

Синтез и модификация сополимеров стеарилметакрилата и малеинового ангидрида и их влияние на низкотемпературные характеристики дизельного топлива

Synthesis and modification of copolymers of stearyl methacrylate and maleic anhydride and study of their effect on low-temperature characteristics of diesel fuel

Ю.С. ПРОНИНА, М.В. ПАВЛОВСКАЯ, М.В. АРСЕНЬЕВ, Д.Ф. ГРИШИН

YU.S. PRONINA, M.V. PAVLOVSKAYA, M.V. ARSENIYEV, D.F. GRISHIN

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
grishin@ichem.unn.ru

С помощью полимераналогичных превращений осуществлена модификация сополимеров стеарилметакрилата с малеиновым ангидридом, синтезированных в условиях радикальной полимеризации с использованием агентов обратимой передачи цепи различного строения. Установлено, что модифицированный на 25% октанол-1 сополимер стеарилметакрилата с малеиновым ангидридом обладает высоким депрессорным эффектом для температуры застывания минус 19°C и одновременно значительно снижает как значения температур помутнения, так и температуру предельной фильтруемости дизельного топлива. В связи с этим полученные модифицированные сополимеры могут представлять интерес в плане их практического применения в качестве присадок к топливам.

Ключевые слова: синтез полимеров, стеарилметакрилат, малеиновый ангидрид, депрессорные присадки

Polymer-analogous transformations have been used to modify copolymers of stearyl methacrylate with maleic anhydride synthesized under radical polymerization conditions using reversible chain transfer agents of various structures. It has been established that copolymer of stearyl methacrylate with maleic anhydride modified by 25% with octanol-1 has a high depressant effect for a pour point of minus 19°C and at the same time significantly reduces both the cloud point values and the maximum filterability temperature of diesel fuel. In this regard, the obtained modified copolymers may be of interest in terms of their practical use as fuel additives.

Keywords: polymer synthesis, stearyl methacrylate, maleic anhydride, depressant additives

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-35-38

Введение

Производство зимних сортов дизельного топлива (ДТ) весьма актуально для стран, расположенных в северных регионах земного шара, включая Россию [1]. Для нашей страны проблема усугубляется и тем, что значительная часть нефти, добываемой на её территории, относится к парафинистым нефтям, т.е. содержащим значительное количество алканов нормального или мало-разветвлённого строения. Такие алканы при понижении температуры склонны выпадать в виде ромбических и гексагональных кристаллов, что отрицательно сказывается на низкотемпературных свойствах как самой нефти, так и продуктов её переработки, включая ДТ. На сегодняшний день приоритетным способом регулирования низкотемпературных свойств ДТ является использование специальных добавок – депрессорных и депрессорно-диспергирующих присадок [2–4]. Спектр соединений, используемых в качестве таких присадок, весьма широкий, при этом наибольшее распространение получили гомо- и сополимеры, в том числе на основе винилацетата, алкилметакрилатов и других мономеров, включая малеиновый ангидрид (МА). Сополимеры на основе МА способны замедлять образование кристаллов парафина и сдерживать их накопление, тем самым улучшая текучесть топлива при низких температурах [5]. Важным фактором, определяющим эффективность влияния присадок на низкотемпературные свойства ДТ, являются их молекулярно-массовые характеристики [3], эффективным инструментом регулирования которых является контролируемая радикальная полимеризация (КРП) или полимеризация в режиме «живых» цепей [6, 7].

В свете изложенного выше целью данного исследования явилась разработка новых методов получения эффективных депрессорных присадок к гидроочищенному дизельному топливу на основе сополимеров стеарилметакрилата (СМА) и МА, в том числе модифицированных методами полимераналогичных превращений. Выбор СМА в качестве базового мономера обусловлен тем, что

высшие алкилметакрилаты, с одной стороны, содержат в своем составе полярные карбоксильные группы, которые позволяют придать присадкам на их основе диспергирующие свойства, а с другой стороны, имеют высокое сродство к дизельному топливу, в составе которого преобладают фракции углеводородов C₁₇–C₁₈ [8, 9]. Кроме того, существует точка зрения, что наличие длинных боковых алкильных групп в присадке способствует их лучшей сокристаллизации с линейными высшими парафинами ДТ, что приводит к затруднению дальнейшего роста кристаллов и в конечном итоге благоприятно сказывается на низкотемпературных свойствах топлива [10].

