

УДК 678.743.22

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

К.В. Волкова<sup>a</sup>, И.В. Троценко<sup>a</sup>, М.В. Успенская<sup>a</sup>, В.К. Баля<sup>a</sup>, Е.В. Сивцов<sup>b</sup>, Е.В. Белухичев<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

Адрес для переписки: mv\_uspenskaya@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 30.07.17, принята к печати 31.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-834-840

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Волкова К.В., Троценко И.В., Успенская М.В., Баля В.К., Сивцов Е.В., Белухичев Е.В. Исследование влияния плазмохимической обработки на свойства полимерных пленок на основе поливинилхлорида // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 834–840. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-834-840

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследованы характеристики полимерных композитов на основе промышленно выпускаемого поливинилхлорида и биополимерного наполнителя – пектина в различных массовых соотношениях (1, 5 и 10 масс.%) с плазмохимической обработкой для применения в качестве деградируемого материала упаковки.

**Метод.** Наполненные композитные пленки получены методом вальцевания при температуре 165–170 °С с предварительным смешением всех компонентов композиции на лопастной мешалке со скоростью перемешивания 6000 об/мин в течение 4 минут. Образцы поливинилхлоридных пленок обработаны низкотемпературным плазмохимическим травлением в течение 5 и 10 мин в среде аргон:кислород. Пленки изучены методами инфракрасной Фурье-спектроскопии и оптической микроскопии в зависимости от содержания наполнителя и времени травления. **Основные результаты.** Экспериментально показано, что низкотемпературная плазмохимическая обработка приводит к деградации материала на основе поливинилхлорида и пектина. Максимальные структурные изменения наблюдаются для композиции с содержанием пектина 1 масс.%, что может быть объяснено в рамках теории малых добавок. **Практическая значимость.** Полученные полимерные композиты могут найти применение в качестве материала для упаковки, деградирующей при утилизации и обладающей меньшим сроком жизни изделия. Плазмохимическая обработка может представлять интерес в качестве метода обработки промышленно выпускаемых синтетических полимерных материалов перед их утилизацией.

### Ключевые слова

ПВХ, полимерная пленка, пектин, биodeградация, плазмохимическая обработка

## STUDY OF PLASMOCHEMICAL PROCESSING EFFECT ON THE PROPERTIES OF POLYMER FILMS BASED ON POLYVINYLCHLORIDE

K.V. Volkova<sup>a</sup>, I.V. Trotsenko<sup>a</sup>, M.V. Uspenskaya<sup>a</sup>, V.K. Balya<sup>a</sup>, E.V. Sivtsov<sup>b</sup>, E.V. Belukhichev<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

Corresponding author: mv\_uspenskaya@mail.ru

### Article info

Received 30.07.17, accepted 31.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-834-840

Article in Russian

**For citation:** Volkova K.V., Trotsenko I.V., Uspenskaya M.V., Balya V.K., Sivtsov E.V., Belukhichev E.V. Study of plasmochemical processing effect on the properties of polymer films based on polyvinylchloride. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 834–840 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-834-840

### Abstract

**Subject of Research.** The paper deals with characteristics study of polymer composites based on commercially available polyvinyl chloride and biopolymer filler pectin in various weight ratios (1.5 and 10 mass%) for the usage as biodegradable packaging. **Method.** Biopolymer composite films were obtained by rolling at the temperature of 165–170 °C and pre-mixing of all composition components with a paddle stirrer at a stirring speed of 6000 rpm for four minutes. The introduction of natural materials into the polymer matrix facilitates the decomposition of plastics during disposal, and the processing of

composite polymeric materials for five and ten minutes by low-temperature plasma in argon: oxygen modifies the surface of the material, ensuring access of microorganisms for biodegradation. Samples of composites were studied by the methods of infrared Fourier spectroscopy and optical microscopy, depending on the content of the filler and etching time of the samples. **Main Results.** The effect of plasma-chemical treatment on the surface of polymeric composites has been experimentally proved; an increase in roughness, craters and other discontinuities may be explained by structural changes confirmed by infrared spectra. It is shown that composites containing 1% by weight of pectin are subjected to the greatest degree of material oxidation. **Practical Relevance.** The resulting biopolymer composites can be used as a package that decomposes during disposal and does not harm the environment. The introduction of a biodegradable component, natural polysaccharide of pectin, in small amounts does not change the chemical structure of the polymer material. Plasma-chemical treatment can be used as a method for surface treatment of industrial polymer materials before disposal.

