

УДК 544.162, 579.6, 57.083.1

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОДЕГРАДАЦИИ, А ТАКЖЕ АНТИМИКРОБНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНЫХ ПЛЕНОК С ДОБАВКАМИ ПЕКТИНА И КРАХМАЛА

В.С. Сибирцев^a, К.В. Волкова^a, А.Х. Хайдаров^a, Чан Тхань Туан^{b, a}, С.А. Строев^c, М.А. Радин^d

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Российско-вьетнамский тропический центр, Ханой, 220000, Вьетнам

^c Университет Тампере, Тампере, 33014, Финляндия

^d Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация

Адрес для переписки: vs1969r@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.10.17, принята к печати 04.12.17

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-43-49

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Сибирцев В.С., Волкова К.В., Хайдаров А.Х., Чан Тхань Туан, Строев С.А., Радин М.А. Исследование биодegradации, а также антимикробных свойств поливинилхлоридных пленок с добавками пектина и крахмала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 43–49. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-43-49

Аннотация. Описан новый метод оценки устойчивости полимерных материалов к деструкции, обусловливаемой действием различных факторов (таких как механические нагрузки, влага и жизнедеятельность микроорганизмов). Метод включает в себя сравнение прочности на прокалывание образцов исследуемых материалов, определяемой как после 9-суточной инкубации упомянутых образцов в жидкой питательной среде с тестовыми микроорганизмами (с ежесуточной заменой 40 об.% этой среды на стерильную), так и после инкубации аналогичных образцов в стерильной питательной среде, а также без инкубации таковых образцов. Исследована описанным методом устойчивость к различным видам деструкции ряда новых полимерных материалов, изготовленных на основе поливинилхлорида с добавлением 0, 1, 5 и 10 масс.% крахмала и яблочного пектина. Исследовано также влияние упомянутых материалов на рост и метаболическую активность в жидкой питательной среде *Escherichia coli* ATCC 25922 (по динамике изменения интенсивности упругого светорассеяния и электропроводности упомянутой среды в течение первых 10 часов ее инкубации в присутствии тестируемых объектов и тестовых микроорганизмов). В результате показано, что все исследуемые материалы устойчивы к действию влаги. В то же время все используемые добавки даже в количестве 1 масс.% значительно уменьшали механическую прочность исследуемых материалов относительно чистого поливинилхлорида, а также (хотя и в существенно меньшей степени при малых количествах добавок) увеличивали биодegradируемость данных материалов. Причем последний эффект обеспечивался в значительно большей степени добавлением к поливинилхлориду крахмала, чем добавлением пектина. Кроме того, все используемые добавки снижали антимикробное действие поливинилхлоридной основы исследуемых материалов. Снижение это происходило в тем большей мере, чем большее количество крахмала или пектина содержалось в исследуемом материале, а при одинаковом количестве последних – в большей мере в присутствии крахмала, нежели в присутствии пектина.

Ключевые слова

биодegradация, полимеры, поливинилхлорид, крахмал, пектин, антимикробные свойства

RESEARCH OF BIODEGRADATION AND ANTIMICROBIAL PROPERTIES OF POLYVINYL CHLORIDE SHEETINGS WITH PECTIN AND STARCH ADDITIVES

V.S. Sibirtsev^a, K.V. Volkova^a, A.Kh. Khaydarov^a, Chan Than Tuan^{b, a}, S.A. Stroeve^c, M.A. Radin^d

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Russian-Vietnamese Tropical Center, Ha Noi, 220000, Viet Nam

^c University of Tampere, Tampere, 33014, Finland

^d Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

Corresponding author: vs1969r@mail.ru

Article info

Received 30.10.17, accepted 04.12.17

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-43-49

Article in Russian

For citation: Sibirtsev V.S., Volkova K.V., Khaydarov A.Kh., Chan Than Tuan, Stroeв S.A., Radin M.A. Research of biodegradation and antimicrobial properties of polyvinyl chloride sheetings with pectin and starch additives. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 43–49 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-43-49

Abstract

The paper describes a new method of stability assessment of polymeric materials to destruction caused by various factors (such as mechanical loads, moisture and microorganisms' vital activity). This method includes puncture resistance comparison of researched material samples, determined after nine-day incubation of these samples in liquid nutrient medium with test microorganisms and daily 40 vol.% substitution of this medium for a sterile one, as well as after incubation of similar samples in a sterile medium, and without incubation of these samples. The described method was used to study stability of a number of new polymeric materials to various types of destruction. The materials were made on the basis of vinyl chloride polymer with addition of 0, 1, 5 and 10 mass.% of starch and pectin. The effect of the mentioned materials on the growth and metabolic activity in liquid nutrient medium of *Escherichia coli* ATCC 25922 was studied also (according to dynamics of intensity change of elastic optical dispersion and conductivity of the mentioned medium during the first ten hours of its incubation at the presence of tested objects and test microorganisms). As a result, it is shown that all researched materials are resistant to moisture action. At the same time, all used additives even in 1 mass.% quantity considerably reduced mechanical strength of researched materials compared with pure vinyl chloride polymer; as well as increased biodegradation of these materials (though in substantially smaller degree at small quantities of the additives). Moreover, the latter effect was provided by the addition of starch to vinyl chloride polymer in considerably greater degree, than the addition of pectin. Besides, all used additives reduced the antimicrobial effect of the polyvinyl chloride base of researched materials. The more starch or pectin was contained in researched material, the greater reduction occurred; at the identical quantity of them it occurred in the presence of starch to a greater extent, than in the presence of pectin.

