

УДК 541.(64+128):542.952

## СОЛИ ОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ КАК ВОССТАНОВИТЕЛИ В КОНТРОЛИРУЕМОЙ РАДИКАЛЬНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С ПЕРЕНОСОМ АТОМА

© 2024 г. И. Д. Гришин<sup>а,\*</sup>, О. С. Гуляева<sup>а</sup>, Ю. А. Кузнецова<sup>а</sup>,  
Е. И. Зуева<sup>а</sup>, Д. Ф. Гришин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

\*e-mail: grishin\_i@ichem.unn.ru

Поступила в редакцию 21.03.2024 г.

После доработки 16.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Для проведения радикальной полимеризации акрилонитрила предложены новые каталитические системы на основе комплексов бромиды меди (II) с полиидентатными азотсодержащими лигандами: *трис*-[(2-пиридил)метил]амином, *трис*-[(2-диметиламино)этил]амином и солей органических кислот (сегнетова соль, оксалат натрия, лактат натрия и пируват натрия), выступающих в качестве агентов, регенерирующих катализатор. Показано, что полимеризация акрилонитрила в присутствии указанных систем и галогенсодержащих инициаторов протекает по механизму с переносом атома, приводя к получению полимеров с заданными значениями молекулярной массы. Исследовано влияние природы восстанавливающего агента и инициатора на процесс полимеризации и степень контроля молекулярно-массовых характеристик полученных образцов. Установлено, что наиболее эффективными восстанавливающими агентами, позволяющими добиться высокой скорости полимеризации при сохранении контроля над процессом, являются сегнетова соль и оксалат натрия.

DOI: 10.31857/S2308114724010079, EDN: MFTLPW

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к полимерам на основе акрилонитрила обусловлен возможностью их применения для получения широкого спектра материалов, характеризующихся ценными, а иногда и уникальными свойствами. К ним прежде всего относятся текстильные [1] и углеродные [2–4] волокна, разнообразные пластики на основе сополимеров со стиролом [5] и бутадиеном [6], а также различные мембраны [7, 8] и адсорбенты [9]. Необходимо отметить, что физико-механические свойства рассмотренных полимерных материалов в значительной степени зависят от их молекулярной массы и молекулярно-массового распределения. Использование узкодисперсных образцов облегчает процесс формования волокнистых материалов и приводит к улучшению их прочностных характеристик. Эффективным инструментом для

получения полимеров с узким молекулярно-массовым распределением является контролируемая радикальная полимеризация [10–14]. Среди трех основных подходов к ее проведению, известных к настоящему времени, наиболее эффективны в области полимеризации акрилонитрила обратимая передача цепи [4, 10] и контролируемая радикальная полимеризация с переносом атома (Atom Transfer Radical Polymerization – ATRP) [14–17]. Достоинством последнего метода является получение образцов, не содержащих фрагменты регулятора в структуре полимерной цепи, а также использование доступных катализаторов в предельно малых концентрациях.

Современные подходы к получению различных гомо- и сополимеров в условиях полимеризации с переносом атома основаны на использовании методологии ARGET ATRP (Activators Regenerated by Electron Transfer) [18–20]:



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Акрилонитрил (“Sigma”) очищали перегонкой над гидридом кальция в атмосфере аргона непосредственно перед использованием. ДМСО сушили над гидроксидом натрия, перегоняли при пониженном давлении, повторно сушили над прокаленным цеолитом 4А и вновь перегоняли. Четыреххлористый углерод перегоняли над гидридом кальция. Бромид меди (II), сегнетова соль, оксалат натрия, лактат натрия, ДМФА, *трис*-[(2-диметиламино)этил]амин ( $\text{Me}_6\text{TREN}$ ) (все реактивы фирмы “Aldrich”) использовали без предварительной очистки. ТПМА [27] и этилен-*бис*-(2-бromoизобутират) (ЭБИБ) [28] получали по известным методикам. Пируват натрия, оксалат натрия и сегнетову соль использовали без предварительной очистки. Лактат натрия получали взаимодействием эквивалентных количеств молочной кислоты и гидроксида натрия с последующей перекристаллизацией продукта из изопропилового спирта. Физико-химические константы всех использованных соединений соответствовали литературным данным.

Расчитанные количества бромида меди (II), соли органической кислоты, ТПМА и ЭБИБ (при их использовании в эксперименте) помещали в колбу Шленка, снабженную магнитным перемешивающим элементом. Колбу дегазировали трижды и заполняли аргоном. После этого добавляли рассчитанные количества ДМСО, акрилонитрила, четыреххлористого углерода и  $\text{Me}_6\text{TREN}$  (при их использовании в эксперименте). Полученную смесь разливали по подготовленным ампулам. Ампулы трижды дегазировали, запаивали и помещали в термостат, нагретый до 60°C, на заданное время. Полимеризация прекращалась заморозкой ампулы в жидком азоте. Продукт полимеризации растворяли ДМФА и высаживали в дистиллированную воду. Полимер, выделенный путем фильтрации, сушили при пониженном давлении при 70°C до постоянной массы.