#### Keywords

PVC, polymer film, pectin, biodegradation, plasma-chemical processing

### Введение

Утилизация пластика в настоящее время – крайне важная задача во всем мире, поскольку пластиковые отходы, являясь продуктом жизнедеятельности человеческой цивилизации, оставляют значительный отпечаток на природе. Современное общество ежедневно создает сотни и тысячи тонн отходов, загрязняющих окружающую среду и способных привести к экологической катастрофе [1, 2]. Согласно современной статистике, более 50% отходов приходится на полимерные материалы, которые в основном состоят из полиэтилена, поливинилхлорида, полиэтилентерефталата [3, 4].

Поливинилхлорид (ПВХ) выпускается в России в виде винилпласта – твердого прозрачного материала, легко обрабатываемого и являющегося основой для производства оконного профиля, фитингов, труб, комплектующих для автомобилей, и пластиката – мягкого и эластичного материала, используемого для изготовления пленки, линолеума, поливочных шлангов, клеенки и т.п. Основной проблемой, связанной с использованием ПВХ, является сложность его утилизации, поскольку при полном его сгорании образуются простейшие соединения: вода, углекислый газ, хлороводород [5–7]. Однако при обычно неполном сгорании ПВХ чаще всего образуются угарный газ и токсичные хлорорганические соединения. В естественной же среде ПВХ разлагается более сотни лет, выделяя в окружающую среду продукты распада и являясь миной замедленного действия для будущих поколений [8, 9].

Исходя из этого, существующие в настоящее время различные способы утилизации пластика, в частности, ПВХ, такие как сжигание на свалках вместе с остальным мусором или захоронение в землю, не решают проблемы экологического загрязнения окружающей среды, а только этому способствуют [10, 11]. Одним из путей решения этого вопроса является создание полимерных композиционных материалов, способных к деградации или биодеградации, что значительно сократит время жизни полимерных изделий [12–14].

Под деградацией понимается изменение химической структуры полимера, приводящее к ухудшению как его физико-химических свойств, так и механических характеристик – изменению его массы, целостности полимерного материала и т.п. [15, 16].

### Материалы и методы

**Приготовление биополимерного композита.** Для получения биополимерного материала использовалась стандартная композиция поливинилхлорида, состоящая из суспензионного ПВХ с константой Фикентчера 57-58, массовой долей летучих веществ 0,04%, олоорганического термостабилизатора 0,2–1,5%, модификатора полимерной смеси 2,0–4,0% и внешней смазки на основе парафина 0,1–0,5%. В качестве биополимерного наполнителя использовался высокоэтерифицированный яблочный пектин содержанием 1, 5 и 10 масс.%. Введение биополимерного наполнителя выполнялось на лопастной мешалке в течение 4 минут при скорости перемешивания 6000 об/мин. Получение полимерной пленки проводилось на вальцевой машине, где полимерная композиция раскатывалась в течение 2 мин при температуре 165–170 °С.

**Плазмохимическое травление.** Реактивное ионно-плазменное травление низкотемпературной анизотропной плазмой проводилось в аппарате Nordson MARCH RIE-1701. Образцы пленок ПВХ с пектином травились в течение 5 и 10 мин при атмосферном давлении под воздействием низкотемпературной плазмы высокочастотного разряда. При проведении эксперимента использовалась аргон-кислородная смесь газов при соотношении 20% аргона, 80% кислорода. При плазмохимическом травлении поверхность подвергалась процессу холодного испарения со скоростью 2 микрометры в минуту.

**Исследование структуры методом ИК-спектроскопии.** Инфракрасные (ИК) спектры образцов полимерных композитов до и после деградации регистрировали на спектрометре Tensor 37, Bruker, Германия, с помощью приставки НПВО MIRacle™ Pike Technologies, оснащенной кристаллом ZnSe с алмазным напылением. Измерения проводились со спектральным разрешением  $2\text{ см}^{-1}$ , с усреднением по 32 сканированиям. Для записи и обработки спектров использовалась программа OPUS, версия 7.02 (Bruker). Изменения оптической плотности были оценены для характеристических полос диапазонов колебаний,

связанных с карбонильной (C=O), гидроксильной (OH) и C-Cl группами. Относительные изменения выбранных полос поглощения были рассчитаны с использованием в качестве стандартного пика деформационных колебаний группы-CH<sub>2</sub>- (около 1430 см<sup>-1</sup>).

