric acid, the gelling effect is absent. Sodium tetraborate is ineffective in increasing the water resistance of low-MW PVA, although it improves its strength properties; boric acid effectively crosslinks PVA (especially high-MW), which is manifested in a significant increase in the dissolution time of the films. The maximum crosslinking effect, accompanied by a significant increase in water resistance, was observed in the case of modification of medium- and high-molecular PVA with boric acid in an amount of at least 5.0 wt.% of the polymer weight.

Keywords: polyvinyl alcohol, boric acid, sodium tetraborate, modification, water resistance, strength.

Для цитирования
 Студеникина Л.Н., Углова В.Е., Коленко И.В., Мельников А.А. Модификация поливинилового спирта боратами // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 231–236. doi:10.20914/2310-1202-2024-3-231-236

For citation
 Studenikina L.N., Uglova V.E., Kolenko I.V., Melnikov A.A. Modification of polyvinyl alcohol with borates. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 231–236. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-3-231-236

Введение

Пленки на основе поливинилового спирта (ПВС) в настоящее время привлекают все большее внимание благодаря сочетанию эксплуатационных свойств и экологичности [1]. ПВС – единственный виниловый полимер, который может быть использован бактериями в качестве источника углерода и энергии [2].

Водорастворимая упаковка – тренд современной упаковочной индустрии, основное сырье для ее производства – ПВС с низкой степенью гидролиза, пленки из которого растворяется в холодной воде ($t < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Наибольшее распространение эти материалы нашли в упаковке пестицидов и гербицидов – там, где не допускается контакт с кожей человека. Кроме того на основе водорастворимых плёночных материалов изготавливают разовую упаковку для шампуней, красителей, стиральных порошков, моющих и отбеливающих средств, в медицинских учреждениях – для упаковки предметов (одежды, постельного белья, инструментов) подлежащих стирке, дезинфекции или стерилизации. Самоклеющиеся плёнки на водорастворимой основе используются для бюджетной аэрографии автомобилей и нанесения рисунков на металлические и пластиковые покрытия сложной конфигурации. На основе аналогичных материалов изготавливают различные водорастворимые этикетки и стикеры, на которых указывают дату изготовления, условия и срок хранения продуктов, например, рыбы замороженной в ледяной глазури [3]. Также материалы на основе ПВС имеют значительный потенциал для применения в различных областях растениеводства [4].

Однако, физические характеристики и стабильность таких пленок не всегда достаточно высокие [5], для улучшения характеристик и достижения цели практического применения необходимо дополнительно модифицировать ПВС [6, 7]. Модификация полимера технологическими добавками и компаундированием зачастую быстрее приводят к цели – получению материала с заданными свойствами, чем синтез новых высокомолекулярных соединений [8].

К основным методам модификации ПВС для повышения его водостойкости относят: введение наноразмерных наполнителей, компаундирование с другими полимерами и химическую сшивку. Наночастицы могут быть равномерно распределены в матрице ПВС, изменяя силу взаимодействия молекулярных цепей, образуя прочные водородные связи и изменяя кристаллическую структуру. Модификация ПВС наночастицами не только улучшает механическую прочность и водостойкость пленки, но и еще больше расширяет функциональные возможности материала, например, делая его электропроводным.

Повышение водостойкости ПВС компаундированием проводится путем смешения с полимерами, которые могут образовывать водородные связи с гидроксильными группами в ПВС, снижая средство композита к воде. Химическая сшивка – это образование химических связей между молекулами ПВС с образованием полимерной сетки, что существенно улучшает механические свойства и водостойкость пленок [9].

Авторами [3] показана возможность регулирования растворимости плёночных материалов на основе ПВС воздействием температуры, СВЧ излучения и введением сшивающих веществ (формальдегида, калия двуххромовокислого и натрия тетраборнокислого). Известно, что ПВС образует комплексы с неорганическими соединениями некоторых элементов, обычно их синтез осуществляют в водных растворах с использованием растворимых веществ [10].