Молекулярно-массовые характеристики полиакрилонитрила исследовали методом гель-проникающей хроматографии на установке (“Knauer”) с каскадом из двух колонок (PSS GRAM 30 Å и 1000 Å) при температуре 70°C. В качестве детектора использовали дифференциальный рефрактометр “RI Detektor K-2301”. Элюентом служил ДМФА, содержащий 10 ммоль LiBr. Калибровку прибора проводили по узкодисперсным ПММА-стандартам. Молекулярную массу ПАН рассчитывали с использованием универсальной калибровочной зависимости и известных из литературы коэффициентов уравнения Марка–Куна–Хаувинка для ПАН и ПММА [29] по формуле

$$\lg M_{\text{ПАН}} = \frac{1 + \alpha_{\text{ПММА}}}{1 + \alpha_{\text{ПАН}}} \lg M_{\text{ПММА}} + \frac{1}{1 + \alpha_{\text{ПАН}}} \lg \frac{K_{\text{ПММА}}}{K_{\text{ПАН}}}$$

Хроматографические данные интерпретировали с помощью программы ChomGate.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены кинетические кривые полимеризации акрилонитрила в присутствии систем на основе бромида меди (II) и различных восстанавливающих агентов: оксалата натрия ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ), лактата натрия ( $\text{NaC}_3\text{H}_5\text{O}_3$ ), пирувата натрия ( $\text{NaC}_3\text{H}_3\text{O}_3$ ) и сегнетовой соли. В качестве инициатора использовали этилен-*бис*-(2-бromoизобутират), проявивший высокую эффективность инициирования полимеризации акрилонитрила в ранее проведенных экспериментах [15]. Как видно из представленных данных, независимо от природы восстанавливающего агента конверсия мономера за 55 ч превышает 85%. Вместе с тем наибольшей скоростью характеризуются процессы, протекающие в присутствии сегнетовой соли и пирувата натрия. Их использование позволяет достичь конверсии мономера более 50% уже за 25 ч. Примечательно, что в случае сегнетовой соли снижение концентрации

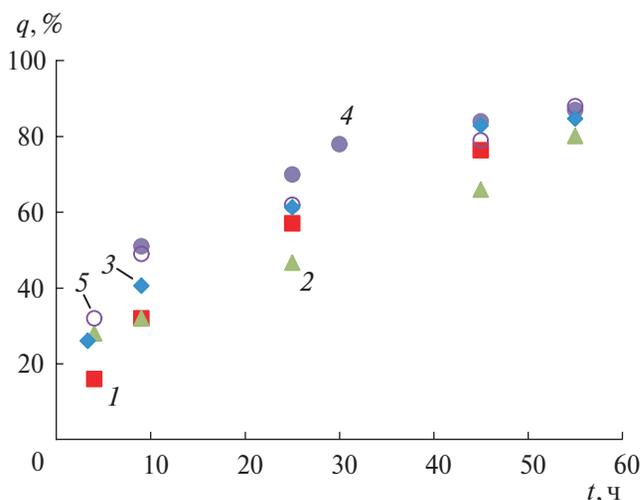


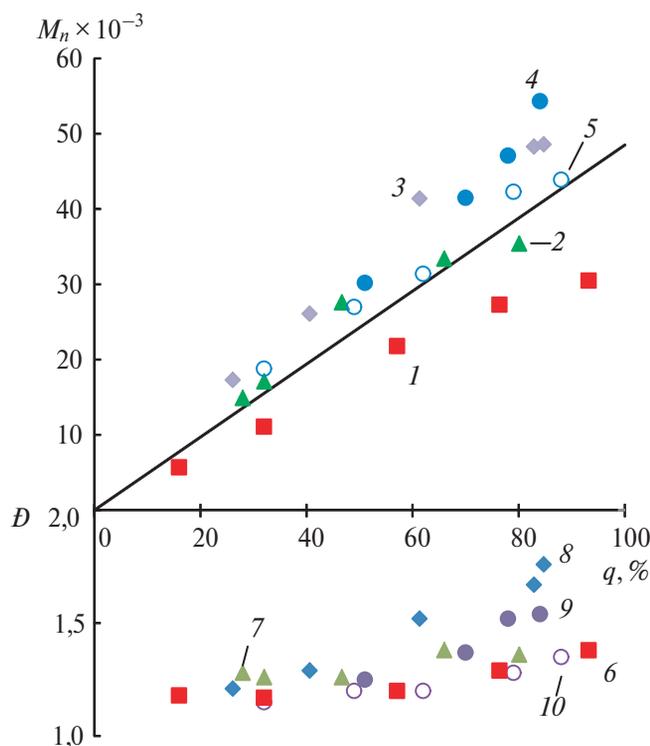
Рис. 1. Зависимости конверсии от времени для полимеризации АН, инициированной ЭБИБ в среде ДМСО присутствии систем на основе бромида меди(II) и различных восстановителей при 60°C. [Акрилонитрил] = 2.5 моль/л. 1–4 – [акрилонитрил] : [ЭБИБ] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [восстановитель] = 912 : 1 : 0.24 : 2.4 : 1.2; восстановитель Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (1), NaC<sub>3</sub>H<sub>5</sub>O<sub>3</sub> (2), NaC<sub>3</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub> (3) и сегнетова соль (4); 5 – [акрилонитрил] : [ЭБИБ] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [сегнетова соль] = 912 : 1 : 0.24 : 2.4 : 0.48. Цветные рисунки можно посмотреть в электронной версии.