**Оптическая микроскопия.** Микроскопическое исследование в представленной работе осуществлялось на оптическом микроскопе Olympus STM6. Исследование образцов проводилось при помощи методов светлого поля в отраженном свете и поляризованного контраста.

### Результаты и их обсуждение

В ходе проведенного исследования были получены полимерные композитные материалы на основе поливинилхлорида с биополимерным наполнителем – пектином с различным содержанием. На рис. 1 представлены микрофотографии пленок на основе ПВХ и пектина с содержанием наполнителя 1 масс.% на отражение и просвет.

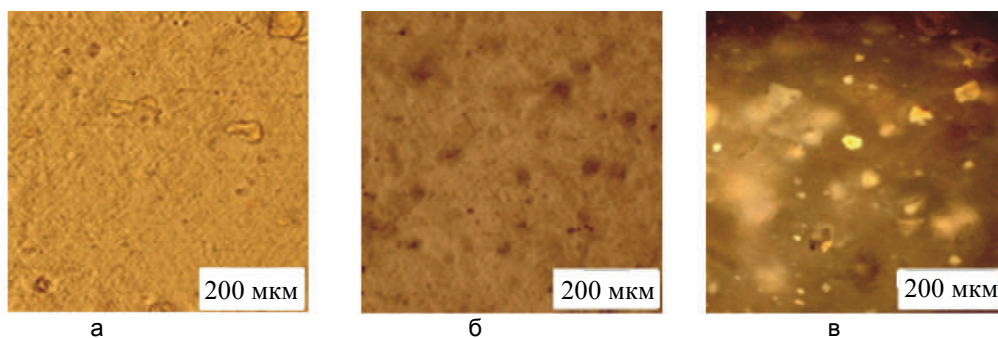


Рис. 1. Микрофотографии полимерной композиции на основе поливинилхлорида и пектина с массовой долей 1%: просвет (а); отражение (б); отражение с поляризатором (в)

Из рис. 1 видны неравномерное распределение частиц пектина в полимерной матрице поливинилхлорида и анизотропия оптических свойств, а также неровность поверхности полимерной пленки (рис. 1, б), что связано с технологией вальцевания [13, 14].

При получении полимерного композита ПВХ–пектин происходят физико-химические взаимодействия между функциональными группами макромолекулярных веществ, что подтверждается изменениями на ИК-спектрах, представленных на рис. 2.

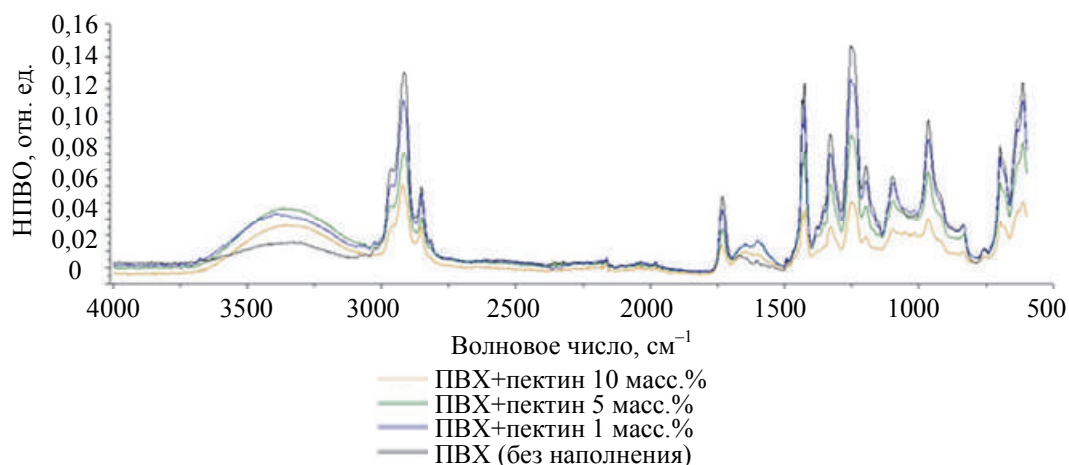


Рис. 2. Инфракрасный спектр поливинилхлорида и поливинилхлорида с содержанием пектина 1, 5 и 10%

Наибольший интерес (рис. 2) вызывают области 3700–3200 см<sup>-1</sup>, 3100–2700 см<sup>-1</sup>, 1800–500 см<sup>-1</sup> [13, 14]. В области 3100–3300 см<sup>-1</sup> с увеличением доли пектина наблюдается увеличение интенсивности пиков, связанных с наличием водородных связей. В области 3100–2700 см<sup>-1</sup> в целом наблюдается увеличение интенсивности характеристических пиков, связанных с функциональными группами пектина: 2966 см<sup>-1</sup>, 2914 см<sup>-1</sup>, 2850 см<sup>-1</sup>. Пик в области 2966 см<sup>-1</sup> соответствует асимметричному колебанию алифатических CH<sub>3</sub>, 2019 см<sup>-1</sup> – валентным колебаниям C-H, 2850 см<sup>-1</sup> – валентным симметричным колебаниям алифатических CH<sub>3</sub>.