Объекты и методика исследований

Дибензилтретиокарбонат и S,S'-бис-(α,α -диметилуксусная кислота)-третиокарбонат – коммерческие продукты фирмы Sigma-Aldrich, США. 2-цианоизопропилдодецилтретиокарбонат синтезирован по методике [11]. Используемые в работе мономеры: СМА и МА (коммерческие реагенты фирмы Sigma-Aldrich) очищали по стандартным методикам. Динитрил азотомасляной кислоты (ДАК), использованный в качестве радикального инициатора, перед использованием перекристаллизовывали из этанола. Физико-химические характеристики растворителей соответствовали литературным данным [12].

Синтез полистеарилметакрилата (ПСМА) и сополимеров СМА с МА проводили по следующей методике. В круглодонную колбу помещали взвешенное и предварительно рассчитанное количество СМА (в случае синтеза ПСМА) или СМА с МА (в случае проведения сополимеризации) в тетрагидрофуране (ТГФ), добавляли заранее рассчитанное количество инициатора ДАК и ОПЦ-агента. Полученную смесь разливали по приготовленным ампулам, замораживали, дегазировали, запаивали и помещали в термостат на определённое время при заданной температуре. По истечении определённого времени ампулу вынимали из термостата и высаживали содержимое в этиловый спирт. С целью очистки

полимера от остатков инициатора и мономера образцы дважды переосаждали этанолом из раствора ТГФ и сушили при пониженном давлении до постоянной массы.

Модификацию сополимеров СМА с МА октанолом-1 и ундекановой кислотой проводили по методике, аналогичной прописи [13]. В круглодонную двугорлую колбу помещали предварительно рассчитанное количество сополимера, толуолсульфокислоты (PTSA) и ундекановой кислоты или спирта в толуоле. Реакционную смесь нагревали с обратным холодильником в течение 30 часов, охлаждали до комнатной температуры и экстрагировали полученную смесь этилацетатом. Органический слой промывали дистиллированной водой, 5%-м раствором NaHCO_3 , и сушили над Na_2SO_4 . Растворитель выпаривали с использованием роторного испарителя.

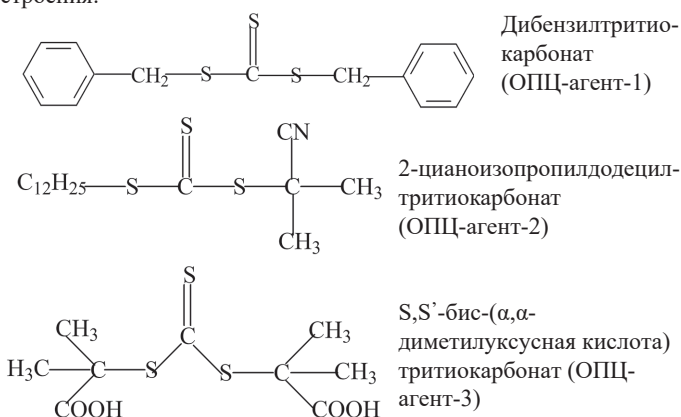
Молекулярно-массовые характеристики синтезированных полимеров определяли методом ГПХ на жидкостном хроматографе Knauer (Германия) с линейной колонкой Phenomenex Phenogel-linear. В качестве детектора использовали дифференциальный рефрактометр RI Детектор К-2301 и УФ-детектор с рабочей длиной волны 254 нм. Элюентом служил ТГФ. Для калибровки применяли узкодисперсные стандарты на основе полиММА. Хроматографические данные интерпретировали с помощью программы ChomGate.