Keywords

biodegradation, polymers, polyvinyl chlorides, starch, pectin, antimicrobial properties

Введение

В связи с постоянным ростом ассортимента и объемов производства и потребления человеческим обществом различной продукции (а также тем, что все большая ее доля приходится на различные полимеры), утилизация отходов (и в особенности полимерных) стала в настоящее время одной из главных экологических проблем человечества. Одним из лучших способов решения этой проблемы является создание и как можно более широкое использование материалов, способных достаточно быстро разлагаться под действием различных климатических, биологических и иных факторов [1–13]. Причем часто для достижения данной цели наиболее приемлемым является нахождение простых, доступных и дешевых способов модификации материалов, ранее уже достаточно широко применимых, но обладающих значительной исходной устойчивостью к естественным разрушающим факторам. Одним из таких материалов является поливинилхлорид (ПВХ). С другой стороны, в целом ряде случаев, наоборот, желательно применение материалов, проявляющих возможно большую устойчивость к воздействию на них различных живых организмов и иных потенциально разрушающих факторов.

Помимо этого, все более актуальной в настоящее время становится и проблема разработки достаточно объективных, простых, доступных, дешевых и экспрессных способов оценки устойчивости как вновь разрабатываемых, так и уже ранее используемых материалов к деградации, индуцируемой различными факторами. Среди последних живые организмы являются одними из наиболее действенных разрушающих агентов. Микроорганизмы, в свою очередь, являются наиболее распространенными и, как правило, наиболее действенными материалоразрушающими агентами среди живых организмов. Кроме того, взаимодействие упомянутых микроорганизмов с тестируемыми образцами в большинстве случаев может служить наиболее статистически достоверной, простой, дешевой и экспрессной моделью взаимодействия таковых образцов с другими живыми организмами [14–16]. В то же время устойчивость различных материалов к биодеградации до сих пор оценивается в основном визуально (а следовательно, в значительной мере субъективно) и весьма длительно [17, 18].

И наконец, для определения степени биодegradуемости, а также спектра применимости различных материалов важна также объективная оценка про- либо антибиотических свойств таких материалов [14–16, 19–21].

Материалы и методы

В качестве объекта исследования в настоящей работе были взяты пленки толщиной 0,3 мм, изготовленные на основе ПВХ с добавлением 0, 1, 5 и 10 масс.% крахмала и яблочного пектина. Последнее должно было повысить эффективность процессов биодеградации исследуемых материалов, протекающих в естественных условиях [22–24].

Для анализа этих материалов была приготовлена заквасочная питательная среда (ЗПС). Для этого в колбу вместимостью 1 л было залито 800 мл стерильной жидкой питательной среды (СЖПС) и 100 мл микробной закваски. При этом в качестве СЖПС использовался стерилизуемый автоклавированием в течение 20 минут при 115°C водный раствор с pH 7,2, содержащий 5 г/л глюкозы, 18 г/л белкового гидролизата и 2 г/л NaCl, а в качестве микробной закваски – та же жидкая питательная среда, но уже не сте-

рильная, а содержащая в 1 мл примерно 10^7 жизнеспособных клеток *Escherichia coli* ATCC 25922 (что удостоверялось оптическим способом по стандарту мутности). Данный штамм был выбран в качестве тестового биообъекта потому, что *E.coli* является общепринятым санитарно-показательным микроорганизмом; способна к активной жизнедеятельности как в аэробных, так и в анаэробных условиях на самых разнообразных субстратах (включая полное отсутствие органических веществ), а кроме того, способна к активной сорбции на твердых поверхностях и обладает развитой ферментной системой – что, в совокупности, позволяет *E.coli* обитать в большинстве мест возможной эксплуатации либо утилизации широкого спектра тестируемых материалов, активно деградируя последние. Состав СЖПС обеспечивал оптимальные условия для развития в этой среде тестовых микроорганизмов.

