

немного большей скоростью, чем к НР. При этом значения констант скоростей полученные для НР могут быть использованы в качестве оценки зна-

чений констант скоростей 1,3-диполярного циклоприсоединения мономеров к алкоксиамину.

Данная работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-73-00350.

### Список литературы

1. Audran G. et al. // *Inorg. Chem. Front.*, 2016. – Vol. 3. – №11. – P. 1464–1472.
2. Audran G. et al. // *ChemistrySelect.*, 2017. – Vol. 2. – №12. – P. 3584–3593.
3. Audran G. et al. // *Inorg. Chem. Commun.*, 2018. – Vol. 91. – P. 5–7.
4. Edeleva M.V. et al. // *JOC*, 2011. – Vol. 76. – №14. – P. 5558–5573.
5. Edeleva M. et al. // *Chem. Commun.*, 2019. – Vol. 55. – №2. – P. 190–193.

## ПОЛУЧЕНИЕ ЛАКТИДА ИЗ НЕКОНДИЦИОННОГО ПЛА-ФИЛАМЕНТА

В.В. Кревсун, А.А. Носкова, Л.Е. Шлапакова  
Научный руководитель – к.х.н., доцент Т.Н. Волгина

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, vkrevsun@gmail.com

В последнее время в связи с глобальной проблемой накопления пластиковых отходов возрос интерес к биоразлагаемым полимерам, к числу которых относится линейный алифатический полиэфир молочной кислоты – полилактид (ПЛА). Благодаря термопластичности, относительно низкой температуре плавления (170–180 °С), экологичности и нетоксичности данный полимер применяется в качестве расходного материала 3D-печати методом послойного наплавления [1], в основном для изготовления прототипов изделий. Процесс сопровождается образованием отходов, к числу которых можно отнести некондиционный ПЛА-филамент, бракованные или далее не используемые прототипы изделий. Данные отходы могут быть утилизированы методами сжигания, компостирования, однако наиболее целесообразна с экономической и экологической точек зрения их химическая переработка, в частности, термокаталитическая деполимеризация до лактида – циклического димера молочной кислоты, который после очистки может быть вновь использован для получения полимеров и сополимеров на его основе. Такой подход позволит частично компенсировать затраты первичных сырьевых ресурсов.

Целью работы являлась оценка возможности переработки отходов 3D-печати на основе ПЛА методом термокаталитической деструкции с получением лактида. В качестве исследуемых

объектов были выбраны ПЛА-филамент различной окраски и изделия, полученные из него с помощью 3D-ручки при температуре 160–210 °С.

Процесс деполимеризации проводили на лабораторной установке для вакуумной перегонки при давлении 5–15 мбар и температуре 170–210 °С. В качестве катализатора использовали ZnO в количестве 1 % от массы загруженного сырья. Полученный продукт подвергали перекристаллизации из этилацетата с целью очистки от примесей. Степень чистоты лактида оценивали по температуре плавления и содержанию свободной молочной кислоты, определенному методом титрования. Перекристаллизованный продукт идентифицировали по ИК-спектру. В таблице 1 представлены полученные экспериментальные данные: выход лактида-сырца ( $\beta_{л-с}$ ), выход ( $\beta_{л}$ ) и температура плавления ( $T_{пл}$ ) перекристаллизованного лактида, содержание молочной кислоты ( $\omega_{МК}$ ) в чистом лактиде.

Во всех случаях в результате термокаталитической деструкции полимера удалось получить лактид, при этом выход лактида-сырца в случае разложения изделий, изготовленных с помощью 3D-ручки, оказался ниже (от 33 до 72 %), чем при разложении исходного ПЛА-филамента (от 65 до 92 %). Для выхода перекристаллизованного лактида наблюдалась аналогичная закономерность.

Образцы лактида, образовавшегося при деструкции изделий, полученных методом 3D-печати, характеризовались более высоким содержанием молочной кислоты, которая препятствует образованию высокомолекулярного полимера при дальнейшей полимеризации лактида, способствуя гидролизу образующихся эфирных связей.

Температура плавления данных образцов оказалась ниже по сравнению с лактидом, полученным из ПЛА-филамента, что говорит о более высоком содержании в них мезо-лактида ( $T_{\text{пл (мезо-лактида)}} = 53\text{--}54^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{пл (L-лактида, D-лактида)}} = 96\text{--}97^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{пл (рацемата)}} = 125\text{--}127^\circ\text{C}$ ), также ухудшающего в

дальнейшем характеристики полимера [2]. Загрязнение мономера пигментами, входящими в состав сырья, не наблюдалось.

Таким образом, проведенные исследования показали, что из отходов 3D-печати на основе полилактида, независимо от типа входящего в них пигмента, методом термодинамической деполимеризации может быть получен лактид. Было установлено, что дополнительное термическое воздействие на ПЛА-филамент при 3D-печати приводит к снижению выхода лактида и увеличению содержания в нем примесей.

**Таблица 1.** Качественные и количественные характеристики лактида

Сырье		$\beta_{\text{л-с}}$ , % масс.	$\beta_{\text{д}}$ , % масс.	$T_{\text{пл}}$ , °C	$\omega_{\text{мк}}$ , % масс.
ПЛА-филамент	черный	65,5	13,2	91–95	9,6
	серый	83,2	41,3	83–96	4,6
	зеленый	92,1	82,3	102–105	4,1
ПЛА после печати	черный	33,2	8,4	87–91	15,0
	серый	72,0	41,8	78–81	5,4
	зеленый	36,4	8,5	95–96	13,6

### Список литературы

1. Паневчик В.В., Самойлов М.В., Некраха С.В. // Вестник Белорусского государственного экономического университета, 2019. – №3 (134). – С. 87–93.
2. Azapagic A., Perdan S. *Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. – P. 272.

## ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СОПОЛИМЕРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРИФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОНОМЕРА

М.С. Кузнецов, А.А. Редикульцев

Научные руководители – к.х.н., доцент Л.С. Сорока; к.х.н., доцент А.А. Ляпков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, msk35@tpu.ru

Сополимеры – полимеры, макромолекулы которых содержат мономерные звенья разных типов. В зависимости от структуры используемых мономеров и расположения мономерных звеньев можно получать сополимеры с различными физико-механическими свойствами. Следовательно, в зависимости от соотношения используемых мономеров, можно получать ряд сополимеров с различными физико-механическими свойствами.

Целью данной работы является проведение реакции сополимеризации 5-нонборнен-2,3-дикарбосимида-N-этилацетата с трис-экзо,экзо-N,N'-этилен-три (нонборнен-5,6-дикарбосимидом) в растворе и определение, изучение структуры и свойств полученных сополимеров.

На первом этапе работы необходимо было почистить мономер. Был проведён подбор растворителя, для проведения очистки методом перекристаллизации. Растворитель нагревали до кипения и порционно добавляли к 5-нор-