Спектр ^1H ЯМР полимеров регистрировали в растворе CDCl_3 на спектрометре Agilent DD2 400 (США). Расшифровка и моделирование спектров проведены с использованием программы MestReNova. Регистрацию ИК-спектров синтезированных полимеров проводили на Фурье-спектрометре Infracum FT-801 (Россия).

Исследование низкотемпературных свойств дизельного топлива проводили на низкотемпературном анализаторе МХ-700 (ПЭ-7200И) (Россия) в соответствии с требованиями ГОСТ 5066-2018 «Топлива моторные. Методы определения температуры помутнения, начала кристаллизации и кристаллизации», ГОСТ 20287-91 «Нефтепродукты. Методы определения температуры текучести и застывания» и международного стандарта качества нефтепродуктов ISO-3016:2019 «Нефть и нефтепродукты природного или синтетического происхождения. Определение температуры потери текучести». Точность измерения составляла $0,5^\circ\text{C}$. Для проведения исследований по низкотемпературным свойствам дизельного топлива в присутствии синтезированных полимеров использовали экологически чистое дизельное топливо, производимое на нефтеперерабатывающем заводе ООО «ЛУКОЙЛ-Нижгород-нефтеоргсинтез», которое было отобрано с установки ЛЧ24/2000 до вовлечения пакета присадок.

Результаты и их обсуждение

Как указывалось выше, полимеры на основе СМА представляют интерес при использовании их в качестве депрессорных присадок к дизельному топливу. Нами для синтеза указанных сополимеров с заданными молекулярно-массовыми характеристиками были использованы агенты обратной передачи цепи (ОПЦ) различного строения:



Использование обратной передачи цепи как метода контролируемого синтеза макромолекул обусловлено тем, что в практическом плане несомненным достоинством ОПЦ-полимеризации является тот факт, что она менее чувствительна к примесям в плане подготовки реагентов, чем «живая» ионная полимеризация и полимеризация по механизму с переносом атома [6]. Кроме того,

этот метод был успешно использован ранее для проведения гомополимеризации СМА с целью последующей блок-сополимеризации с метакриловыми мономерами для синтеза наноразмерных макромолекулярных структур [14, 15].

Примененные в работе мономеры (СМА и МА) в процессе синтеза образуют третичный и вторичный радикалы, соответственно. В этой связи для синтеза сополимеров СМА с МА были использованы три ОПЦ-агента различного строения, формулы которых приведены выше. Выбор указанных агентов основан на анализе известных закономерностей ОПЦ-полимеризации [16], обусловленных строением полимеризуемых мономеров и соответствующих им макрорадикалов. Один из них (агент 1) содержит в своем составе два вторичных радикала («уходящие группы»), агент ОПЦ-2 содержит один вторичный и один третичный радикал, а агент ОПЦ-3 – два третичных радикала, связанных с атомами серы.

Установлено, что полимеризация СМА в присутствии всех используемых ОПЦ-агентов протекает равномерно до высокой конверсии (табл. 1). При этом образцы ПСМА характеризуются относительно высокими для процессов контролируемой радикальной полимеризации значениями дисперсности (M_w/M_n), которые, тем не менее, ниже, чем для их аналогов, синтезированных в отсутствие передатчиков цепи (строка 1).

Таблица 1. Синтез полимеров СМА в присутствии ОПЦ-агентов. Условия синтеза: [СМА/ТГФ] = 10 мол.%, [ДАК] = 0,1 мол.%; $T = 60^\circ\text{C}$. Концентрация инициатора и ОПЦ-агентов рассчитывалась на мономер.