восстановителя в три раза практически не сказывается на скорости протекания процесса, однако улучшает степень контроля над молекулярно-массовыми характеристиками полимеров.

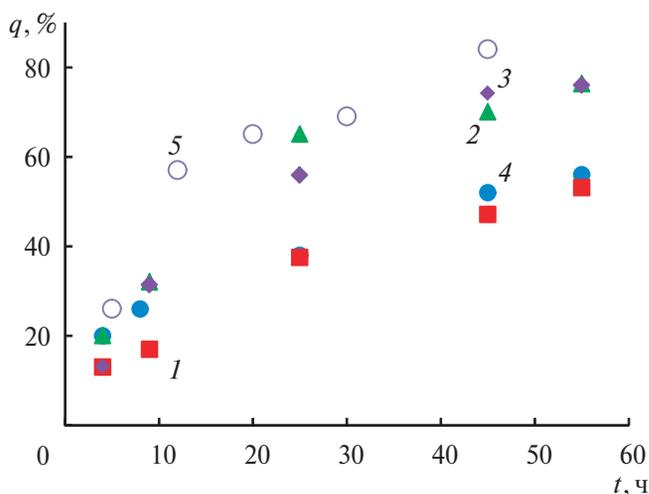
Представленные на рис. 2 зависимости молекулярной массы ПАН от конверсии являются линейными, что характерно для процессов, протекающих по механизму полимеризации с переносом атома [4, 10]. Необходимо отметить хорошие корреляции между экспериментально определенными значениями среднечисленной молекулярной массы и их теоретически рассчитанными значениями. Дисперсности полученных образцов не превышают величину 1.8 даже на высоких конверсиях мономера. Наблюдается небольшое уширение молекулярно-массового распределения образцов с ростом степени превращения мономера, что может свидетельствовать о протекании побочных процессов. Наиболее узкодисперсные образцы были получены при использовании в качестве восстанавливающих агентов сегнетовой соли и оксалата натрия. Применение пирувата натрия оказалось менее

эффективным с точки зрения достижения высокой степени контроля над процессом, несмотря на то, что в недавно опубликованных исследованиях была отмечена его высокая эффективность как агента, регенерирующего катализатор, в полимеризации с переносом атома, протекающей в условиях фотооблучения [30].

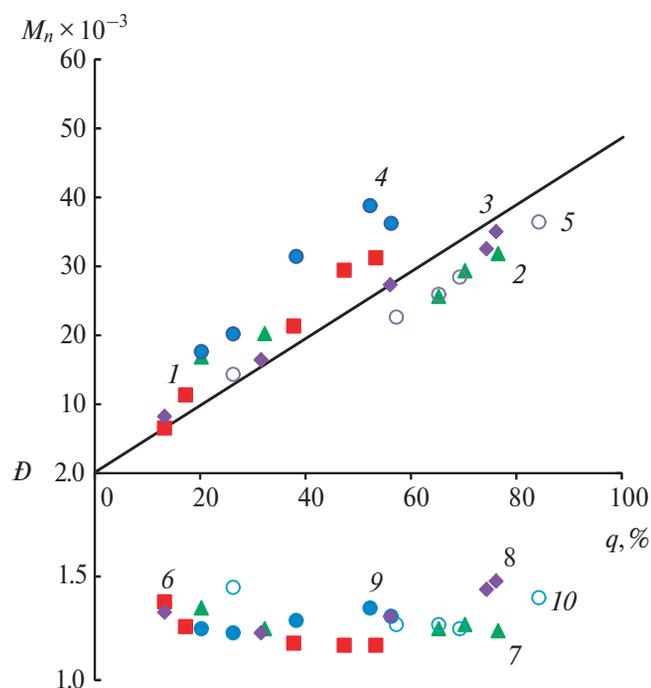
Проведенные ранее исследования показали, что использование в качестве инициатора четыреххлористого углерода позволяет добиться более высокой степени контроля молекулярно-массовых характеристик при полимеризации акрилонитрила, однако несколько снижает скорость процесса полимеризации [15, 16]. Аналогичные закономерности наблюдаются и при проведении полимеризации в присутствии выбранных нами восстанавливающих агентов. На рис. 3 приведены зависимости конверсии от времени для полимеризации, инициированной  $CCl_4$ . Представленные зависимости свидетельствуют о том, что в данном случае наибольшая скорость процесса реализуется при использовании в качестве восстановителей лактата натрия: за 25 ч конверсия мономера превышает 60%. Близкие значения достигаются и в случае применения пирувата натрия. Если восстановителями служат оксалат натрия и сегнетова соль, то для достижения конверсии мономера 50% требуется значительно больше времени (порядка 45 ч).