При этом поливиниловый спирт весьма чувствителен к следам соединений бора, особенно борной кислоты, буры и перборатов. Гелеобразование имеет место в растворах, содержащих не менее 2 % полимера и не менее 1 % борной кислоты или буры. Эти комплексы, по-видимому, не представляют собой определенного продукта и образуются путем соединения линейных цепей ПВС поперечными связями вследствие комплексобразования. Они представляют собой вязкие неэластичные аморфные системы, однако, при кратковременном приложении нагрузки они ведут себя как упругие тела. Плавление происходит при невысоких температурах порядка 30 – 40 °С. Механические свойства, и в частности модуль упругости, возрастает при увеличении молекулярной массы и уменьшении содержания остаточных ацетатных групп, увеличении концентрации полимера и буры [11].

Гидрогели на основе ПВС-бората обладают частотно-зависимым механическим поведением и конечным временем релаксации и, следовательно, с реологической точки зрения они считаются не настоящими гелями, а вязкоупругими дисперсиями с динамической сеткой. Гидрогели на основе ПВС-бората проявляют вязкость в длительном масштабе времени (низкая частота), при которой у сетки достаточно времени для перестройки (или распутывания), и эластичность в коротком масштабе времени (высокая частота), при которой поперечные связи не могут диссоциировать. Увеличение концентрации ионов бората способствует прочности дисперсии в меньшей степени, чем молекулярная масса и концентрация полимера, которые, следовательно, являются доминирующими факторами, влияющими на эластичность и стабильность дисперсий [12, 13].

Процессы сшивки ПВС боратами изучались в работах [14–20]. В дополнение к общей сшивающей функции боратных добавок

в работе [14] был обнаружен необычный пластифицирующий эффект и установлено, что регулируя рН от 4 до 11 во время получения сшитого боратом ПВС, можно изменить эффекты пластификации и сшивания. В исследовании [19] отмечено, что консистенцию высокоэластичных вязких систем на основе ПВС (гидрогелей) можно моделировать путем изменения молекулярной массы и концентрации полимера и количества сшивающей добавки – буры (бората) в дополнение к варьированию уровнем рН и температурой процесса. В работе [20] установлено, что сшивка ПВС борной кислотой сопровождается повышением прочностных показателей пропорционально количеству введенного в полимерную матрицу борат-иона, но при этом водостойкость модифицированных пленок ПВС повышается до определенного предела содержания бората [20].

Цель работы – сравнительная оценка основных эксплуатационных показателей пленок ПВС с различной молекулярной массой, модифицированного боратами различной природы.

Материалы и методы

Объекты исследования: пленочные образцы низкогидролизованного ПВС трех различных марок (05–88, 17–88, 24–88), имеющих одинаковую степень гидролиза (88 %), но отличающихся молекулярной массой (ММ) и как следствие – вязкостью раствора (для ПВС 05–88, 17–88, 24–88 составляющей 4,5÷6,5, 20,0÷26,0, 44,0÷56,0 мПа • с соответственно), модифицированные боратами в различном соотношении (тетраборатом натрия в количестве 0,125 ÷ 2,0 масс.% и борной кислотой в количестве 2,5 ÷ 10,0 масс.%). Для удобства образцам были присвоены номера согласно таблице 1.

Количество сшивающего агента (бората) было предварительно подобрано для различных марок ПВС и различных сшивателей экспериментальным путем, исходя из технологических свойств получаемых растворов (основной критерий – вязкость) и качества получаемых пленок. Главным критерием для определения максимально возможного содержания бората была возможность отливки пленки и отсутствие дефектов у получаемых экспериментальных пленочных образцов.

Пленки модифицированного ПВС получали следующим образом: 100 мл р-ра ПВС (5 %) смешивали с 5 г глицерина (пластификатор) и нагревали до 80 °С в стеклянном реакторе. Затем к раствору по каплям добавляли расчетное количество сшивающего агента (см. табл. 1). Смесь перемешивали магнитной мешалкой в течение 30 мин при поддержании температуры 80 °С. Полученный раствор отливали на подложки и высушивали на воздухе при комнатной температуре.

Методы исследования: водорастворимость образцов оценивали визуально при погружении в воду с температурой 20 °С, сорбцию водяного

пара оценивали стандартным статическим (экситорным) методом определения изотерм сорбции паров воды полимерными материалами, прочностные показатели пленок в сухом и паронасыщенном состоянии определяли по ГОСТ 11262–17 с помощью разрывной машины РМ-50 с программным обеспечением «Stretch Test».