№	ОПЦ-агент, мол.%	Конверсия, %	M_n	M_w	M_w/M_n
1	–	79,4	47900	142700	3,00
2	ОПЦ-1 0,2%	82,0	44500	119000	2,58
3	ОПЦ-1 0,4%	82,4	40200	92100	2,29
4	ОПЦ-2 0,2%	79,2	38700	49400	1,27
5	ОПЦ-3 0,2%	80,0	35600	63300	1,78

Как следует из представленных данных, наименьшие значения M_w/M_n синтезированных образцов наблюдаются в случае использования агентов ОПЦ-2 и ОПЦ-3, содержащих пространственно-затрудненные третичные группы в своем составе. При этом, как и следовало ожидать, при введении всех ОПЦ-агентов наблюдается снижение молекулярной массы (ММ) полимеров. Установлено, что кривые молекулярно-массового распределения (ММР) унимодальны, мода последовательно сдвигается в высокомолекулярную область с ростом конверсии. Увеличение концентрации ОПЦ-агента способствует дальнейшему снижению ММ полимера (строки 2 и 3, табл. 1), однако лишь незначительно сказывается на значениях дисперсности синтезированных образцов.

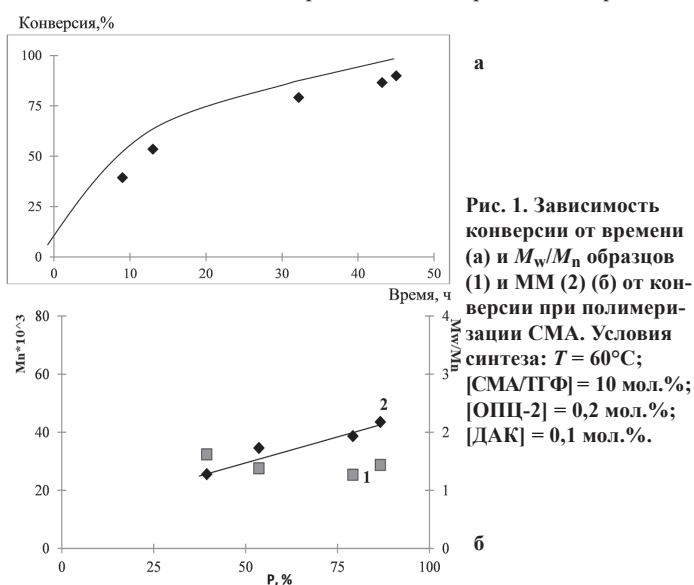
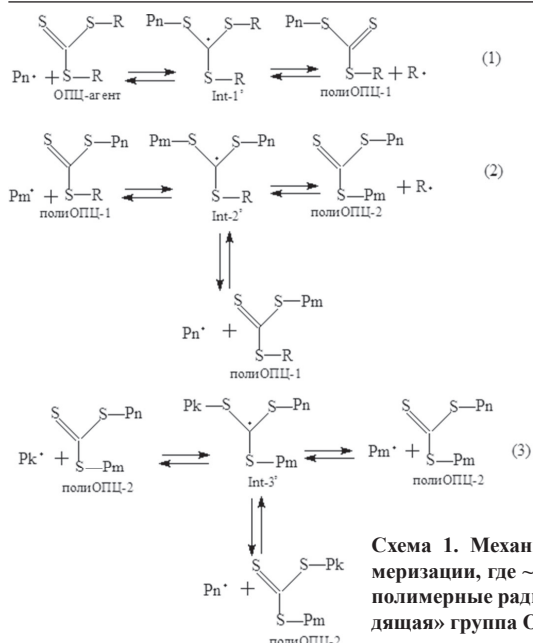


Рис. 1. Зависимость конверсии от времени (а) и M_w/M_n образцов (1) и ММ (2) (б) от конверсии при полимеризации СМА. Условия синтеза: $T = 60^\circ\text{C}$; [СМА/ТГФ] = 10 мол.%; [ОПЦ-2] = 0,2 мол.%; [ДАК] = 0,1 мол.%. 1 – M_w/M_n ; 2 – ММ

На примере полимеризации СМА в присутствии агента ОПЦ-2, в случае применения которого дисперсность имеет наиболее низкие значения, установлено, что полимеризация протекает равномерно, до глубоких конверсий (рис. 1а). Зависимость ММ образцов от конверсии близка к линейной (рис. 1б), а дисперсность ПСМА снижается с ростом степени превращения мономера, что характерно для процессов ОПЦ-полимеризации [17]:



Исследование зависимости молекулярно-массовых характеристик сополимеров СМА с МА, синтезируемых в присутствии агента ОПЦ-2 и выделенных на конверсии 60–70%, от состава мономерной смеси свидетельствует о том, что значения дисперсности изменяются в интервале от 1,64 до 2,0 в зависимости от состава мономерной смеси и снижаются с ростом конверсии.