**Рис. 2.** Зависимость молекулярной массы (1–5) и дисперсности (6–10) образцов ПАН от конверсии мономера. 1–4, 6–9 – [акрилонитрил] : [ЭБИБ] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [восстановитель] = 912 : 1 : 0.24 : 2.4 : 1.2; восстановитель Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (1, 6), NaC<sub>3</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub> (2, 7), NaC<sub>3</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub> (3, 8) и сегнетова соль (4, 9); 5, 10 – [акрилонитрил] : [ЭБИБ] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [сегнетова соль] = 912 : 1 : 0.24 : 2.4 : 0.48. Прямая линия – теоретически рассчитанные значения ММ.



**Рис. 3.** Зависимость конверсии от времени для полимеризации акрилонитрила в среде ДМСО, инициированной  $CCl_4$ , в присутствии систем на основе бромида меди(II) и различных восстановителей при 60 °С. [Акрилонитрил] = 2.5 моль/л. 1–4 – [акрилонитрил] : [CCl<sub>4</sub>] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [восстановитель] = 912 : 1 : 0.24 : 2.4 : 1.2; восстановитель Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (1), NaC<sub>3</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub> (2), NaC<sub>3</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub> (3) и сегнетова соль (4); 5 – [акрилонитрил] : [CCl<sub>4</sub>] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [Me<sub>6</sub>TREN] : [сегнетова соль] = 912 : 1 : 0.24 : 1.9 : 0.5 : 0.48.



**Рис. 4.** Зависимость молекулярной массы (1–5) и дисперсности (6–10) образцов ПАН от конверсии мономера. 1–4, 6–9 – [акрилонитрил] : [CCl<sub>4</sub>] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [восстановитель] = 912 : 1 : 0.24 : 2.4 : 1.2; восстановитель Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (1, 6), NaC<sub>3</sub>H<sub>5</sub>O<sub>3</sub> (2, 7), NaC<sub>3</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub> (3, 8), сегнетова соль (4, 8); 5, 10 – [акрилонитрил] : [CCl<sub>4</sub>] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [Me<sub>6</sub>TREN] : [сегнетова соль] = 912 : 1 : 0.24 : 1.9 : 0.5 : 0.48. Прямая линия – теоретически рассчитанные значения ММ.

Зависимости молекулярно-массовых характеристик образцов от конверсии, приведенные на рис. 4, характерны для процессов контролируемой радикальной полимеризации: наблюдается линейное увеличение молекулярной массы с ростом степени превращения, а дисперсность образцов не превышает значения 1.5.

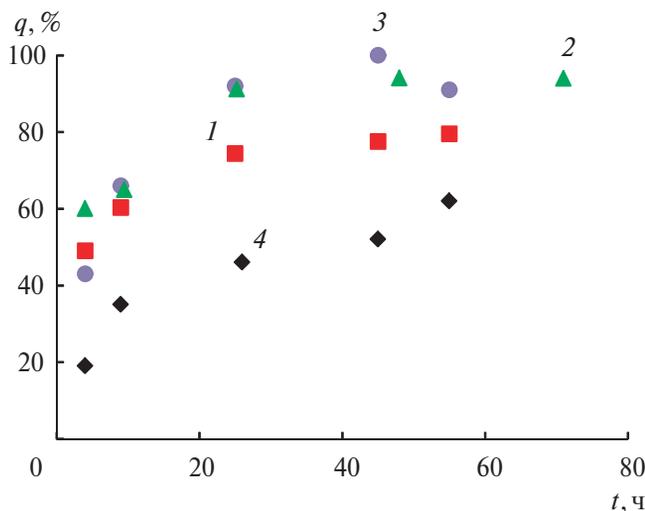
Наилучшая степень контроля над процессом наблюдается при использовании в качестве восстанавливающего агента оксалата натрия. При этом имеет место хорошее соответствие молекулярной массы полученных образцов теоретически рассчитанным значениям. Аналогичные закономерности наблюдаются при использовании в качестве восстанавливающего агента лактата натрия, тогда как при проведении полимеризации в присутствии сегнетовой соли образуются полимеры с более высокими значениями молекулярной массы, что косвенно свидетельствует о более низкой эффективности иницирования. Полимеры, полученные в указанных условиях, характеризуются более высокими значениями дисперсности. Наилучшее соответствие значений молекулярной массы образцов теоретически

рассчитанным наблюдается в случае использования пирувата натрия, однако в его присутствии происходит уширение молекулярно-массового распределения образцов на высоких степенях превращения. Следует отметить, что в целом молекулярно-массовое распределение образцов, полученных в присутствии четыреххлористого углерода как инициатора несколько уже по сравнению с образцами, полученными в присутствии этилен-бис-(2-бромоизобутирата).

