

**УДК 621.316**

ПОЛЕВОЙ Р.Е., студент гр. МТ-016 (ЮЗГУ)  
ЗАДУБРОВСКАЯ Т.А., студент гр. ХТ-016 (ЮЗГУ)  
Научный руководитель КУВАРДИН Н.В., к.х.н., доцент (ЮЗГУ),  
г. Курск

## **СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ МАЛЫХ МОЛЕКУЛ, ПОЛУЧЕННЫЕ ФАЗОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ**

Первый пластик был изобретен в 1930-х годах. В то время человечеству был особенно необходим дешевый материал, обладающий определенными свойствами, который можно массово производить и неоднократно использовать. Такой полимерный материал получили из отходов и продуктов нефтепромышленности, что в результате стало прорывом в сфере потребительских товаров. Однако уже спустя несколько лет появилась серьезная проблема, которая существует и до сих пор. Она заключается в том, что пластмассы практически не разлагаются, и к тому же не все полимерные материалы подлежат вторичной обработке. В настоящее время этот материал содержится почти в любой продукции и накапливается на свалках с невероятной скоростью [1]. Исключить этот материал из производства не представляется возможным, так как пластик обладает уникальными свойствами и является одним из наиболее широко используемых полимерных материалов почти во всех сферах промышленности. Кроме того, если убрать из использования пластмассы и заменить их на натуральные материалы, это приведет к очень скорому истощению природных ресурсов всего мира.

В то же время перерабатывать пластик сложно и затратно, — и поэтому компаниям проще производить новый пластик. Сложность переработки пластика связана с повышенной стабильностью ковалентных связей, которые придают этому материалу высокие прочностные свойства. В связи с последним ученые пытаются создать новое поколение пластмасс с так называемыми супрамолекулярными полимерами, которые обладают нековалентными связями; подобная особенность должна улучшить разрушаемость таких полимеров [2].

С другой стороны, следует отметить, что вышеназванные изменения влияют также на механические свойства полимера, что создает сложности в его разработке. Финские исследователи занялись этим вопросом и на данный момент предложили решение с использованием метода жидкостно-жидкостного фазового разделения (LLPS), которое может способствовать формированию прочных, стабильных и устойчивых пластиков с использованием небольших молекул [3].

Разделение фаз жидкость-жидкость (LLPS) представляет собой процесс, при котором плотная фаза образуется из разбавленной фазы при термодинамическом равновесии [4]. Плотная фаза образуется в результате появления межмолекулярных нековалентных взаимодействий, которые

приводят к формированию в растворе стабильных перегородок (компарментов), изолирующих и концентрирующих растворенные вещества. В отличие от процесса образования супрамолекулярных материалов (таких как мицеллы, везикулы и волокна), метод LLPS способствует образованию более крупных сферолитов — каплей микрометрового размера в растворе, которые могут превращаться даже в макроскопические материалы, состоящие из растворенных веществ с высокой плотностью концентрации [5].

Материал на основе малых молекул называется материалом с разделенной фазой макроцикла и поверхностно-активного вещества (MSPS) (см. рис. 1).