Аналогичные закономерности характерны и для сополимеризации СМА с МА в присутствии другого агента передачи цепи – ОПЦ-3 (рис. 2). Процесс полимеризации протекает равномерно до высокой конверсии, зависимость ММ образцов с увеличением конверсии близка к линейной, что характерно для процессов, протекающих в контролируемом режиме [6].

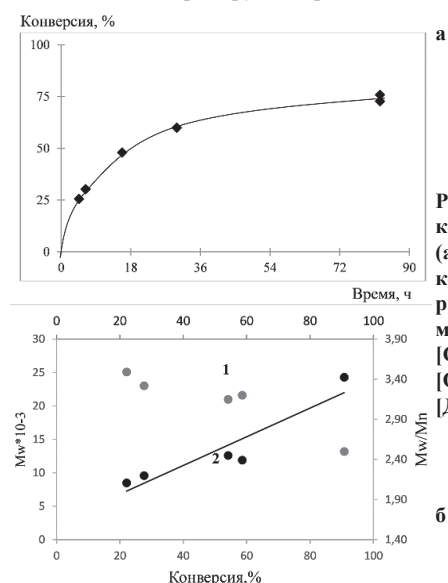


Рис. 2. Зависимость конверсии от времени (а) и ММ образцов (б) от конверсии при сополимеризации СМА – МА (50/50 мол.%): $T = 60^\circ\text{C}$; [СМА/ТГФ] = 10 мол.%; [ОПЦ-3] = 0,2 мол.%; [ДАК] = 0,1 мол.%.

Дисперсность образцов сополимера СМА-МА снижается с ростом конверсии, при этом значения M_w/M_n достаточно высокие для процессов, протекающих в режиме «живых» цепей [16, 17]. Причем сравнительный анализ дисперсности гомополимера СМА и его сополимера с МА свидетельствует о том, что введение звеньев ангидрида приводит к уменьшению конверсии и росту дисперсности синтезированных образцов, которая, как указывалось выше, снижается с ростом степени превращения мономеров в полимер (рис. 2б).

Полученные сополимеры СМА-МА были охарактеризованы спектральными методами. Так, исследование методом ИК-спектроскопии показало наличие характеристических полос в области 1784 см^{-1} , соответствующих валентным колебаниям сложного эфира, а также появление полос поглощения ангидридной группы в области 1857 см^{-1} . Количественный состав синтезированных сополимеров был установлен с использованием ^1H ЯМР-спектроскопии по анализу интенсивности сигналов, соответствующих химическим сдвигам характеристических протонов СМА и МА:

3,6–3,8 ppm ($-\text{OCH}_2-$) метиленовых протонов звеньев СМА и 2,6–3,0 ppm от метиновых протонов малеинового ангидрида, соответственно (табл. 2).

Таблица 2. Зависимость состава некоторых сополимеров СМА-МА от состава мономерной смеси. Условия синтеза сополимеров аналогичны приведенным на рис. 2.

Соотношение мономеров в исходной смеси, мол. %		Соотношение звеньев в сополимере, мол. %		Конверсия сополимера, %
СМА	МА	СМА	МА	
50	50	64	36	69
70	30	67	33	63

Синтезированные полимеры СМА были апробированы в качестве присадок к дизельному топливу. Установлено, что введение полимерных присадок в гидроочищенное ДТ способствует незначительному улучшению его низкотемпературных свойств. Так, при введении в ДТ присадки на основе ПСМА температура застывания снижается с минус 14 до минус 16°C , т.е. депрессорный эффект для температуры застывания (разница между температурой застывания топлива без присадки и в её присутствии) составляет 2°C . При использовании в качестве присадок сополимеров СМА-МА установлено, что они обладают несколько большим депрессорным эффектом (табл. 3). В частности, сополимер, содержащий 33 мол.% МА, снижает температуру помутнения ДТ от минус 8,0 до минус $14,3^\circ\text{C}$. При этом предельная температура фильтруемости топлива снижается от минус 9,2 до минус 15°C . В свою очередь температура застывания дизельного топлива также существенно понижается.