Для модификации поверхности полимерных пленок и изучения возможности их деградации было проведено плазмохимическое травление. Результаты обработки поверхности полимерных пленок ПВХ–пектин с различным содержанием наполнителя до и после травления представлены на рис. 3 и 4.

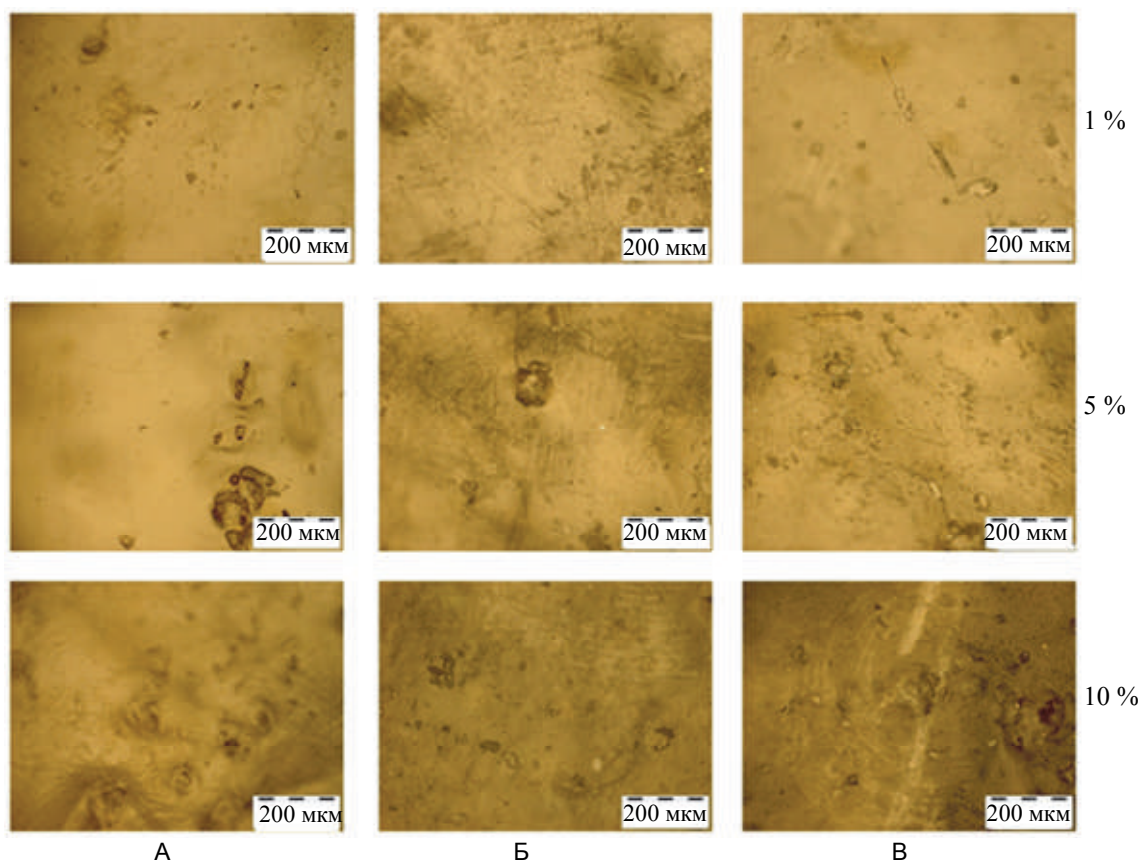


Рис. 3. Сравнительные фотографии образцов с различным содержанием пектина до травления и после травления различной длительности ( $\times 200$ ): столбец А – нетравленные образцы, столбец Б – образцы, травленные 5 мин, столбец В – образцы, травленные 10 мин