Таблица 1.
Рецептурная нумерация образцов
Table 1.
Prescription numbering of samples

| Образец Sample | Марка ПВС Brand PVA | Природа и содержание сшивателя Nature and content of the crosslinking agent |
|-------------------|-------------------------------|---|
| 1 | 05–88 | Без сшивателя |
| 2 | | Тетраборат натрия – 0,5 масс. % |
| 3 | | Тетраборат натрия – 1,0 масс. % |
| 4 | | Тетраборат натрия – 2,0 масс. % |
| 5 | | Борная кислота – 2,5 масс. % |
| 6 | | Борная кислота – 5,0 масс. % |
| 7 | | Борная кислота – 10,0 масс. % |
| 8 | 17–88 | Без сшивателя |
| 9 | | Тетраборат натрия – 0,25 масс. % |
| 10 | | Тетраборат натрия – 0,50 масс. % |
| 11 | | Тетраборат натрия – 1,00 масс. % |
| 12 | | Борная кислота – 2,5 масс. % |
| 13 | | Борная кислота – 5,0 масс. % |
| 14 | Борная кислота – 10,0 масс. % | |
| 15 | 24–88 | Без сшивателя |
| 16 | | Тетраборат натрия – 0,125 масс. % |
| 17 | | Тетраборат натрия – 0,250 масс. % |
| 18 | | Тетраборат натрия – 0,500 масс. % |
| 19 | | Борная кислота – 2,5 масс. % |
| 20 | | Борная кислота – 5,0 масс. % |
| 21 | Борная кислота – 10,0 масс. % | |

Результаты

На рисунке 1 показаны результаты оценки растворимости экспериментальных образцов в холодной воде ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для всех образцов отмечено незначительное увеличение времени растворения при введении тетрабората натрия (для некоторых – снижение водостойкости), и существенное повышение водостойкости при введении борной кислоты, возрастающее с ростом содержания сшивателя.

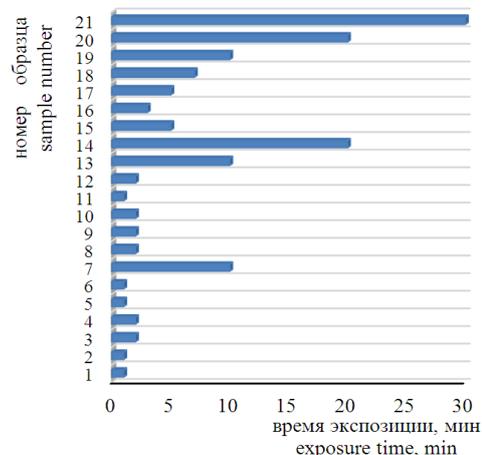


Рисунок 1. Среднее время растворения экспериментальных образцов в воде при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figure 1. Average dissolution time of experimental samples in water at $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рисунке 2 представлены кинетические кривые сорбции водяного пара образцами модифицированного ПВС с максимальным содержанием сшивателя. Отмечен однотипный характер кривых, независимо от молекулярной массы ПВС и природы сшивателя: интенсивное поглощение паров воды в первые двое суток, временная стабилизация системы на третьи сутки, и последующий

плавный прирост массы с достижением сорбционного равновесия на 7–8 сутки. Очевидно, что медленная диффузия воды в течение первых 48 часов приводит к раскрытию дополнительного объема для сорбции за счет сольватации и повышения подвижности макромолекул при снижении степени кристалличности системы.