В ранее проведенных исследованиях нами показано, что одновременное введение в систему двух азотсодержащих лигандов позволяет увеличить скорость протекания полимеризации акрилонитрила в контролируемом режиме, что особенно важно в плане получения образцов ПАН высокой молекулярной массы [15, 31]. Установлено, что введение исследуемую систему CuBr<sub>2</sub>/ТПМА второго азотсодержащего лиганда Me<sub>6</sub>TREN позволило добиться достижения высоких степеней превращения акрилонитрила при сохранении контролируемого характера процесса (рис.3, кривая 4). Как следует из представленных данных, при использовании каталитической композиции, содержащей 25% Me<sub>6</sub>TREN, конверсия мономера составляет более 50% уже за 10 ч, тогда как в присутствии лишь одного ТПМА аналогичное значение достигается примерно за 40 ч. Примечательно, что, несмотря на существенное повышение скорости полимеризации, контролируемый характер процесса сохраняется. Наблюдается линейное увеличение молекулярной массы образцов с ростом конверсии, а дисперсность получаемых образцов не превышает значения 1.4.

Каталитическая система на основе комплекса бромиды меди с Me<sub>6</sub>TREN проявляет высокую эффективность в полимеризации ряда мономеров [32]. Вместе с тем, она оказалась неэффективной при проведении контролируемой радикальной полимеризации акрилонитрила. Ее применение приводит к образованию полимеров, характеризующихся значениями молекулярной массы, существенно превышающими теоретически рассчитанные значения, и широким молекулярно-массовым распределением [31]. В данной работе установлено, что использование в качестве восстановителей солей органических кислот (оксалата натрия, лактата натрия и сегнетовой соли) позволяет проводить полимеризацию акрилонитрила в присутствии комплекса CuBr<sub>2</sub>/Me<sub>6</sub>TREN в контролируемом режиме.

Представленные на рис. 5 зависимости показывают, что в присутствии каталитических систем на основе CuBr<sub>2</sub>/Me<sub>6</sub>TREN конверсия мономера превышает 60% уже за 9 ч, а предельная конверсия за 25 ч в ряде случаев достигает 90%,



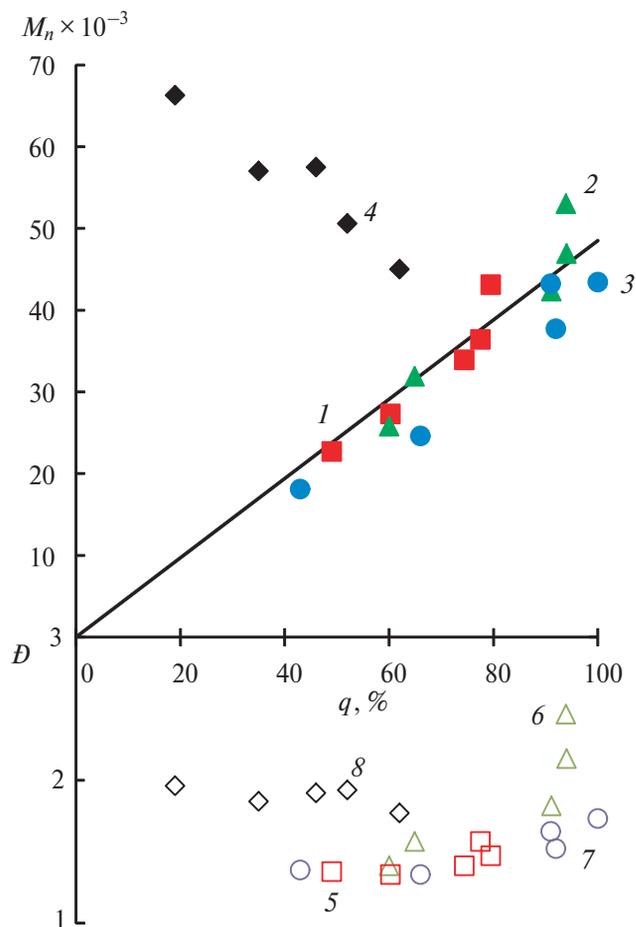
**Рис. 5.** Зависимость конверсии от времени для полимеризации АН в среде ДМСО присутствии систем на основе бромида меди(II) и различных восстановителей при 60°C. [Акрилонитрил] = 2.5 моль/л. 1–3 – [акрилонитрил] : [CCl<sub>4</sub>] : [CuBr<sub>2</sub>] : [Me<sub>6</sub>TREN] : [восстановитель] = 912 : 1 : 0.24 : 2.4 : 1.2; восстановитель Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (1), NaC<sub>3</sub>H<sub>5</sub>O<sub>3</sub> (2), сегнетова соль (3); 4 – [акрилонитрил] : [CCl<sub>4</sub>] : [CuBr<sub>2</sub>] : [сегнетова соль] = 912 : 1 : 0.24 : 1.2.