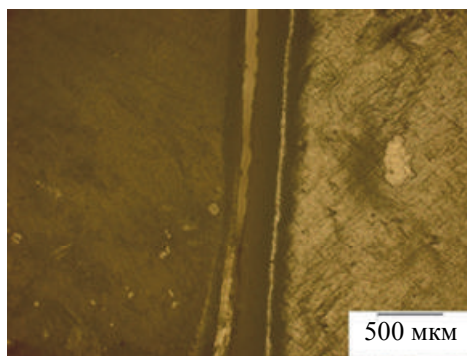


Рис. 4. Сравнение образцов после и до травления в течение 10 мин с содержанием пектина 10%

Можно отметить, что плазмохимическое травление полимерных композитов на основе ПВХ и пектина вызывает изменения на поверхности образцов: увеличение шероховатости, кратеры и другие несплошности, что возможно объясняется структурными изменениями образцов – их деградацией. Следует также заметить, что увеличение содержания пектина приводит к повышению внешних изменений.

На приведенных ниже рисунках (рис. 5–7) представлены ИК-спектры полимерных композиционных пленок ПВХ с различным процентным содержанием пектина и вариативным временем травления – 5 и 10 минут.

Как можно видеть из рис. 5, для полимерных образцов с содержанием пектина 1 масс.% наблюдается значительное увеличение интенсивности пиков  $3362$ ,  $2914$  и  $1098\text{ см}^{-1}$ , соответствующих колебанию  $\text{—OH}$  групп, при этом интенсивность пика  $1731\text{ см}^{-1}$ , соответствующая характеристическим колебаниям карбонильной группы, увеличивается не существенно. Значительное увеличение интенсивности пика  $636\text{ см}^{-1}$ , соответствующее деформационным колебаниям  $\text{C—Cl}$ , наблюдается после травления полимерных образцов в течение 10 мин. Аналогичные изменения наблюдаются в спектрах ПВХ, содержащих 5 и 10 масс.% наполнителя, однако интенсивность пиков, характеризующих валентные колебания  $\text{—OH}$  групп, не столь значительна по сравнению с интенсивностью полосы поглощения, наблюдаемой для полимер-

ной композиции, содержащей 1 масс.% пектина. Следует также отметить, что в спектрах образцов ПВХ–пектин (рис. 6, 7) более отчетливо проявляются «пектиновые» пики ( $1653\text{ см}^{-1}$ ,  $919\text{ см}^{-1}$ ) и увеличивается интенсивность полосы поглощения  $1731\text{ см}^{-1}$ , соответствующая валентным колебания  $\text{C}=\text{O}$ .

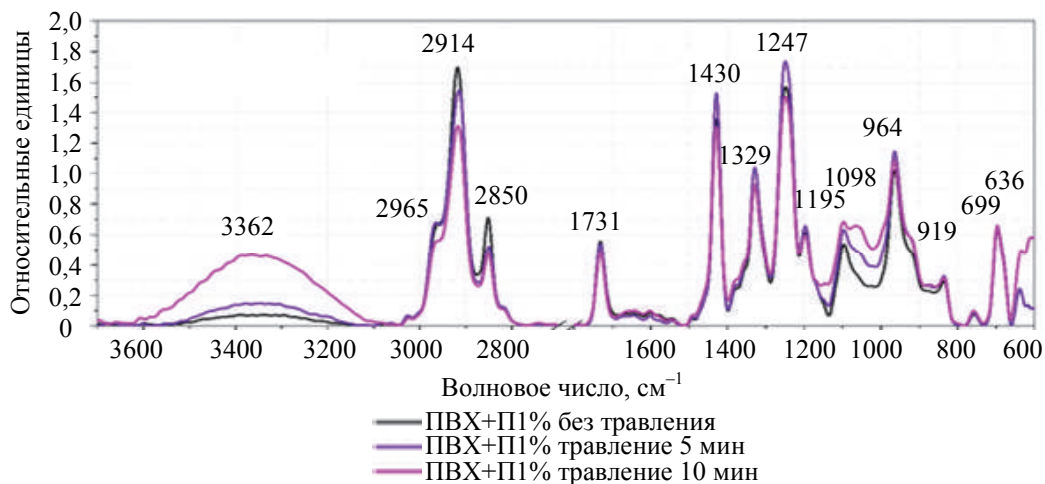


Рис. 5. Спектры полимерных композиционных пленок на основе поливинилхлорида и пектина с массовой долей 1% и различным временем травления