Таблица 3. Зависимость депрессорного эффекта для низкотемпературных свойств дизельного топлива от состава сополимера СМА-МА, синтезированного в присутствии агента ОПЦ-2. Концентрация вовлекаемых присадок (сополимеров) 1600 ppm.

Состав сополимера СМА:МА	M_n	M_w/M_n	Депрессорный эффект, градусы $^\circ$		
			$T_{\text{помутнения}}$	$T_{\text{застывания}}$	$T_{\text{предельной фильтруемости}}$
ПСМА (100:0)	20900	1,95	0,4	2,0	0
61:39	21000	2,02	5,0	5,3	3,5
67:33	24100	1,80	6,3	8,0	5,8

Одной из важнейших особенностей сополимеров на основе МА является возможность их модификации за счет внедрения в макромолекулы звеньев различной природы: фрагментов спиртов, аминов и т.п. [5]. В частности, известно, что высокой депрессорной активностью обладают производные сополимеров МА, содержащие длинные боковые цепи (C_{16} и более). Длинные алкильные фрагменты модифицированного сополимера на основе МА, содержащие полярные карбоксильные группы в своем составе, могут входить в структуру кристаллической упаковки парафинового зародыша, при этом полярные фрагменты способны формировать своеобразный барьер, препятствующий слипанию слоёв парафина и последующей кристаллизации [18], и тем самым могут снижать значения температур застывания и предельной фильтруемости топлива.

В этой связи нами была проведена модификация полученных сополимеров СМА-МА ундекановой кислотой и октанолом-1 и исследовано влияние модифицированных продуктов на низкотемпературные свойства ДТ.

Модификация сополимера СМА-МА ундекановой кислотой проведена согласно схеме 2, приведенной ниже.

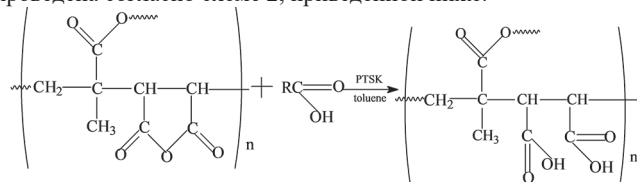


Схема 2. Модификация сополимера СМА-МА кислотой.

Структура синтезированного продукта охарактеризована методом ^1H ЯМР-спектроскопии. При сравнении спектров ^1H ЯМР установлено, что в области 11,3 ppm наблюдается характерный пик, соответствующий карбоксильной группе, тогда как сигнал в области 2,6–3,0 ppm, характерный для малеинового ангидрида, отсутствует, что свидетельствует о протекании реакции раскрытия цикла МА.

Сравнительный анализ низкотемпературных свойств ДТ в присутствии исследуемых сополимеров СМА-МА, в том числе модифицированных ундекановой кислотой (табл. 4), указывает

на то, что модифицированный и немодифицированный сополимеры оказывают практически одинаковое влияние на низкотемпературные показатели гидроочищенного ДТ. Температура застывания дизельного топлива понижается на 7–8°C по сравнению с топливом без добавок. Эффект от проведенной модификации сополимера составляет менее 2°C.

Таблица 4. Низкотемпературные свойства ДТ в присутствии сополимеров СМА-МА. Концентрация вовлекаемой присадки 1600 ppm.