что делает данные системы перспективными в плане возможности практического применения. Максимальные степени превращения мономера наблюдаются при использовании в качестве восстанавливающих агентов сегнетовой соли и лактата натрия.

Установлено, что молекулярные массы полученных образцов линейно возрастают с повышением степени превращения мономера независимо от природы выбранного восстановителя (рис. 6). Наблюдается хорошее соответствие экспериментально определенных значений молекулярной массы теоретически рассчитанным значениям, что позволяет утверждать, что процесс полимеризации протекает в контролируемом режиме. Наиболее узкодисперсные образцы получаются в присутствии сегнетовой соли и оксалата натрия как восстановителей.

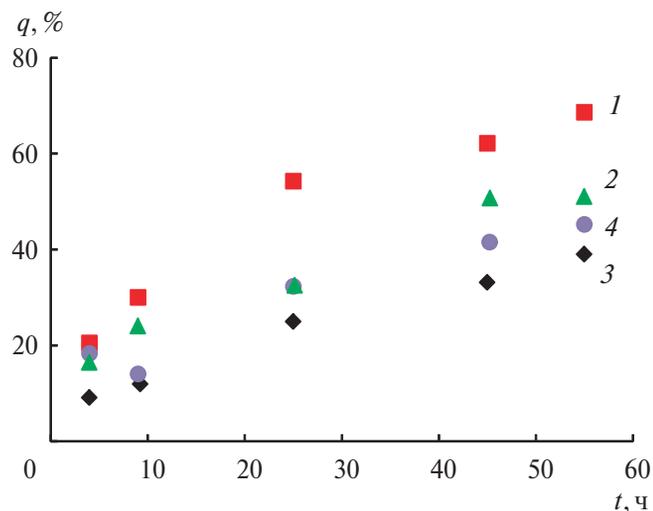
Таким образом, совокупность приведенных выше данных свидетельствует о том, что сегнетова соль является наиболее перспективным восстанавливающим агентом в исследуемых процессах ARGET ATRP с точки зрения сочетания наибольшей скорости протекания процесса и степени контроля над молекулярно-массовыми характеристиками синтезируемых полимеров.

Известно, что тартрат-анион, входящий в состав сегнетовой соли, может образовывать комплексы с ионами меди [33, 34]. В плане

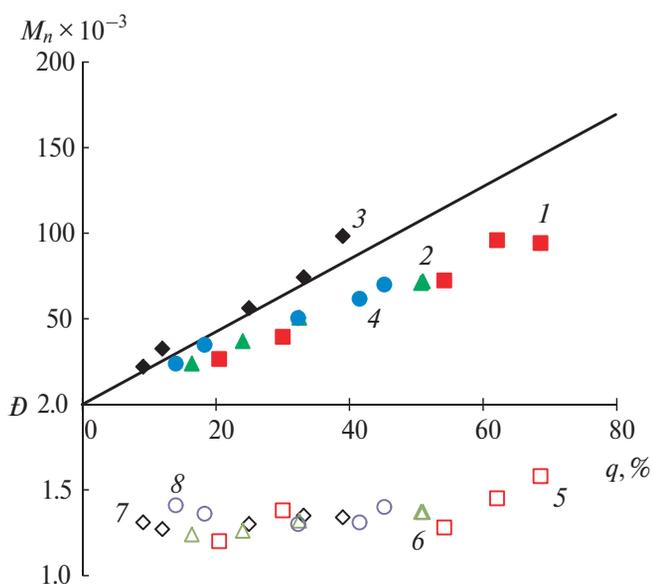


**Рис. 6.** Зависимость молекулярной массы (1–4) и дисперсности (5–8) образцов ПАН от конверсии мономера. 1–3, 5–7 – [акрилонитрил] : [CCl<sub>4</sub>] : [CuBr<sub>2</sub>] : [Me<sub>6</sub>TREN] : [восстановитель] = 912 : 1 : 0.24 : 2.4 : 1.2; восстановитель Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (1, 5), NaC<sub>3</sub>H<sub>5</sub>O<sub>3</sub> (2, 6), сегнетова соль (3, 7); 4, 8 – [акрилонитрил] : [CCl<sub>4</sub>] : [CuBr<sub>2</sub>] : [сегнетова соль] = 912 : 1 : 0.24 : 0.48. Прямая линия – теоретически рассчитанные значения ММ.