Затем колба с ЗПС помещалась в жидкостной термостат «LOIP LT-117b» и инкубировалась в нем в течение следующих 12 часов при $37 \pm 0,1^\circ\text{C}$ (для адаптации тестовых микроорганизмов и перехода их в наиболее активную, экспоненциальную фазу роста). Далее образец каждого из предназначенных для анализа материалов разрезался на 12 частей размером 20×20 мм, четыре из которых составили исходную выборку, другие четыре – контрольную, а последние четыре – биоразлагаемую. После этого каждая из частей тестируемых образцов, входящая в состав контрольной либо биоразлагаемой выборки, была помещена в отдельную пробирку и залита 3 мл СЖПС (в случае контрольной выборки) либо жидкой тестовой среды (ЖТС), представляющей собой смесь из 2,1 мл СЖПС и 0,9 мл ЗПС (в случае биоразлагаемой выборки). Затем все пробирки закрывались герметичными пробками (поскольку наличие кислорода не является принципиально необходимым для развития *E.coli*), ставились в термостат и инкубировались в нем в течение девяти суток при $30 \pm 0,1^\circ\text{C}$.

Выбор указанных продолжительности и температуры инкубирования образцов был связан с тем, что при более длительном инкубировании эффективность деградации тестируемых образцов увеличивалась незначительно по сравнению с затратами на ее определение; при более низкой температуре либо меньшем времени инкубирования не достигалась степень деградации тестируемых образцов, достаточная для ее надежного и достоверного определения предлагаемым методом; а при более высокой температуре инкубации для поддержания активной жизнедеятельности тестовых микроорганизмов (необходимой для эффективной биodeградации ими тестируемых образцов) требовалась бы более частая замена части ЖТС на СЖПС, что существенно увеличило бы трудоемкость анализа и затраты на его проведение.

Далее через каждый час в течение первых 10 часов упомянутой инкубации регистрировались интенсивность упругого светорассеяния (*Iod*) и удельная линейная низкочастотная электропроводность (*X*, мкСм/см) ЖТС, содержащейся в каждой из инкубируемых пробирок. Причем значения *Iod* регистрировались с помощью флуориметра СМ-2203 (в режиме «Кинетика FL» при длине волны возбуждения и эмиссии 510 нм, наиболее чувствительной к концентрационным изменениям суспензии *E.coli* в СЖПС, ширине щелей монохроматоров по 20 нм, очень низком усилении фотоэлектронного умножителя, времени усреднения сигнала по одному измерению 2 с, периодичности измерений 10 с и общем времени измерений 2 мин). А значения *X* регистрировались с помощью кондуктометра «Эксперт-002», работающего на частоте 1,6 кГц, с погружным датчиком УЭП-П-С.

Кроме того, в течение всех девяти суток упомянутой инкубации в каждой из пробирок, содержащих тестируемые образцы, производилась ежесуточная замена 40 об.% ЖТС на СЖПС. Эта замена была необходима для поддержания высокой метаболической активности тестовых микроорганизмов в течение всего периода инкубирования в их присутствии тестируемых образцов (что требовалось, в свою очередь, для увеличения эффективности биodeградации тестируемых образцов и сокращения, вследствие этого, общего времени анализа их устойчивости к воздействию микроорганизмов), а также для поддержания стерильности среды, в которой инкубировались контрольные образцы.

После окончания инкубации все образцы доставались из пробирок, промывались и высушивались. После этого у всех частей исследуемых образцов (включая исходные, не подвергавшиеся инкубации), а также у эталонного образца (в качестве которого в данном случае был выбран 100% ПВХ) с помощью текстуромера «ТА.ХТ+» производилось измерение прочности на прокалывание (σ , МПа). Затем для каждого из тестируемых материалов определялись следующие коэффициенты деградации, обусловленной различными факторами:

- $K_{TD} = 100 \times (\sigma_B - \sigma_R) / \sigma_R$ – общий коэффициент разлагаемости (отражающий изменение прочности тестируемых образцов после инкубирования их в ЖТС относительно исходной прочности эталонных образцов);
- $K_{MD} = 100 \times (\sigma_I - \sigma_R) / \sigma_R$ – коэффициент механоразлагаемости (обусловленной различными механическими воздействиями на тестируемые образцы), отражающий изменение исходной прочности тестируемых образцов относительно исходной прочности эталонных образцов;
- $K_{CD} = 100 \times (\sigma_C - \sigma_I) / \sigma_I$ – коэффициент хеморазлагаемости (обусловленной взаимодействием тестируемых образцов с водой и другими химическими компонентами, содержащимися в СЖПС), отражающий изменение прочности тестируемых образцов после инкубирования их в СЖПС относительно исходной прочности тех же образцов;

– $K_{BD} = 100 \times (\sigma_B - \sigma_C) / \sigma_C$ – коэффициент биоразлагаемости (обусловленной взаимодействием тестируемых образцов с тестовыми микроорганизмами), отражающий изменение прочности тестируемых образцов после инкубирования их в ЖТС относительно прочности образцов того же материала после инкубирования их в СЖПС,

где σ_I , σ_C и σ_B – средняя по выборке прочность на прокалывание исходных, контрольных и биоразлагаемых образцов тестируемого материала; σ_R – средняя по выборке прочность на прокалывание эталонного материала (в качестве которого в данном случае был взят 100% ПВХ), не подвергавшегося инкубации. После этого на основании анализа полученных значений K_{TD} , K_{MD} , K_{CD} и K_{BD} , а также графиков зависимостей I_{od} и X от времени инкубации тестируемых образцов в присутствии тестовых микроорганизмов, делался общий вывод о причинах и степени устойчивости каждого из исследуемых материалов к различным видам деградации, а также о про- либо антимикробных свойствах этих материалов.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений и расчетов приведены в таблице и на рис. 1, 2.