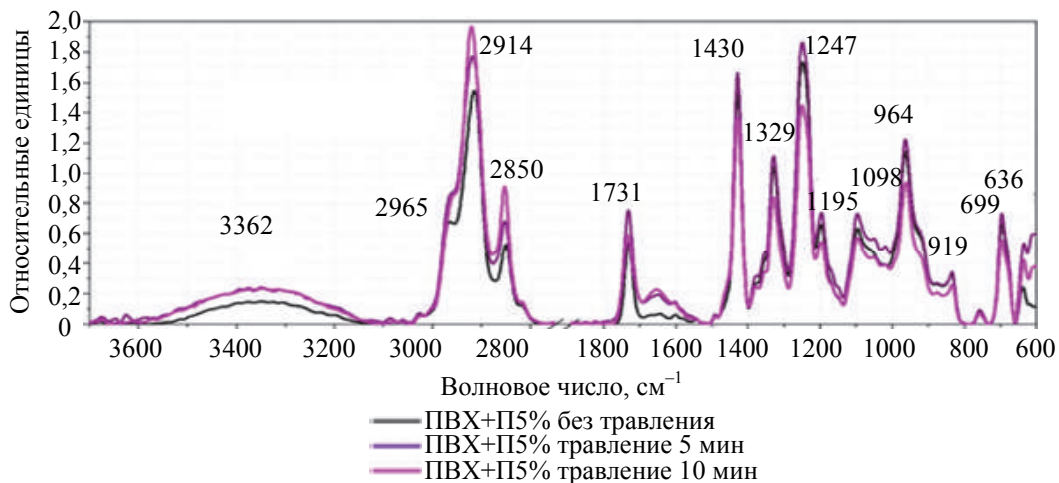


Рис. 6. Спектры полимерных пленок на основе поливинилхлорида и пектина с массовой долей 5% и различным временем травления

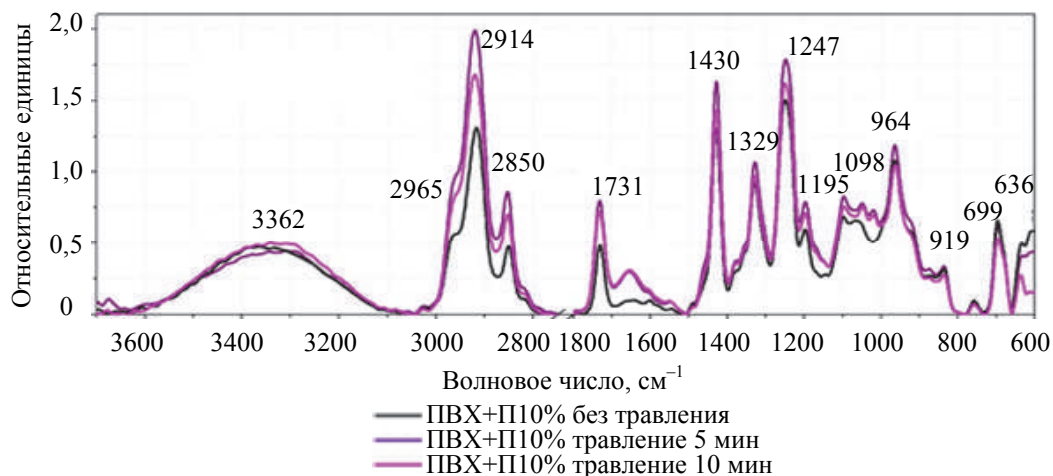


Рис. 7. Спектры полимерных композиционных пленок на основе поливинилхлорида и пектина с массовой долей 10% и различным временем травления

Таким образом, при малом наполнении композиции ПВХ 1 масс.% пектином наблюдается значительная деградация материала, что позволяет сделать предположение о дальнейшей возможности использования метода плазмохимической обработки для утилизации полимерных материалов.

### Заключение

В ходе работы были изучены полимерные композиционные материалы на основе поливинилхлорида и пектина с массовым содержанием наполнителя 1, 5 и 10 масс.% с различным временем плазмохимического травления. Изучение инфракрасных спектров полимерных образцов до и после их обработки показало, что для полимерных композитов, содержащих 1 масс.% пектина наблюдается более значительная деградация поверхности пленок, обусловленная процессом окисления, что может быть объяснено теорией малых добавок. Представленные результаты свидетельствуют о возможном применении плазмохимической обработки для утилизации композитов на основе поливинилхлорида.

