

пературе скорость окислительного разложения анионита заметно не изменяется.

Взаимодействие шарообразных гранул анионита АВ-17×8 с водным раствором пероксида водорода в присутствии катализатора относится к гетерогенной реакции. Исходя из этого скорость окисления определяли, принимая во внимание площадь поверхности смолы, меняющуюся с течением времени. В ходе повышения температуры процесса отмечен закономерный рост константы скорости реакции примерно в 12–15 раз. Определены значения энергии активации реакции каталитического окисления анионита, которые находятся в диапазоне 115,5–124,3 кДж/моль, что свойственно для процессов, протекающих в кинетической области.

Таким образом, анионообменная смола АВ-17×8 способна эффективно окисляться пероксидом водорода с добавлением сульфата меди (II) при относительно низких температурах в течение 33–350 минут. Исходя из этого использование процесса Фентона будет перспективной

технологией, так как, прежде всего, позволит уменьшить экономические затраты на переработку ионообменных смол предприятий атомной энергетики.

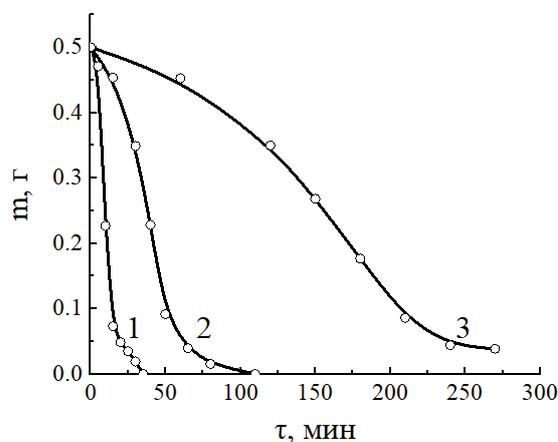


Рис. 1. Кинетические кривые убыли массы анионита АВ-17×8 в 20 об. % водном растворе пероксида водорода с добавлением 0,003 моль/л  $\text{CuSO}_4$  при температуре, К: 343 (1), 333 (2), 323 (3)

### Список литературы

1. Смольников М.И., Марков В.Ф., Маскаева Л.Н., Бобылев А.Е., Мокроусова О.А. // Бутлеровские сообщения, 2017. – Т. 49. – №3. – С. 119–134.
2. Babuponnusami A., Muthukumar K. // Journal of Environmental Chemical Engineering, 2014. – V. 2. – P. 557–572.

## ДЕСТРУКТИВНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ 3D-ПЕЧАТИ

В.В. Кревсун

Научный руководитель – к.х.н., доцент Т.Н. Волгина

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

Производство изделий методом 3D-печати относится к аддитивным технологиям. Одной из широко используемых разновидностей экструзионной 3D-печати является моделирование методом послойного наплавления (FDM, Fused Deposition Modeling) [1], в котором в качестве расходного материала для изделий с коротким сроком эксплуатации находят применение наиболее распространенный биоразлагаемый термопластик – полилактид.

Полилактид (ПЛА) является линейным полиэфиром молочной кислоты, образующимся при полимеризации ее циклического димера – лактида. В технологии 3D-печати применяется для быстрого прототипирования, а также для производства ряда готовых изделий, к примеру,

изделий медицинского назначения (имплантатов и др.) [2]. При этом образуются отходы 3D-печати на основе ПЛА: бракованные изделия, использованные прототипы, остатки расходного материала. К возможным способам их утилизации относятся компостирование, сжигание и вторичная переработка на основе физико-химических процессов. Среди последних, термохимическая переработка наиболее перспективна, она предполагает рациональное использование полимерных отходов, целесообразна с точки зрения экологии и потенциального снижения себестоимости полимера за счет экономии первичного растительного сырья.

Цель настоящей работы заключалась в оценке возможности получения лактида из отходов

3D-печати на основе ПЛА. В качестве объектов исследования были выбраны ПЛА-филамент серебристого цвета (диаметр 1,75 мм) и изделие на его основе, изготовленное с помощью 3D-ручки (температура нагрева полимера 160–210 °С).

Термокаталитическая деструкция полимерных отходов проводилась в присутствии ZnO в качестве катализатора (1% от массы ПЛА) на лабораторной установке для вакуумной перегонки при температуре 170–205 °С и давлении 10 мбар в течение 25–35 мин. Очистка продукта от примесей (молочная кислота и ее олигомеры, мезо-лактид) осуществлялась методом перекристаллизации лактида из этилацетата, оценка чистоты мономера – посредством измерения его температуры плавления ( $T_{пл}$ ) и определения содержания в нем свободной молочной кислоты ( $\omega_{МК}$ ) методом прямого титрования. Для идентификации продукта использовался метод ИК-спектроскопии. Полученные экспериментальные данные приведены в таблице 1.

При термокаталитической деструкции ПЛА-филамента среднее значение выхода лактида-сырца оказалось выше, чем при деполимеризации изделия, полученного методом 3D-печати (83,2 и 72,0% соответственно). Выход перекристаллизованного лактида в расчете на исходное сырье в обоих случаях достиг 41%. Температура плавления перекристаллизованного лактида

в случае деструкции ПЛА-филамента оказалась ближе к справочной (по литературным данным, температура плавления L-/D-лактида составляет 96–97 °С), чем при деструкции изделия на его основе, что свидетельствует о меньшем содержании примесей, в том числе мезо-лактида. Аналогичный вывод можно сделать по результатам определения свободной молочной кислоты в образцах лактида. Согласно измеренным значениям температуры плавления, перекристаллизация способствует очистке мономера. Проведение очистки необходимо, поскольку примеси мезо-лактида снижают оптическую чистоту синтезируемого из лактида полимера, присутствие молочной кислоты вызывает снижение его молекулярной массы [3].

Результаты исследования показали, что отходы полилактида, образующиеся при 3D-печати, могут быть переработаны методом термокаталитической деструкции в присутствии оксида цинка с получением мономера с выходом, превышающим 41%. Было выявлено, что дополнительный цикл термической обработки ПЛА при 3D-печати привел к снижению выхода и ухудшению качества полученного из него лактида. Проведение перекристаллизации из этилацетата позволило снизить содержание примесей в мономере.

**Таблица 1.** Выход ( $\beta$ ) и характеристики лактида

Сырье	$\beta$ , % масс.		$T_{пл}$ , °С		$\omega_{МК}$ , % масс.
	сырец	перекр.	сырец	перекр.	перекр.
ПЛА-филамент	83,2	41,3	77–80	83–96	4,6
Изделие из ПЛА	72,0	41,8	75–78	78–81	5,4

### Список литературы

1. Паневчик В.В., Самойлов М.В., Некраха С.В. // *Вестник Белорусского государственного экономического университета*, 2019. – №3 (134). – С. 87–93.
2. Коваленко Р.В. // *Вестник Технологического университета*, 2015. – Т. 18. – №1. – С. 263–266.
3. Коноплев И.А., Козловский Р.А., Швец В.Ф., Кузнецов А.Е., Белодед А.В., Каграманов Г.Г., Сафронов В.А., Яртым А.И. // *Журнал прикладной химии*, 2017. – Т. 90. – №3. – С. 355–362.