Состав полимерной присадки	ММ присадки/ M_w/M_n	Низкотемпературные свойства ДТ		
		$T_{\text{помутнения, } ^\circ\text{C}}$	$T_{\text{застывания, } ^\circ\text{C}}$	$T_{\text{пред. фильтр., } ^\circ\text{C}}$
ДТ	–	минус 8,4	минус 14,5	минус 9,9
ДТ + сополимер СМА-МА	15200/1,71	минус 13,8	минус 21,4	минус 14,4
ДТ + присадка СМА-МА, модифицированная ундекановой к-той	11600/1,42	минус 13,7	минус 22,3	минус 14,6
ДТ + присадка СМА-МА, модифицированная октанолом-1	15600/1,87	минус 15,0	минус 33,1	минус 15,7

Модификация сополимера СМА с МА октанолом-1 проведена по методике, аналогичной описанной в прописи [13], схема 3:

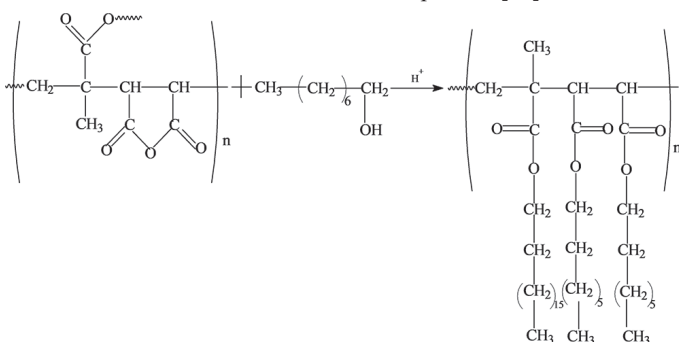


Схема 3. Модификация сополимера СМА-МА октанолом-1.

Протекание реакции спирта с ангидридной группой в сополимере, приводящее к раскрытию цикла, как и в случае описанной выше модификации ундекановой кислотой, подтверждено анализом продукта реакции (3) методом ^1H ЯМР-спектроскопии. По интегральным интенсивностям сигналов, соответствующих суммарному содержанию метиленовых протонов при атоме кислорода в сложнэфирных группах СМА и модифицированных звеньев октанолом-1 (область 3,8–4,1 ppm), а также на основании интенсивности сигнала в области 1,27 ppm, суммарно относящегося к оставшимся метиленовым группам СМА и октанола-1 эфирных фрагментов и метиленовым звеньям СМА основной цепи сополимера, установлено, что модификация сополимера СМА-МА составила 25%.

Исследовано влияние полученного модифицированного продукта на низкотемпературные показатели ДТ и установлено, что модифицированный октанолом-1 сополимер значительно улучшает низкотемпературные свойства топлива (табл. 4). Депрессорный эффект для температуры застывания составляет 19°C. Вероятно, данный эффект связан с изменением структуры сополимера. В частности, длинные октильные фрагменты в модифицированном сополимере СМА-МА способны создавать стерические препятствия для слипания парафинов, тем самым понижая температуру застывания ДТ. Одновременно модифицированные октанолом-1 сополимеры значительно снижают температуру помутнения и предельную температуру фильтруемости топлива, что имеет важное практическое значение.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что метод обратной передачи цепи перспективен в плане синтеза сополимеров СМА с МА с высокой конверсией. На примере 2-цианоизопропилдодецилтретиокарбоната и S,S' -бис-(α,α -диметилуксусная кислота)третиокарбоната показано, что ОПЦ-агенты, содержащие третичные радикалы, связанные с серосодержащим мостиком, наиболее эффективны в плане синтеза сополимеров

СМА-МА. Оценено влияние синтезированных полимеров на низкотемпературные свойства гидроочищенного дизельного топлива и выявлено, что сополимеры СМА с МА обладают лучшим депрессорным эффектом по сравнению с гомополимерами СМА. С целью повышения эффективности влияния синтезированных сополимеров на низкотемпературные свойства топлива проведена их модификация ундекановой кислотой и октанолом-1. Установлено, что модифицированный октанолом-1 сополимер СМА с МА обладает высоким депрессорным эффектом, значительно снижая значения температур помутнения и замерзания, а также температуры предельной фильтруемости дизельного топлива. В частности, модифицированная присадка позволяет снижать температуру застывания гидроочищенного дизельного топлива от минус 14,5°C до минус 33,1°C. В этой связи она может представлять интерес в плане практического применения в качестве депрессорной присадки и перспективной альтернативы используемому в настоящее время импортным товарным депрессорно-диспергирующим присадкам к гидроочищенному дизельному топливу.