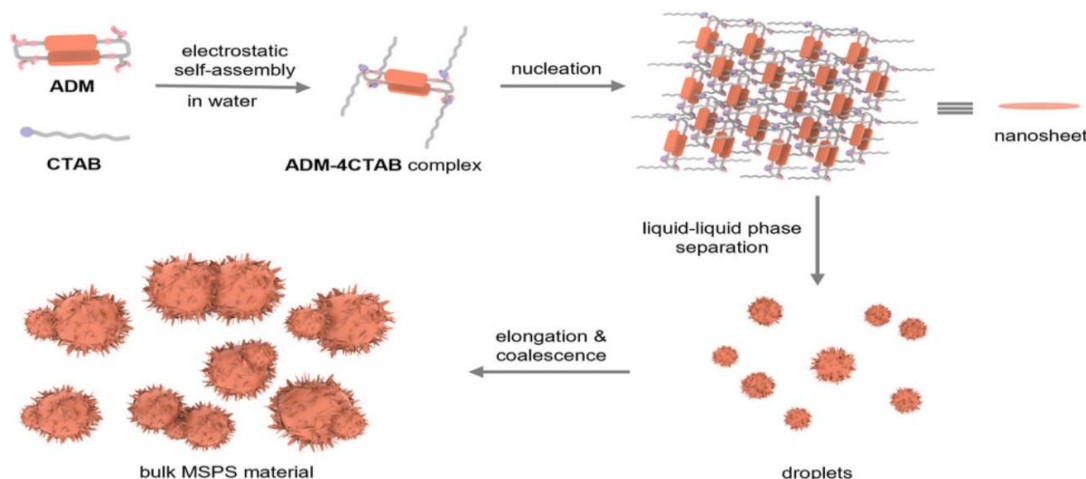


Рисунок 1. Молекулярный механизм образования материалов MSPS, которые самособирались макроциклами АБМ и поверхностно-активными веществами СТАВ в воде

Для проведения анализа финские исследователи использовали азобензола макроцикл (АБМ), связанный дисульфидными связями, а также катионное поверхностно-активное вещество бромид цетилтриметиламмония (ЦТАБ). Структуры веществ представлены на рисунке 2.

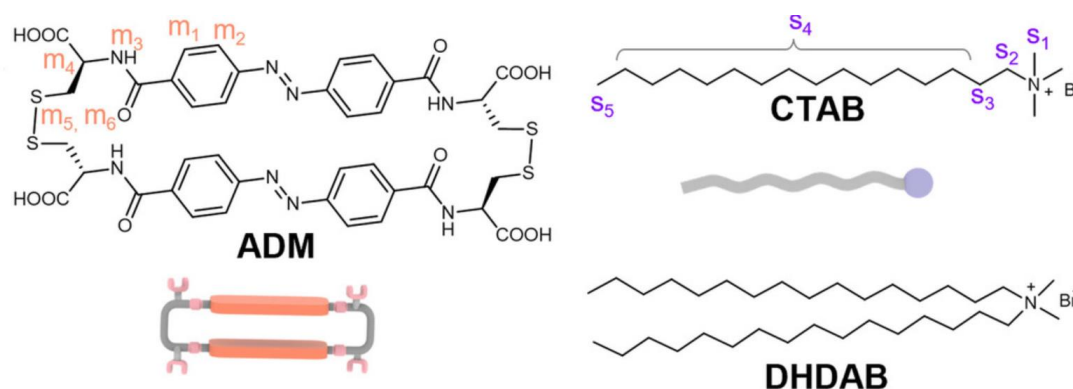


Рисунок 2. Структуры АБМ и ЦТАБ

С веществом АБМ приготовили группу растворов, имеющих одинаковую концентрацию и рН 10, а с ЦТАБ — в различных концентрациях. Смешивали эти растворы АБМ (х mM) и ЦТАБ в мольном соотношении 1 : n (раствор АБМ (х mM)/ ЦТАБ /1 : n).

Раствор АБМ (10 mM)/ ЦТАБ /1:4 в начале приготовления был однородно мутным [6]. На ранней стадии смешивания постепенно появлялись маленькие круглые капли диаметром примерно 1 мкм, затем диаметр капель увеличился примерно до 20 мкм (см. рис. 3).