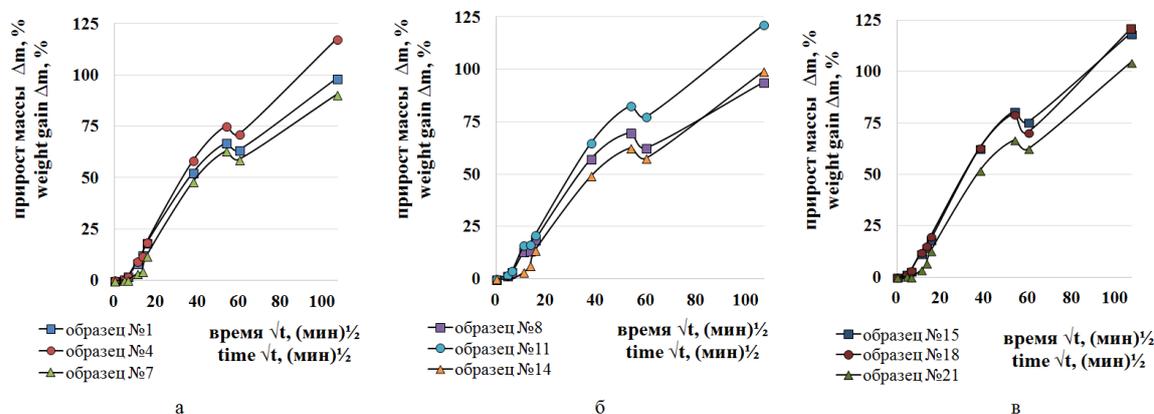


Рисунок 2. Кинетические кривые сорбции водяного пара образцами модифицированного ПВС: а) ПВС марки 05–88, б) ПВС марки 17–88, в) ПВС марки 24–88

Figure 2. Kinetic curves of water vapor sorption by the studied samples of modified PVA: (a) PVA grade 05–88; (b) PVA grade 17–88; (c) PVA grade 24–88

На рисунке 3 приведены показатели прочности исследуемых материалов в сухом состоянии, а в таблице 2 – прочностные показатели модифицированных ПВС марок 05–88 и 24–88 с максимальным содержанием сшивающего агента в сухом и паронасыщенном состоянии. Из рисунка 3 видно, что для ПВС 05–88 прочность при разрыве пропорционально повышается при введении тетрабората натрия, и незначительно снижается при введении борной кислоты (возможен пластифицирующий эффект), при этом относительное удлинение снижается для всех образцов № 2–7 примерно в 6 раз. Для ПВС 17–88 и 24–88, напротив, отмечена тенденция снижения прочности при разрыве в случае сшивкой тетраборатом натрия и повышения – при модификации борной кислотой (при этом относительное удлинение образцов снижается, что говорит о процессах межмолекулярной «сшивки»).

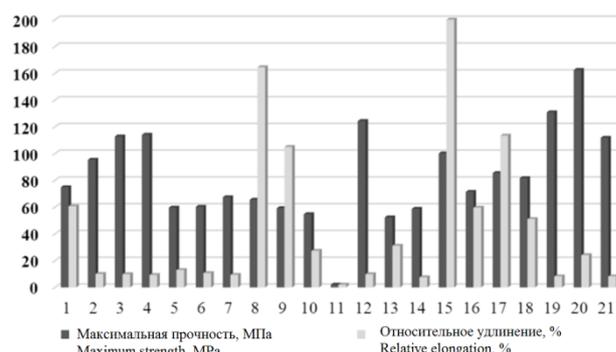


Рисунок 3. Прочностные показатели экспериментальных образцов в сухом состоянии

Figure 3. Strength properties of experimental samples in dry condition

Таблица 2. Прочностные показатели модифицированных пленок ПВС марок 05–88 и 24–88 с максимальным содержанием сшивающего агента в сухом и паронасыщенном состоянии

Table 2. Strength properties of modified PVA films of grades 05–88 and 24–88 with maximum content of crosslinking agent in dry and vapor-saturated state

| Образец Sample | Прочностные показатели пленок в сухом состоянии Dry strength properties of films | | Прочностные показатели пленок в паронасыщенном состоянии Strength properties of films in a vapor-saturated state | |
|-------------------|---|--|---|--|
| | Мак прочность, МПа Max strength, MPa | Относительное удлинение, % Relative elongation, % | Мак прочность, МПа Max strength, MPa | Относительное удлинение, % Relative elongation, % |
| 1 | 74,8 | 60,6 | 0,13 | 69,2 |
| 4 | 113,9 | 9,2 | 3,2 | 112,6 |
| 7 | 67,3 | 9,3 | 6,9 | 73,7 |
| 15 | 100,1 | 209,9 | 3,5 | 360,0 |
| 18 | 81,6 | 51,0 | 4,6 | 219,2 |
| 21 | 111,7 | 8,2 | 4,4 | 157,8 |