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-23-00130).

Благодарности. Авторы признательны д.х.н. Зайцеву С.Д. за предоставление методики синтеза 2-цианоизопропилдодецилтретиокарбоната.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Литература

- James G. Speight. Handbook of Petrochemical Processes. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2019. 578 p.
- Ивченко П.В., Нифантьев И.Э. // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2018. Т. 60. №5. С.384–401. <https://doi.org/10.1134/S2308112018050061>.
- Гришин Д.Ф. // Нефтехимия. 2017. Т. 57. №5. С. 489–502. <https://doi.org/10.7868/S0028242117050094>.
- Данилов А.М. // Нефтехимия. 2015. Т. 55. №3. С. 179–189. <https://doi.org/10.7868/S0028242115030028>.
- Chen F., Liu J., Yang T., Yin S., Su B., Xie M., Dai B., Han S., Xue Y. // Fuel. 2020. V. 268. N 10. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117392>.
- Гришин Д.Ф., Гришин И.Д. // Успехи химии. 2021. Т. 90. №2. С. 231–264. <https://doi.org/10.1070/RCR4964>.
- Yin-Ning Zhou, Jin-Jin Li, Tian-Tian Wang, Yi-Yang Wu, Zheng-Hong Luo // Progress in Polymer Science. 2022. V.130. N 101555. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2022.101555>.
- Зинина Н.Д., Шеянова А.В., Фаерман В.И., Гришин Д.Ф. // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2015. №10. С. 14–19.
- Иванова Л.В., Оганесян А.Н., Сорокина А.С., Буров Е.А., Кошелев В.Н. // Бутлеровские сообщения. 2021. Т. 67. №8. С. 61–67. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/21-67-8-61>.
- Сивохин А.П., Казанцев О.А., Ширшин К.В., Арифиллин И.Р., Мойкин А.А., Луконин В.П. // Пластические массы. 2015. №11–12. С. 13–16.
- Chong Y.K., Moad G., Rizzardo E., Tang S.H. // Macromolecules. V. 40. N13. P. 4446–4455. doi:10.1021/ma062919u.
- Gordon A.J., Ford R.A. The Chemist's Companion: A Handbook of Practical Data, Techniques, and References. New York: John Wiley and Sons, Inc. 1973. 560 p.
- Sruthi H., Dalimba U.K., Hegde P., Manjunatha M.G., Nandakumar V. // Petroleum Chemistry. 2022. V. 62. N9. P. 1126–1136. <https://doi.org/10.1134/S0965544122090146>.
- Pei Y., Sugita O.R., Thurairajah L., Lowe A.B. // RSC Advances. 2015. V. 5. N 23. P. 17636–17646. DOI: 10.1039/c5ra00274e.
- György C., Hunter S.J., Girou C., Derry M.J., Armes S.P. // Polym. Chem. 2020. V.11 N 28. P. 4579–4590. DOI: 10.1039/d0py00562b.
- RAFT polymerization. Methods, synthesis and applications. Moad G., Rizzardo E. (Eds.). V. 1. Weinheim: Wiley-VCH, 2022. 1240 p.
- Sébastien Perrier // Macromolecules. 2017. V. 50. N19. P. 7433–7447. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.7b00767>.
- Буров Е.А., Иванова Л.В., Кошелев В.Н., Санджиева Д.А., Саркисов С.А., Джусубалиева Ц.О. // Химия и технология топлив и масел. 2021. №1 (623). С. 11–16. <https://doi.org/10.1007/s10553-021-01223-0>.