### Литература

### References

1. Focke W.W., Muiambo H., Mhike W., Kruger H.J., Ofosu O. Flexible PVC flame retarded with expandable graphite // *Polymer Degradation and Stability*. 2014. V. 100. N 1. P. 63–69. doi: 10.1016/j.polydegradstab.2013.12.024
2. Готлиб Е.М., Нгуен А., Милославский Д.Г., Садыкова Д.Ф. Экологические аспекты использования производных растительных масел в полимерной химии // *Вестник Казанского технологического университета*. 2017. Т. 20. № 4. С. 17–20.
3. Симонов-Емельянов И.Д., Марков А.В., Прокопов Н.И., Аншин В.С., Петров О.О., Мунькин Н.И. Влияние саморазогрева при переработке на термостабильность и светостойкость окрашенных жестких и пластифицированных ПВХ композиций // *Пластические массы*. 2013. № 2. С. 51–54.
4. Yu J., Sun L., Ma C., Qiao Y., Yao H. Thermal degradation of PVC: a review // *Waste Management*. 2016. V. 48. P. 300–314. doi: 10.1016/j.wasman.2015.11.041
5. Antsiperov V.E., Bugaev A.S., Zabrosov I.V. A new PVC/SPB detection method: based on analytical spectra technique // *Proc. 2016 Int. Conf. on Bioinformatics and Systems Biology*. Allahabad, India, 2016. doi: 10.1109/BSB.2016.7552150
6. Лавров Н.А., Колерт К., Ксенофонтов В.Г., Лаврова Т.В., Белухичев Е.В. О механизме деструкции поливинилхлорида // *Известия СПбГТИ(ТУ)*. 2012. № 16 (42). С. 31–35.
7. Субботин Е.В., Щербинин А.Г., Ершов С.В. Термический анализ ПВХ-пластиков // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013. № 5. С. 59–62.
8. Седых В.А., Жучков А.В. Технические свойства упаковочных пленок на основе ПВХ // *Вестник ВГУИТ*. 2013. № 2 (56). С. 141–146.
9. Еренков О.Ю., Петрова С.И., Богачев А.П., Чиркун В.Н. Инновационный способ переработки отходов ПВХ // *Ученые заметки ТОГУ*. 2016. Т. 7. № 4. С. 442–444.
10. Pulngern T., Chitsamran T., Chucheepsakul S., Rosarpitak V., Patcharaphun S., Sombatsompop N. Effect of temperature on mechanical properties and creep responses for wood/PVC composites // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 111. P. 191–198. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.051
11. Denisjuk I.Yu., Pozdnyakova S.A., Koryakina I.G., Uspenskaya M.V., Volkova K.V. Polymer photodegradation initiated by ZnO nanoparticles // *Optics and Spectroscopy*. 2016. V. 121. N 5. P. 778–781. doi: 10.1134/s0030400x16110096
12. Aminova G.F., Gabitov A.I., Maskova A.R., Yagafarova G.G., Rolnik L.Z., Klyavlin M.S. New composite PVC-material for finishing purposes, plasticized by butoxyalkylphenoxyalkyl phthalates // *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*. 2013. № 5. P. 353–362.
13. Садиева Н.Ф., Алиева А.З., Зейналов Э.Б., Искендерова С.А., Нуриев Л.Г., Агаев Б.К. Новые композиционные материалы на основе поливинилхлорида // *Пластические массы*. 2014. № 9-10. С. 13–15.
14. Ebnalwaled A.A., Thabet A. Controlling the optical constants of pvc nanocomposite films for optoelectronic applications // *Synthetic Metals*. 2016. V. 220. P. 374–383. doi: 10.1016/j.synthmet.2016.07.006
15. Grigoryeva O., Fainleib A., Stepanenko L., Sergeeva L., Pissis P. Recycling of pvc/pu waste and reuse in pvc formulations: structure-property relationship // *Polymer Engineering and Science*. 2005. V. 45. N 6. P. 801–808. doi: 10.1002/pen.20343
1. Focke W.W., Muiambo H., Mhike W., Kruger H.J., Ofosu O. Flexible PVC flame retarded with expandable graphite. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, vol. 100, no. 1, pp. 63–69. doi: 10.1016/j.polydegradstab.2013.12.024
2. Gotlib E.M., Nguyen A., Miloslavskiy D.G., Sadykova D.F. Ecological aspects of using derivatives of vegetable oils in polymer chemistry. *Vestnik KSTU*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 17–20. (In Russian)
3. Simonov-Emelianov I.D., Markov A.V., Prokopov N.I., Anshin V.S., Petrov O.O., Munkin N.I. Effect of self-heating during processing on the thermal and light stability of DYED rigid and plasticized PVC. *Plasticheskie Massy*, 2013, no. 2, pp. 51–54. (In Russian)
4. Yu J., Sun L., Ma C., Qiao Y., Yao H. Thermal degradation of PVC: a review. *Waste Management*, 2016, vol. 48, pp. 300–314. doi: 10.1016/j.wasman.2015.11.041
5. Antsiperov V.E., Bugaev A.S., Zabrosov I.V. A new PVC/SPB detection method: based on analytical spectra technique. *Proc. 2016 Int. Conf. on Bioinformatics and Systems Biology*. Allahabad, India, 2016. doi: 10.1109/BSB.2016.7552150
6. Lavrov N.A., Kolert K., Ksenofontov V.G., Lavrova T.V., Belukhichev E.V. On destruction mechanism of polyvinyl chloride. *Izvestiya SPbGTI(TU)*, 2012, no. 16, pp. 31–35. (In Russian)
7. Subbotin E.V., Shcherbinin A.G., Ershov S.V. Thermal analysis of PVC plastic compound. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2013, no. 5, pp. 59–62. (In Russian)
8. Sedyh V.A., Zhuchkov A.V. Technical properties of packaging PVC films. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2013, no. 2, pp. 141–146. (In Russian)
9. Erenkov O.Yu., Petrova S.I., Bogachev A.P., Cirkon V.N. An innovative way of recycling PVC. *Uchenye Zametki TOGU*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 442–444. (In Russian)
10. Pulngern T., Chitsamran T., Chucheepsakul S., Rosarpitak V., Patcharaphun S., Sombatsompop N. Effect of temperature on mechanical properties and creep responses for wood/PVC composites. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 111, pp. 191–198. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.051
11. Denisjuk I.Yu., 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
12. Aminova G.F., Gabitov A.I., Maskova A.R., Yagafarova G.G., Rolnik L.Z., Klyavlin M.S. New composite PVC-material for finishing purposes, plasticized by butoxyalkylphenoxyalkyl phthalates. *Oil and Gas Business*, 2013, no. 5, pp. 353–362.
13. Sadiyeva N.F., Aliyeva A.Z., Zeynalov E.B., Iskenderova S.A., Nuriyev L.H., Agayev B.K. New composite materials based on PVC. *Plasticheskie Massy*, 2014, no. 9-10, pp. 13–15. (In Russian)
14. Ebnalwaled A.A., Thabet A. Controlling the optical constants of pvc nanocomposite films for optoelectronic applications. *Synthetic Metals*, 2016, vol. 220, pp. 374–383. doi: 10.1016/j.synthmet.2016.07.006
15. Grigoryeva O., Fainleib A., Stepanenko L., Sergeeva L., Pissis P.