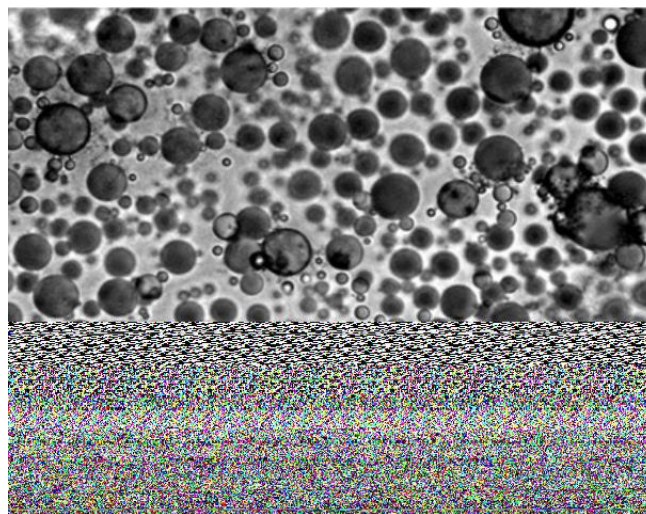


Рисунок 3. Разделение фаз жидкость-жидкость АБМ (10 mM)/ ЦТАБ /1:4

Через три часа произошло полное фазовое разделение; из водного раствора был получен прозрачный и липкий мягкий материал в виде отдельной фазы. Также проводился анализ других растворов, но MSPS наблюдались только в растворе АБМ (10 mM)/ ЦТАБ /1:3, хотя их фазовое разделение было не столь явным [7].

Изучение свойств материала MSPS было тесно связано с содержанием воды. Материал, насыщенный водой, был похож на жидкость и мог мгновенно самовосстанавливаться даже под водой, а также продемонстрировал лучшую в своем классе водонепроницаемую адгезию с точки зрения материалов, изготовленных из малых молекул [8]. При восстановлении молекул воды материал MSPS (золь) перешел в гелеобразное состояние с механическими свойствами, сравнимыми со свойствами ковалентных полимеров. Кроме того, фотообратимость и термообратимость вкупе с одновременной стабильностью обеспечили материалу превосходную технологичность и удобство использования. Наконец, чувствительные к окислительно-восстановительному потенциалу дисульфидные связи в макроцикле сделали материалы разлагаемыми и пригодными для повторного использования.

Такие результаты показывают, что LLPS представляет собой эффективную и мощную стратегию создания прочных объемных супрамолекулярных материалов с адгезивными свойствами без ухудшения свойств материала. Кроме того, исследование предлагает подход к изучению экологически чистых материалов, которые потенциально могут заменить обычные ковалентные полимеры.

### Список литературы:

1. Кувардин, Н. В. Проблемы утилизации современных полимерных отходов / Н. В. Кувардин, С. А. Антонова // Будущее науки - 2019 : сборник научных статей 7-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 25–26 апреля 2019 года. Том 5. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 185-187.
2. Задубровская, Т. А. Переработка полиэтилена в мягких условиях / Т. А. Задубровская, Р. Е. Полевой // ПРОБЛЕМЫ и ПЕРСПЕКТИВЫ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСФЕРА ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Самара, 14 августа 2022 года. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2022. – С. 143-146.
3. Задубровская, Т. А. Переработка жидких отходов производства капролактама / Т. А. Задубровская, Р. Е. Полевой // ПРОБЛЕМЫ и ПЕРСПЕКТИВЫ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСФЕРА ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Самара, 14 августа 2022 года. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2022. – С. 146-149.
4. Антонова, С. А. Способы утилизации современных полимерных отходов / С. А. Антонова, Н. В. Кувардин // Будущее науки - 2019 : сборник научных статей 7-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 25–26 апреля 2019 года. Том 5. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 151-152.
5. Патент № 2550989 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/02, G01N 25/48. Способ измерения параметров фазового перехода жидкость-жидкость в водных растворах амфифилов : № 2013148135/28 : заявл. 30.10.2013 : опубл. 20.05.2015 / Ю. А. Миргород, С. Г. Емельянов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ).
6. Равновесие жидкость–жидкость и экстракционная способность системы ППГ 425–NaNO<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O / И. В. Зиновьева, А. В. Кожевникова, Н. А. Милевский [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2022. – Т. 56, № 4. – С. 410-417. – DOI 10.31857/S004035712204008X.
7. 05.05-19С.32 Фазовое разделение жидкость-жидкость в растворах белков - Рассмотрение с позиций скейлинговой концепции // РЖ 19С. Химия высокомолекулярных соединений. – 2005. – № 5.
8. Супрамолекулярные пластики на основе малых молекул, опосредованные фазовым разделением жидкость-жидкость / Ю. Цзинцзин, Ци Давэй, Мякиля Эрмей [и др.]. — Текст : непосредственный // Angewandte. — 2022. — № 39.