При насыщении водяным паром исследуемых пленок (таблица 2) прочность при разрыве снижается в 600 раз для немодифицированного ПВС 05–88 и в 30 раз – для ПВС 24–88 (удлинение повышается соответственно в 1,1 и 1,7 раз). При сшивке тетраборатом для паронасыщенного ПВС 05–88 прочность снижается в 40 раз, для ПВС 24–88 – в 20 раз (удлинение повышается соответственно в 12 и 4 раза), при сшивке борной кислотой прочность ПВС 05–88 снижается в 10 раз, ПВС 24–88 – в 25 раз (удлинение повышается соответственно в 8 и 20 раз).

Заключение

Влияние природы сшивателя на свойства модифицированных пленок существенно отличается для ПВС с различной ММ. Тетраборат натрия приводит к быстрому гелеобразованию р-ра ПВС,

что проявляется интенсивнее с увеличением ММ полимера, поэтому его введение ограничено 2,0, 1,0 и 0,5 масс.% соответственно для ПВС 05–88, 17–88 и 24–88; при сшивке борной кислотой эффект гелеобразования отсутствует. Тетраборат натрия неэффективен для повышения водостойкости ПВС, хотя существенно повышает прочностные показатели пленок ПВС с низкой ММ; борная кислота эффективно сшивает ПВС, особенно с высокой ММ, что проявляется в значительном увеличении времени растворения пленок. Максимальный эффект сшивки, сопровождающийся значительным повышением водостойкости, наблюдался в случае модификации средне- и высокомолекулярного ПВС борной кислотой в количестве не менее 5,0 масс.% от массы полимера.

Литература

- 1 Губанова М.И., Баженов Н.С., Кирш И.А., Банникова О.А. и др. Исследование пленочных материалов, полученных из модифицированных растворных систем на основе поливинилового спирта // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 2. С. 226–236.
- 2 Yalan Liu. Biodegradation analysis of polyvinyl alcohol during the compost burial course // Journal of Basic Microbiology. 2019. V. 59. P. 368–374.
- 3 Гетмадинова В.М., Сидоров Ю.Д., Поливанов М.А. Регулирование растворимости композиционных материалов на основе поливинилового спирта // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 6. С. 96–99.
- 4 Студеникина Л.Н., Домарева С.Ю., Голенских Ю.Е., Матвеева А.В. Особенности высоконаполненных композитов на основе различных марок поливинилового спирта // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1 (87). С. 316–322.
- 5 Hu H., Yong H., Yao X., Chen D. et al. Effect of starch aldehyde-catechin conjugates on the structural, physical and antioxidant properties of quaternary ammonium chitosan/polyvinyl alcohol films // Food Hydrocolloids. 2022. V. 124.
- 6 Fan K., Zhang M., Jiang F. Ultrasound treatment to modified atmospheric packaged fresh-cut cucumber: Influence on microbial inhibition and storage quality // Ultrasonics Sonochemistry. 2019. № 54. P. 162–170.