Состав образца	Прочность образцов σ , МПа			K_{MD} , %	K_{BD} , %	K_{CD} , %	K_{TD} , %
	исходная σ_I	контрольная σ_C	биоразлагаемая σ_B				
100% ПВХ	13,5±0,7	13,5±0,7	13,0±0,7	0	-4	0	-4
1 масс.% крахмал	8,5±0,5	8,4±0,5	7,6±0,5	-37	-10	-1	-44
5 масс.% крахмал	6,2±0,4	6,1±0,4	4,9±0,4	-54	-20	-2	-64
10 масс.% крахмал	4,0±0,3	3,9±0,3	2,4±0,2	-70	-39	-2	-82
1 масс.% пектин	9,1±0,5	9,1±0,5	8,7±0,5	-33	-5	0	-36
5 масс.% пектин	6,8±0,5	6,7±0,5	6,2±0,5	-50	-8	-1	-54
10 масс.% пектин	4,7±0,4	4,6±0,3	3,9±0,3	-65	-15	-2	-71

Таблица. Прочность на прокалывание и коэффициенты деградации тестируемых материалов в различных условиях

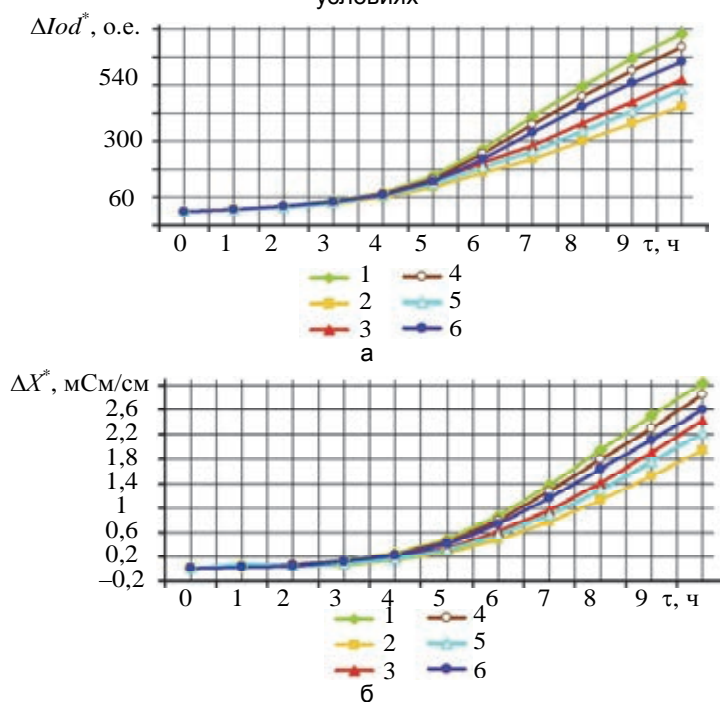


Рис. 1. Усредненные интегральные зависимости интенсивности упругого светорассеяния (I_{od}) и удельной линейной электропроводности по низкочастотному переменному току (X) от времени инкубации (τ) при 30°C *Escherichia coli* ATCC 25922 в жидкой тестовой среде (см. «Материалы и методы») в присутствии и в отсутствии (контроль, линия 1) тестируемых материалов – пленок толщиной 0,3 мм, изготовленных на основе поливинилхлорида с добавлением 0, 1, 5 и 10 масс.% крахмала и яблочного пектина. Линиями 2–6, соединяющими экспериментальные точки, показаны значения, полученные для *E. coli*, инкубированных в присутствии материалов, содержащих 0–1 масс.% крахмала или пектина (линия 2), 5 и 10 масс.% крахмала (линии 3 и 4) и 5 и 10 масс.% пектина (линии 5 и 6) соответственно. По оси ординат отложены значения $\Delta I_{od}^* = I_{od} - I_{od_0}$ (а) и $\Delta X^* = X_0 - X$ (б), где I_{od_0} и X_0 – значения соответствующих параметров при $\tau=0$. Ошибки, полученные при усреднении данных для каждой экспериментальной точки, не показаны, поскольку для любой точки составляли в относительном выражении не более 8%