16. Жазаева Е.М., Тхакахов Р.Б., Ошхунув М.М. Прочность и работа разрушения термообработанных смесей полимеров на основе ПВХ и СКН // Пластические массы. 2013. № 9. С. 54–57.

P. Recycling of pvc/pu waste and reuse in pvc formulations: structure-property relationship. *Polymer Engineering and Science*, 2005, vol. 45, no. 6, pp. 801–808. doi: 10.1002/pen.20343

16. Zhazaeva E.M., Tkhakakhov R.B., Oshkhunov M.M. Strength and destruction of heat-treated mixtures of polymers based on PVC and SKN. *Plasticheskie Massy*, 2013, no. 9, pp. 54–57. (In Russian)

### Авторы

**Волкова Ксения Васильевна** – ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Volkova.kseniia@yandex.ru

**Троценко Ирина Владимировна** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Iv\_trotsenko@mail.ru

**Успенская Майя Валерьевна** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mv\_uspenskaya@mail.ru

**Баля Вера Константиновна** – кандидат физико-математических наук, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vera\_balya@mail.ru

**Сивцов Евгений Викторович** – доктор химических наук, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация, chem@lti-gti.ru

**Белухичев Евгений Валентинович** – аспирант, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация, e.belukhichev@kpfilms.com

### Authors

**Kseniya V. Volkova** – assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Volkova.kseniia@yandex.ru

**Irina V. Trotsenko** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Iv\_trotsenko@mail.ru

**Maya V. Uspenskaya** – D.Sc., Professor, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mv\_uspenskaya@mail.ru

**Vera K. Balya** – PhD, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vera\_balya@mail.ru

**Evgeny V. Sivtsov** – D.Sc., Head of Chair, Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation, chem@lti-gti.ru

**Evgeny V. Belukhichev** – postgraduate, Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation, e.belukhichev@kpfilms.com