оценки возможности участия комплекса меди с тартрат-анионом в качестве катализатора процесса полимеризации акрилонитрила нами был проведен эксперимент по синтезу ПАН в отсутствие азотсодержащего лиганда. Приведенные на рис. 5 и 6 зависимости свидетельствуют о том, что полимеризация акрилонитрила в указанных условиях протекает, однако значения молекулярной массы не соответствуют теоретически рассчитанным величинам, а дисперсность образцов находится на уровне 2.0 и выше. Следовательно, в указанных условиях процесс протекает в неконтролируемом режиме. Таким образом, можно утверждать, что возможное комплексобразование иона меди с тартрат-анионом не является фактором, определяющим протекание процесса в контролируемом режиме.



**Рис. 7.** Зависимость конверсии от времени для полимеризации акрилонитрила в среде ДМСО присутствии систем на основе бромида меди(II) и различных восстановителей при 60°C. [Акрилонитрил] = 2.5 моль/л. [Акрилонитрил] : [инициатор] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [восстановитель] = 4000 : 1 : 0.24 : 2.4 : 1.2; восстановитель Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (1, 3) и NaC<sub>3</sub>H<sub>5</sub>O<sub>3</sub> (2, 4); инициатор ЭБИБ (1, 2) и CCl<sub>4</sub> (3, 4).



**Рис. 8.** Зависимость молекулярной массы (1–4) и дисперсности (5–8) образцов ПАН от конверсии мономера. [акрилонитрил] : [инициатор] : [CuBr<sub>2</sub>] : [ТПМА] : [восстановитель] = 4000 : 1 : 0.24 : 2.4 : 1.2; восстановитель Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (1, 3, 5, 7) и NaC<sub>3</sub>H<sub>5</sub>O<sub>3</sub> (2, 4, 6, 8), инициатор ЭБИБ (1, 2, 5, 6) и CCl<sub>4</sub> (3, 4, 7, 8). Прямая линия – теоретически рассчитанные значения ММ.

Предложенные в данной работе каталитические системы на основе бромида меди (II) и ТПМА в сочетании с оксалатом и лактатом натрия как восстановителями и ранее упомянутыми использованными нами хлор- и бромсодержащими инициаторами были применены для получения образцов ПАН с высокими значениями среднечисленной молекулярной массы. Представленные на рис. 7 кинетические кривые свидетельствуют о том, что скорость протекания процесса зависит как от природы восстанавливающего агента, так и от состава и строения инициатора. Как и для процессов, рассмотренных выше (рис. 1 и 3), наибольшая скорость полимеризации наблюдается при использовании бромсодержащего инициатора в сочетании с оксалатом натрия. В указанных условиях конверсия мономера за 55 ч достигает 68%, что сопоставимо с результатами, ранее полученными в присутствии сегнетовой соли как восстанавливающего агента [15]. Использование хлорсодержащего инициатора (CCl<sub>4</sub>) привело к снижению скорости процесса. Интересно, что в данном случае скорость полимеризации оказалась выше в присутствии добавки лактата натрия, аналогично, как и при получении образцов ПАН с меньшим целевым значением молекулярной массы.

Приведенные на рис. 8 зависимости молекулярно-массовых характеристик образцов ПАН, полученных в описанных условиях, от конверсии характерны для процессов, протекающих в контролируемом режиме. Примечательно, что независимо от выбранной системы протекание полимеризации сопровождается линейным возрастанием молекулярной массы в хорошем соответствии с теоретически рассчитанными значениями. При этом при использовании оксалата натрия были получены образцы с молекулярной массой, превышающей  $100 \times 10^3$ , что интересно в плане применения данных систем для получения волокон. Наиболее узкодисперсные образцы ПАН были получены при использовании четыреххлористого углерода в сочетании с оксалатом натрия как восстанавливающим агентом. Дисперсность образцов находится на уровне 1.2–1.4, что, однако, несколько выше, чем при использовании в качестве восстановителя сегнетовой соли [15].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что оксалат натрия, пируват натрия, лактат натрия и сегнетова соль могут быть использованы в качестве доступных и эффективных восстанавливающих агентов для проведения процесса полимеризации акрилонитрила по