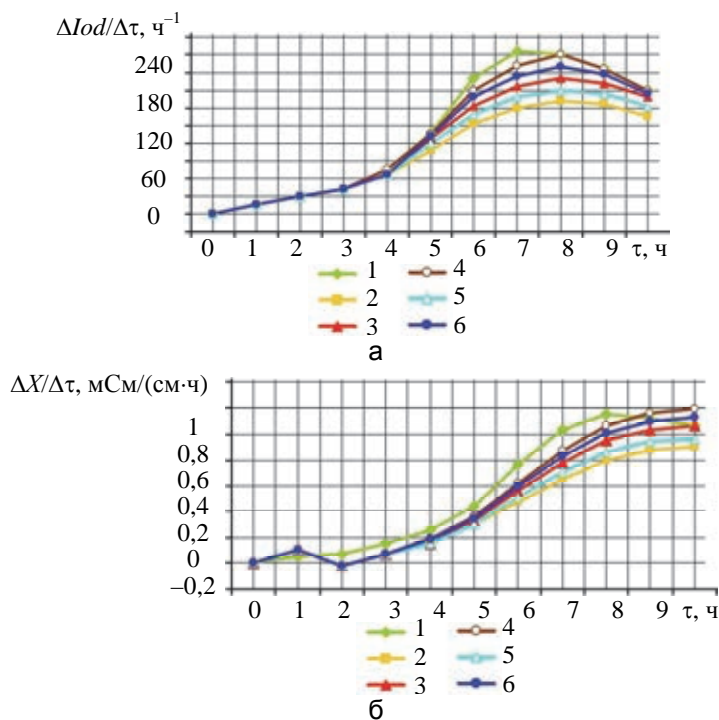


Рис. 2. Усредненные дифференциальные зависимости l и X от времени инкубации (τ) при 30°C *E. coli* в жидкой тестовой среде (см. «Материалы и методы») в присутствии и в отсутствии поливинилхлоридных пленок с различными добавками. При этом по оси ординат отложены значения

$$\Delta l / \Delta \tau_i = (l_{\tau_i} - l_{\tau_{i-1}}) / (\tau_i - \tau_{i-1}) \text{ (а) и } \Delta X / \Delta \tau_i = (X_{\tau_i} - X_{\tau_{i-1}}) / (\tau_i - \tau_{i-1}) \text{ (б)}.$$

Прочие обозначения – как на рис. 1

Резюмируем полученные результаты. Все применявшиеся добавки значительно уменьшали механическую прочность исследуемых материалов относительно чистого ПВХ (от $K_{MD} = -33\%$ при добавке к ПВХ всего 1 масс.% пектина до $K_{MD} = -70\%$ при добавке к ПВХ 10 масс.% крахмала; см. таблицу). Причем происходило это в тем большей мере, чем в большем количестве эти добавки содержались в исследуемых материалах, а также в большей мере в присутствии крахмала, чем в присутствии пектина.

Устойчивость к действию влаги у всех исследуемых материалов, наоборот, была весьма высокой (K_{CD} от 0 до -2% ; см. таблицу) и мало зависела от вида и количества веществ, добавляемых к ПВХ.

Эффективность биodeградации исследуемых материалов при добавке к ПВХ пектина также увеличивалась не очень значительно (от $K_{BD} = -5\%$ до $K_{BD} = -15\%$ при добавке к ПВХ от 1 до 10 масс.% пектина соответственно относительно $K_{BD} = -4\%$, наблюдавшегося для чистого ПВХ; см. таблицу). В то же время добавка к чистому ПВХ тех же количеств крахмала увеличивала биodeградируемость получаемых материалов существенно более значимо (от $K_{BD} = -10\%$ до $K_{BD} = -39\%$ при добавке к ПВХ от 1 до 10 масс.% крахмала соответственно; см. таблицу). Но основным фактором, определяющим общую деградируемость исследуемых материалов, и в этом случае являлась их устойчивость к механическим нагрузкам (таблица).

Кроме того, все используемые добавки снижали антимикробное действие ПВХ-основы исследуемых материалов. Причем снижение это происходило в тем большей мере, чем большее количество крахмала или пектина содержалось в исследуемом материале; а при одинаковом количестве последних – в большей мере в присутствии крахмала, нежели в присутствии пектина (рис. 1, 2).

И наконец, при подробном рассмотрении рис. 1, 2 можно отметить, что максимальная интенсивность метаболизма *E. coli* (выражаемая величиной $|\Delta X / \Delta \tau|$) во всех случаях достигалась тогда, когда скорость роста рассматриваемых микроорганизмов (выражаемая величиной $\Delta l / \Delta \tau$) уже начинала уменьшаться. Кроме того, значения $\Delta X / \Delta \tau$ у *E. coli* в начальный период их инкубации в присутствии тестируемых материалов изменялись немонотонно – что, вероятно, отражало процессы адаптации тестовых микроорганизмов к присутствию тестируемых материалов.