- 7 Awada H., Daneault C. Chemical Modification of Poly(Vinyl Alcohol) in Water // Appl. Sci. 2015. V. 5. P. 840–850.
- 8 Труфакина Л.М. Свойства полимерных композитов на основе поливинилового спирта. Известия Томского политехнического университета // Химия и химические технологии. 2014. Т. 325. № 3. С. 92–97.
- 9 Liu B., Zhang J., Guo H. Research Progress of Polyvinyl Alcohol Water-Resistant Film Materials // Membranes. 2022. V. 12. P. 347.
- 10 Просанов И.Ю., Булина Н.В., Герасимов К.Б. Комплексы поливинилового спирта с нерастворимыми неорганическими соединениями // Физика твердого тела. 2013. Т.55. №. 10. С. 2016–2019.
- 11 Rhim J.W., Sohn M.Y., Joo H.J., Lee K.H. Pervaporation separation of binary organic-aqueous liquid mixtures using crosslinked PVA membranes. I. Characterization of the reaction between PVA and poly (acrylic acid) // Chem. Abs. 1993. V. 119. № 20. P. 77.
- 12 Riedo C., Caldera F., Poli T. et al. Poly(vinylalcohol) – borate hydrogels with improved features for the cleaning of cultural heritage surfaces // Herit Sci. 2015. V. 3. P. 23.
- 13 Carretti E., Matarrese C., Fratini E., Baglioni P. et al. Physicochemical characterization of partially hydrolyzed poly(vinyl acetate) – borate aqueous dispersions // Soft Matter. 2014. V. 10. № 25. P. 4443–50.
- 14 Geng S., Shah F.U., Liu P., Antzutkin O.N. et al. Plasticizing and crosslinking effects of borate additives on the structure and properties of poly(vinyl acetate) // RSC Adv. 2017. № 7. P. 7483–7491.
- 15 Sun L., Wang J., Liang J. et al. Boric Acid Cross-linked 3D Polyvinyl Alcohol Gel Beads by NaOH-Titration Method as a Suitable Biomass Immobilization Matrix // J Polym Environ. 2020. V. 28. P.532–541.
- 16 Lum Y.H., Shaaban A., Mohamad N., Dimin F. et al. Boric acid modified starch polyvinyl alcohol matrix for slow release fertilizer // e-Polymers. 2016. V. 16. №. 2. P. 151-158.
- 17 Marin L., Ailincăi D., Paslaru E. Monodisperse PDLC composites generated by use of polyvinyl alcohol boric acid as matrix // RSC Advances. 2014. V. 4. №. 72. P. 38397-38404.
- 18 Al-Emam E., Soenen H., Caen J., Janssens K. et al. Characterization of polyvinyl alcohol-borax/agarose (PVA-B/AG) double network hydrogel utilized for the cleaning of works of art // Heritage Science. 2020. V. 8. P. 1-14.
- 19 Carretti E., Bonini M., Dei L., Berrie B. H. et al. New frontiers in materials science for art conservation: responsive gels and beyond // Accounts of chemical research. 2010. V. 43. №. 6. P. 751-760.
- 20 Студеникина Л.Н., Домарева С.Ю., Голенских Ю.Е., Матвеева А.В., Мельников А.А. Повышение прочности и водостойкости материалов на основе поливинилового спирта с помощью борной кислоты // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2 (92). С. 249–255.