механизму с переносом атома в соответствии с концепцией ARGET ATRP. Полученные в ходе экспериментов результаты свидетельствуют том, что эффективность применения того или иного восстанавливающего агента зависит как от строения используемого комплекса меди, в частности азотсодержащего лиганда, входящего в его состав, так и от природы используемого инициатора. Введение предложенных восстановителей позволяет проводить процесс полимеризации акрилонитрила под действием комплекса  $\text{CuBr}_2/\text{Me}_6\text{TREN}$  в контролируемом режиме с высокой скоростью, что представляется перспективным с точки зрения практического применения предложенных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-23-00087).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Nogaj A., Süling C., Schweizer M. // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 2011. o10\_o04.
- Brown K. R., Harrell T. M., Skrzypczak L., Scherschel A., Wu H. F., Li X. // Carbon. 2022. V. 196. P. 422.
- Jin X., Feng C., Creighton C., Hameed N., Parameswaranpillai J., Salim N.V. // Polym. Degrad. Stab. 2021. V. 186. 109536.
- Maksimov N. M., Toms R. V., Balashov M. S., Gerval'd A. Yu., Prokopov N. I., Plutalova A. V., Kuzin M. S., Skvortsov I. Yu., Kulichikhin V. G., Chernikova E. V. // Polymer Science B. 2022. V. 64. № 5. P. 670.
- Pietrasik J., Dong H., Matyjaszewski K. // Macromolecules. 2006. V. 39. № 19. P. 6384.
- Kulich DM, Gaggarr SK, Lowry V, Stepien R. Acrylonitrile–Butadiene–Styrene Polymers. Encyclopedia of Polymer Science and Technology. New York: Wiley, 2002.
- Dmitrieva E.S., Anokhina T.S., Novitsky E.G., Volkov V.V., Borisov I.L., Volkov A.V. // Polymers. 2022. V. 14. № 5. 980.
- Abounahia N.; Shahab A. A., Khan M. M., Qiblawey H., Zaidi S. J. // Membranes. 2023. V. 13. № 11. P. 87.
- Gupta A., Sharma V., Mishra P. K., Ekielski A. // Molecules. 2022. V. 27. № 24. P. 8689.
- Corrigan, N., Jung K., Moad G., Hawker C.J., Matyjaszewski K., Boyer C. // Progr. Polym. Sci. 2020. V. 111. P. 101311.
- Zhou Y.N., Li J.J., Wang T.T., Wu Y.Y., Luo Z.H. // Progr. Polym. Sci. 2022. V. 130. P. 101555.
- Grishin I. D. // Polymer Science C. 2022. V. 64. № 2. P. 82.
- Matyjaszewski K. // Chem. Mater. 2024. V. 36. P. 1775.
- Grishin D.F., Grishin I.D. // Успехи химии. 2021. Т.90. №. 2. С. 231.
- Grishin I. D., Zueva E. I., Pronina Yu. S., Grishin D.F. // Catalysts. 2023. V. 13. P.444.
- Grishin I. D., Stakhi S. A., Kurochkina D. Yu., Grishin D. F. // J. Polym. Res. 2018. V. 25. P.261.
- Lamson M., Kopec' M., Ding H., Zhong M., Matyjaszewski K. // J. Polym. Sci., Polym. Chem. 2016. V. 54. P. 1961.
- Ramua A., Rajendrakumar K. // Polym.Chem. 2020. V. 11. № 3. P. 687.
- Zaborniak I., Chmielarz P. // Eur. Polym. J. 2023. V. 183. P,111735.
- Jakubowski W., Min K., Matyjaszewski K. // Macromolecules. 2006. V. 39. № 1. P. 39.
- Гришин И. Д., Князева Н.А., Пенкаль А.М. // Изв. РАН. Сер. Хим. 2020. № 8. С. 1520.
- Dong H., Tang W., Matyjaszewski K. // Macromolecules. 2007. V. 40. № 9. P. 2974.
- Wang Z., Mahoney C., Yan J., Lu Z., Ferebee R., Luo D., Bockstaller M.R., Matyjaszewski K. // Langmuir. 2016. V. 32. № 49. P. 13207.
- Gemmer L, Niebuur B.-J., Dietz C., Rauber D., Plank M., Frieß F.V., Presser V., Stark R.W., Kraus T., Gallei M. // Polym. Chem. 2023. V. 14. № 42. P. 4825.
- Mendonça P.V., Ribeiro J.P.M., Abreu C.M.R., Guliasvili T., Serra A.C., Coelho J.F.J. // ACS Macro Lett. 2019. V. 8. № 3. P. 315.
- Ma J., Chen H., Zhang M., Wang C., Zhang Y., Qu R. // Mat. Sci. Eng C. 2012, V. 32 № 6. P. 1699.
- Lei L., Chen Y., Feng Z., Deng C., Xiao Y. // Inorg. Chim. Acta. 2021. V. 519. P.120282.
- Zhang C., Ling J., Wang Q. // Macromolecules. 2011. V. 44. № 22. P. 8739.
- Polymer Handbook / Ed. by J. Brandrup, E.H. Immergut, E.A. Crulue New York: Wiley, 1999.
- Szczepaniak G., Łagodzińska M., Dadashi-Silab S., Goczyński A., Matyjaszewski K. // Chem. Sci. 2020. V. 11. № 33. P. 8809.
- Stakhi S. A., Grishin D. F., Grishin I.D. // J. Polym. Res. 2021. V. 28. P.457.
- Szczepaniak G., Fu L., Jafari H., Kapil K., Matyjaszewski K. // Accounts Chem. Res. 2021. V. 54. № 7. P. 1779.
- Saravanabharathi D., Obulichetty M., Rameshkumar S., Kumaravel M. // Synth. Met. 2022. V. 162. P. 1519.
- Missavage R. J., Belford R. L., Paul L.C. // J. Coordinat. Chem. 1972. V. 2. № 2. P. 145.