Заключение

Мы убедились, что описываемые в настоящей работе способ оценки устойчивости полимерных материалов к деградации, обусловливаемой действием различных факторов (таких как механические нагрузки, влага и жизнедеятельность микроорганизмов), а также способ оценки влияния упомянутых материалов на рост и метаболическую активность тестовых микроорганизмов – достаточно быстрые, доступные и простые в исполнении, объективные и информативные. Новые исследуемые материалы, изготовленные на основе поливинилхлорида с добавками различных количеств крахмала и яблочного пектина,

характеризуются высокой влагоустойчивостью при значительно меньшей, по отношению к чистому поливинилхлориду, степени устойчивости к действию механических нагрузок и жизнедеятельных микроорганизмов. Кроме того, для всех упомянутых материалов было характерно снижение антимикробной активности по сравнению с чистой поливинилхлоридной основой, использовавшейся при их изготовлении. Причем снижение это происходило в тем большей мере, чем большее количество крахмала или пектина содержалось в исследуемом материале, а при одинаковом количестве последних – в большей мере в присутствии крахмала, чем в присутствии пектина.

Литература

1. Успенская М.В., Сиротинкин Н.В., Шарапов С.В. Особенности горения наполненных пенополиуретанов // Пластические массы. 2005. № 7. С. 23–25.
2. Podshivalov A.V., Bronnikov S., Zuev V.V., Jiamrungraksa T., Charuchinda S. Synthesis and characterization of polyurethane-urea microcapsules containing galangal essential oil: statistical analysis of encapsulation // Journal of Microencapsulation. 2013. V. 30. N 2. P. 198–203. doi: 10.3109/02652048.2012.735261
3. Gerard T., Budtova T., Podshivalov A., Bronnikov S. Poly(lactide/poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) blends: morphology and mechanical properties // Express Polymer Letters. 2014. V. 8. N 8. P. 609–617. doi: 10.3144/expresspolymlett.2014.64
4. Подшивалов А.В., Бронников С.В., Gerard T., Будтова Т.В. Морфология и механические свойства смеси полилактид-сополимер полиоксикислот // Физико-химия полимеров: синтез, свойства и применение. 2014. № 20. С. 35–40.
5. Olekhnovich R.O., Volkova K.V., Uspenskii A.A., Slobodov A.A., Uspenskaya M.V. Synthesis of poly(acrylic acid)-co-acrylamide/bentonite polymer nanocomposite as an absorbent for removal of heavy metal ions from water // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. Albena, Bulgaria, 2015. P. 477–484.
6. Денисюк И.Ю., Позднякова С.А., Корякина И.Г., Успенская М.В., Волкова К.В. Фотодеградация полимера, иницируемая наночастицами ZnO // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 121. № 5. С. 833–836.
7. Podshivalov A., Zakharova M., Glazacheva E., Uspenskaya M. Gelatin/potato starch edible biocomposite films: correlation between morphology and physical properties // Carbohydrate Polymers. 2017. V. 157. P. 1162–1172. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.10.079
8. Билибин А.Ю., Зорин И.М. Деструкция полимеров, ее роль в природе и современных медицинских технологиях // Успехи химии. 2006. № 75. С. 151–165.
9. Власов С.В., Ольхов В.В. Биоразлагаемые полимерные материалы // Полимерные материалы. 2006. № 7. С. 23–26.
10. Vroman I., Tighzert L. Biodegradable polymers // Materials. 2009. V. 2. N 2. P. 307–344. doi: 10.3390/ma2020307
11. Ozdil D., Aydin L.M. Polymers for medical and tissue engineering applications // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2014. V. 89. N 12. P. 1793–1810. doi: 10.1002/jctb.4505
12. Nigmatullin R., Thomas P., Lukasiewicz B., Puthussery H., Roy I. Polyhydroxyalkanoates, a family of natural polymers, and their applications in drug delivery // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2015. V. 90. N 7. P. 1209–1221. doi: 10.1002/jctb.4685
13. Esparza Y., Ullah A., Wu J. Preparation and characterization of graphite oxide nano-reinforced biocomposites from chicken feather keratin // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2017. V. 92. N 8. P. 2023–2031. doi: 10.1002/jctb.5196
14. Сибирцев В.С. Новые методы биотестирования с использованием микроорганизмов // Проблемы медицинской микологии. 2014. Т. 16. № 2. С. 127.
15. Сибирцев В.С., Красникова Л.В., Шлейкин А.Г., Строев С.А., Наумов И.А., Олехнович Р.О., Терещенко В.Ф., Шабанова Э.М., Мусса Аль-Хатиб. Новый метод биотестирования с применением современных импедансных технологий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015.