References

- 1 Gubanova M.I., Bazhenov N.S., Kirsh I.A., Bannikova O.A. et al. Study of film materials obtained from modified solution systems based on polyvinyl alcohol. Proceedings of VSUET. 2023. vol. 85. no. 2. pp. 226–236. (in Russian).
- 2 Yalan Liu. Biodegradation analysis of polyvinyl alcohol during the compost burial course. Journal of Basic Microbiology. 2019. vol. 59. pp. 368–374.

- 3 Getmadinova V.M., Sidorov Yu.D., Polivanov M.A. Regulation of the solubility of composite materials based on polyvinyl alcohol. Bulletin of the Technological University. 2016. vol. 19. no. 6. pp. 96–99. (in Russian).
- 4 4 Studenikina L.N., Domareva S.Yu., Golenskikh Yu.E., Matveeva A.V. Features of highly filled composites based on various grades of polyvinyl alcohol. Proceedings of VSUET. 2021. vol. 83. no. 1 (87). pp. 316–322. (in Russian).
- 5 Hu H., Yong H., Yao X., Chen D. et al. Effect of starch aldehyde-catechin conjugates on the structural, physical and antioxidant properties of quaternary ammonium chitosan/polyvinyl alcohol films. Food Hydrocolloids. 2022. vol. 124.
- 6 Fan K., Zhang M., Jiang F. Ultrasound treatment to modified atmospheric packaged fresh-cut cucumber: Influence on microbial inhibition and storage quality. Ultrasonics Sonochemistry. 2019. no. 54. pp. 162–170.
- 7 Awada H., Daneault C. Chemical Modification of Poly(Vinyl Alcohol) in Water. Appl. Sci. 2015. vol. 5. pp. 840–850.
- 8 Trufakina L.M. Properties of polymer composites based on polyvinyl alcohol. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Chemistry and Chemical Technologies. 2014. vol. 325. no. 3. pp. 92–97. (in Russian).
- 9 Liu B., Zhang J., Guo H. Research Progress of Polyvinyl Alcohol Water-Resistant Film Materials. Membranes. 2022. vol. 12. pp. 347.
- 10 Prosanov I.Yu., Bulina N.V., Gerasimov K.B. Complexes of polyvinyl alcohol with insoluble inorganic compounds. Solid State Physics. 2013. vol. 55. no. 10. pp. 2016–2019. (in Russian).
- 11 Rhim J.W., Sohn M.Y., Joo H.J., Lee K.H. Pervaporation separation of binary organic-aqueous liquid mixtures using crosslinked PVA membranes. I. Characterization of the reaction between PVA and poly (acrylic acid). Chem. Abs. 1993. vol. 119. no. 20. pp. 77.
- 12 Riedo C., Caldera F., Poli T. et al. Poly(vinylalcohol) – borate hydrogels with improved features for the cleaning of cultural heritage surfaces. Herit Sci. 2015. vol. 3. pp. 23.
- 13 Carretti E., Matarrese C., Fratini E., Baglioni P. et al. Physicochemical characterization of partially hydrolyzed poly(vinyl acetate) – borate aqueous dispersions. Soft Matter. 2014. vol. 10. no. 25. pp. 4443–50.
- 14 Geng S., Shah F.U., Liu P., Antzutkin O.N. et al. Plasticizing and crosslinking effects of borate additives on the structure and properties of poly(vinyl acetate). RSC Adv. 2017. no. 7. pp. 7483–7491.
- 15 Sun L., Wang J., Liang J. et al. Boric Acid Cross-linked 3D Polyvinyl Alcohol Gel Beads by NaOH-Titration Method as a Suitable Biomass Immobilization Matrix. J Polym Environ. 2020. vol. 28. pp.532–541.
- 16 Lum Y.H., Shaaban A., Mohamad N., Dimin F. et al. Boric acid modified starch polyvinyl alcohol matrix for slow release fertilizer. e-Polymers. 2016. vol. 16. no. 2. pp. 151-158.
- 17 Marin L., Ailincăi D., Paslaru E. Monodisperse PDLC composites generated by use of polyvinyl alcohol boric acid as matrix. RSC Advances. 2014. vol. 4. no. 72. pp. 38397-38404.
- 18 Al-Emam E., Soenen H., Caen J., Janssens K. et al. Characterization of polyvinyl alcohol-borax/agarose (PVA-B/AG) double network hydrogel utilized for the cleaning of works of art. Heritage Science. 2020. vol. 8. pp. 1-14.
- 19 Carretti E., Bonini M., Dei L., Berrie B. H. et al. New frontiers in materials science for art conservation: responsive gels and beyond. Accounts of chemical research. 2010. vol. 43. no. 6. pp. 751-760.
- 20 Studenikina L.N., Domareva S.Yu., Golenskikh Yu.E., Matveeva A.V., Melnikov A.A. Increasing the strength and water resistance of materials based on polyvinyl alcohol using boric acid. Proceedings of VSUET. 2022. vol. 84. no. 2 (92). pp. 249–255. (in Russian).

Сведения об авторах

Любовь Н. Студеникина к.т.н., доцент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lubov-churkina@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-6613-4974>

Вероника Е. Углова студент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, veronika200312@gmail.com

Игорь В. Коленко студент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kolenko.igor.55@gmail.com

Александр А. Мельников студент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, melnikov.shura@inbox.ru

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Lyubov N. Studenikina Cand. Sci. (Engin.), associate professor, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, lubov-churkina@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-6613-4974>

Veronika E. Uglova student, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, veronika200312@gmail.com

Igor V. Kolenko student, Voronezh State University of Engineering Technologies, industrial ecology and technosphere safety department, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kolenko.igor.55@gmail.com

Alexandr A. Melnikov student, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, melnikov.shura@inbox.ru

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

| | | |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Поступила 28/06/2024 | После редакции 25/07/2024 | Принята в печать 12/08/2024 |
| Received 28/06/2024 | Accepted in revised 25/07/2024 | Accepted 12/08/2024 |