References

1. Uspenskaya M.V., Sirotkin N.V., Sharapov S.V. Particularities in combustion of filled foamed polyurethanes. *Plasticheskie Massy: Sintez Svoystva Pererabotka Primenenie*, 2005, no. 7, pp. 23–25. (In Russian)
2. Podshivalov A.V., Bronnikov S., Zuev V.V., Jiamrungraksa T., Charuchinda S. Synthesis and characterization of polyurethane-urea microcapsules containing galangal essential oil: statistical analysis of encapsulation. *Journal of Microencapsulation*, 2013, vol. 30, no. 2, pp. 198–203. doi: 10.3109/02652048.2012.735261
3. Gerard T., Budtova T., Podshivalov A., Bronnikov S. Poly(lactide/poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) blends: morphology and mechanical properties. *Express Polymer Letters*, 2014, vol. 8, no. 8, pp. 609–617. doi: 10.3144/expresspolymlett.2014.64
4. Podshivalov A.V., Bronnikov S.V., Gerard T., Budtova T.V. Morphology and mechanical properties of a mixture of poly(lactide-copolymer of polyhydroxy acids). *Fiziko-Khimiya Polimerov: Sintez, Svoystva i Primenenie*, 2014, no. 20, pp. 35–40. (In Russian)
5. Olekhnovich R.O., Volkova K.V., Uspenskii A.A., Slobodov A.A., Uspenskaya M.V. Synthesis of poly(acrylic acid)-co-acrylamide/bentonite polymer nanocomposite as an absorbent for removal of heavy metal ions from water. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Albena, Bulgaria, 2015, pp. 477–484.
6. Denisjuk I.Y., Pozdnyakova S.A., Koryakina I.G., Uspenskaya M.V., Volkova K.V. Polymer photodegradation initiated by ZnO nanoparticles. *Optics and Spectroscopy*, 2016, vol. 121, no. 5, pp. 778–781. doi: 10.1134/S0030400X16110096
7. Podshivalov A., Zakharova M., Glazacheva E., Uspenskaya M. Gelatin/potato starch edible biocomposite films: correlation between morphology and physical properties. *Carbohydrate Polymers*, 2017, vol. 157, pp. 1162–1172. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.10.079
8. Bilibin A.Yu., Zorin I.M. Polymer degradation and its role in nature and modern medical technologies. *Russian Chemical Reviews*, 2006, vol. 75, no. 2, pp. 133–145. doi: 10.1070/RC2006v075n02ABEH001213
9. Vlasov C.B., Ol'khov V.V. Biodegradable polymer materials. *Polimernye Materialy*, 2006, no. 7, pp. 23–26. (In Russian)
10. Vroman I., Tighzert L. Biodegradable polymers. *Materials*, 2009, vol. 2, no. 2, pp. 307–344. doi: 10.3390/ma2020307
11. Ozdil D., Aydin L.M. Polymers for medical and tissue engineering applications. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2014, vol. 89, no. 12, pp. 1793–1810. doi: 10.1002/jctb.4505
12. Nigmatullin R., Thomas P., Lukasiewicz B., Puthussery H., Roy I. Polyhydroxyalkanoates, a family of natural polymers, and their applications in drug delivery. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2015, vol. 90, no. 7, pp. 1209–1221. doi: 10.1002/jctb.4685
13. Esparza Y., Ullah A., Wu J. Preparation and characterization of graphite oxide nano-reinforced biocomposites from chicken feather keratin. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2017, vol. 92, no. 8, pp. 2023–2031. doi: 10.1002/jctb.5196
14. Sibirtsev V.S. New method of biotesting with microbes using. *Problems in Medical Microbiology*, 2014, vol. 16, no. 2, p. 127. (In Russian)
15. Sibirtsev V.S., Krasnikova L.V., Schleikin A.G., Stroeve S.A., Naumov I.A., Olekhnovich R.O., Tereshchenko V.F.,

- T. 15. № 2. С. 275–284. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-275-284
16. Sibirtsev V.S., Olekhovich R.O., Samuylova E.O. Assessment of integral toxicity of water resources by instrumental methods of analysis // Proc. 17th Int. Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. Albena, Bulgaria, 2017. V. 17. N 61. P. 507–514. doi: 10.5593/sgem2017/61/S24.066
 17. Матюша Г.В., Карташева Т.А., Герасименко А.А., Самунина А.А., Сизова Т.П. Штамм гриба *aspergillus flavus* link как тест-культура для определения грибостойкости сталей, оксидных алюминиевых и магниевых сплавов. Патент RU1766073. 1990.
 18. Кайя М. Биodeградируемые полимеры и способы их получения. Патент RU2535202. Опубл. 10.12.2014.
 19. Сибирцев В.С., Кулаков А.Ю., Строев С.А. Кондуктометрическое биотестирование в применении к оценке про- и антибактериальных свойств катоцитов и анолитов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 573–576. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-573-576
 20. Сибирцев В.С., Наумов И.А., Куприна Е.Э., Олехнович Р.О. Применение методики импедансного биотестирования для оценки действия фармацевтических соединений на рост микроорганизмов. // Химико-фармацевтический журнал. 2016. Т. 50. № 7. С. 51–55.
 21. Красникова Л.В., Сибирцев В.С., Скобелева И.И. Биотехнология функционального кисломолочного продукта с разным соотношением пробиотических культур // Известия СПбГТИ(ТУ). 2016. № 35 (61). С. 60–63.
 22. Averous L. Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch // Journal of Macromolecular Science, Polymer Reviews. 2004. V. 44. P. 231–274. doi: 10.1081/MC-200029326
 23. Донченко Л.В., Фирсов Г.Г. Технология пектина и пектинопродуктов. Краснодар: КубГАУ, 2006. 279 с.
 24. Muller J., Gonzalez-Martinez C., Chiralt A. Combination of poly(lactic) acid and starch for biodegradable food packaging // Materials. 2017. V. 10. N 8. Art. 952. doi: 10.3390/ma10080952
 - Shabanova E.M., Mussa Al-Khatib. New biotesting method with the application of modern impedance technologies. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 275–284. (In Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-275-284
 16. Sibirtsev V.S., Olekhovich R.O., Samuylova E.O. Assessment of integral toxicity of water resources by instrumental methods of analysis. *Proc. 17th Int. Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM*. Albena, Bulgaria, 2017, vol. 17, no. 61, pp. 507–514. doi: 10.5593/sgem2017/61/S24.066
 17. Matyusha G.V., Kartasheva T.A., Gerasimenko A.A., Samunina A.A., Sizova T.P. Strain of the fungus *aspergillus flavus* link as a test culture for the determination of the mushroom resistance of steels, oxide aluminum and magnesium alloys. *Patent RU2535202*, 1990.
 18. Kajja M. Biodegradable polymers and methods of their obtaining. *Patent RU2535202*, 2014.
 19. Sibirtsev V.S., Kulakov A.Yu., Stroeв S.A. Conductometry biotesting as applied to valuation of the pro- and antibacterial properties of catolites and anolites. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 573–576. (In Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-573-576
 20. Sibirtsev V.S., Kuprina E., Olekhovich R.O., Naumov I.A. Use of impedance biotesting to assess the actions of pharmaceutical compounds on the growth of microorganisms. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2016, vol. 50, no. 7, pp. 481–485. doi: 10.1007/s11094-016-1473-3
 21. Krasnikova L.V., Sibirtsev V.S., Skobeleva I.I. Biotechnology of functional fermented milk product with different ratios of probiotic cultures. *Bulletin of St PbsIT(TU)*, 2016, no. 35, pp. 60–63.
 22. Averous L. Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch. *Journal of Macromolecular Science, Polymer Reviews*, 2004, vol. 44, pp. 231–274. doi: 10.1081/MC-200029326
 23. Donchenko L.V., Firsov G.G. *Technology of Pectin and Pectin Products*. Krasnodar, KubSAU Publ., 2006, 279 p. (In Russian)
 24. Muller J., Gonzalez-Martinez C., Chiralt A. Combination of poly(lactic) acid and starch for biodegradable food packaging. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 8, art. 952. doi: 10.3390/ma10080952

Авторы

Сибирцев Владимир Станиславович – кандидат химических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6603964394, ORCID ID: 0000-0003-0829-5213, vs1969r@mail.ru

Волкова Ксения Васильевна – ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56954772900, ORCID ID: 0000-0002-2487-8542, volkova.kseniia@yandex.ru

Хайдаров Акрамходжа Хайдарходжаевич – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, akram.khaidarov@yandex.ru

Чан Тхань Туан – ассистент, Российско-вьетнамский тропический центр, Ханой, 220000, Вьетнам; студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, tranthanhtuan010182@gmail.com

Строев Сергей Александрович – PhD, научный сотрудник, Университет Тампере, Тампере, 33014, Финляндия, Scopus ID: 6603430133, ORCID ID: 0000-0003-0829-5213, s_stroev@hotmail.com

Радин Михаил Александрович – кандидат химических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация, chem_misha@mail.ru

Authors

Vladimir S. Sibirtsev – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6603964394, ORCID ID: 0000-0003-0829-5213, vs1969r@mail.ru

Kseniya V. Volkova – assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56954772900, ORCID ID: 0000-0002-2487-8542, volkova.kseniia@yandex.ru

Akramxodja Kh. Khaidarov – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, akram.khaidarov@yandex.ru

Chan Than Tuan – assistant, Russian-Vietnamese Tropical Center, Ha Noi, 220000, Viet Nam; student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, tranthanhtuan010182@gmail.com

Sergey A. Stroeв – PhD, Scientific Researcher, University of Tampere, Tampere, 33014, Finland, Scopus ID: 6603430133, ORCID ID: 0000-0003-0829-5213, s_stroev@hotmail.com

Mikhail A. Radin – PhD, Associate Professor, Associate Professor, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation, chem_misha@mail.ru