

УДК 678.074

**Н. Р. Прокопчук, Э. Т. Крутько, М. В. Журавлева, А. И. Глоба**  
Белорусский государственный технологический университет

### **МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ПОЛИКАПРОАМИД И КЛЕЙ-РАСПЛАВ НА ЕГО ОСНОВЕ**

Синтезированы бис-малеинамидокислота и бис-малеинимид на основе мета-фенилендиаминна, которые использованы для химической модификации поликапроамида. Приведены данные по исследованию термостабильности композиций поликапроамида, модифицированного имидо-содержащим соединением, а также прочностные характеристики полученных композиций. Найдены оптимальные составы ингредиентов полиамидных композиций, использованных в качестве клея-расплава. Показано, что введение бис-малеинамидокислот, промежуточных соединений синтеза бис-малеинимидов, оказывает такой же модифицирующий эффект, как и бис-малеинимид.

Методом ИК спектроскопии установлено, что в процессе химической модификации ПА-6 бис-амидокислотой протекают реакции, приводящие к увеличению молекулярной массы ПА-6, а также гомополимеризация МФБМИ. Это обусловлено способностью двойных связей в МФБМИ активироваться соседними карбонильными группами имидного цикла и раскрываться при взаимодействии с соединениями, содержащими подвижный атом водорода (амидогруппы в элементарных звеньях ПА-6). Расчет энергии активации термоокислительной деструкции полученных образцов также свидетельствует о формировании в структуре матрицы полимера поперечных сшивок за счет модифицирующей добавки. В совокупности эти процессы приводят к изменению надмолекулярной структуры ПА-6, обуславливая изменения механических, термических и адгезионных свойств полимера.

**Ключевые слова:** полиамид-6, бис-малеинимид, бис-малеинамидокислота, химическая модификация, клей-расплав.

**N. R. Prokopchuk, E. T. Krutko, M. V. Zhuravleva, N. I. Hloba**  
Belarusian State Technological University

### **MODIFIED POLYCAPROAMIDE FOR THE HOT MELT ADHESIVE**

Bis-maleamidacid and bis-maleimide has been synthesized on the basis of meta-phenylenediamine, which were used for the chemical modification of polycaproamide (PA-6). The paper contains the thermostability analysis and strength characteristics of compositions of polycaproamide modified by imido-containing compounds. The optimal content of the ingredients of the polyamide compositions for the hot melt adhesive have been found. It has been shown that the introduction of bis-maleamidacids, intermediates of the synthesis of bis-maleimides, has the same modifying effect as bis-maleimide.

According to the IR spectroscopy method during the chemical modification of PA-6 by a bis-maleamidacid, reactions leading to an increase in the molecular weight of PA-6 occur, as well as homopolymerization of the bis-maleimide. This is due to the ability of double bonds in bis-maleimide to be activated by neighboring carbonylic groups of the imide ring and to be revealed when interacting with compounds containing a mobile hydrogen atom (amido group in the elementary units of PA-6). Calculation of the activation energy of the thermooxidative destruction of the obtained samples also attests to the formation of crosslinks in the polymer matrix structure due to a modification additive. Together, these processes lead to a change in the supramolecular structure of PA-6 and change the mechanical, thermal and adhesion properties of the polymer.

**Key words:** polyamide-6, bis-maleimide, bis-maleinamidacid, chemical modification, hot melt adhesive.

**Введение.** Одним из эффективных путей целенаправленного регулирования свойств промышленно выпускаемых полиамидов является их химическая модификация полифункциональными реакционноспособными соединениями [1]. Наличие в макромолекулах полиамидов карбоксильных, амидных и аминок групп, способных взаимодействовать с полифункцио-

нальными мономерными и олигомерными модификаторами, дает возможность получения материалов, обладающих свойствами сшитых полимеров с повышенными адгезионными характеристиками к различным субстратам, устойчивостью к воздействию термоокислительных и агрессивно действующих сред и др. Известно, например, что имидосодержащие

соединения, в частности N,N'-бис-малеинимиды (БМИ), являются эффективными модификаторами многих полимеров, в том числе и алифатических полиамидов [2].

**Основная часть.** Целью данной работы является получение и исследование композиций на основе поликапроамида (ПА-6), промышленно производимого на ОАО «Гродноазот» (г. Гродно, Республика Беларусь) (ОСТ 6-06-09-93), модифицированных промежуточным продуктом синтеза БМИ – N,N'-бис-малеамидокислотой мета-фенилендиамина (МФБМАК). Модифицирующей реагент вводился в ПА-6 в дозировках 5–10 мас. %. Выбор МФБМАК, как и ранее БМИ [3], обусловлен высокой реакционной способностью реагента, связанной с содержанием в молекулах как двойных связей, способных раскрываться при термо- или фотообработке с образованием пространственной сшитой структуры полимера, так и свободных карбоксильных групп. Последние могут реагировать с концевыми аминными и амидными фрагментами макромолекул полимера.

Синтез МФБМАК осуществляли взаимодействием мета-фенилендиамина с малеиновым ангидридом при 20–25°C путем постепенного прибавления к раствору диамина в минимальном количестве растворителя (диметилформамид, диметилацетамид, диметилсульфоксид, N-метилпирролидон или их смеси) стехиометрического количества малеинового ангидрида. Для получения соответствующего бис-малеинида проводили вторую стадию (имидазацию) бис-амидокислоты нагреванием ее в имидазирующей смеси, состоящей из уксусного ангидрида и ацетата натрия в соотношении 2,5 : 0,5 моль на моль бис-амидокислоты при 70–90°C. По окончании имидазации (примерно через 2,5 ч нагревания) МФБМИ выделяли и перекристаллизовывали из смеси этилового и *n*-пропилового спиртов, взятых в соотношении 1 : 1. Необходимо отметить, что выход промежуточного продукта (МФБМАК) на первой стадии синтеза составляет 85–90%, а конечного продукта после имидазации (МФБМИ) составляет лишь 50–60%. Температура плавления синтезированного N,N'-метафенилен-бис-малеинида составляла 203°C, что соответствовало литературным данным [4]. МФБМАК при нагревании в процессе определения температуры плавления переходит в МФБМИ и температура плавления этого соединения четко не фиксируется.

Важно отметить, что перспектива использования в качестве модифицирующего компонента поликапроамида МФБМАК вместо МФБМИ позволяет исключить из процесса синтеза МФБМИ стадию высокотратной химической

циклодегидратации (имидазации) МФБМАК, кроме того, исключаются потери продукта в процессе его превращения в бис-имида на конечной стадии синтеза, а в процессе имидазации выделяется вода, способствующая разрушению циклических структур в системе полимера.

Для исследования процессов, происходящих в системе полимер – модификатор, а также оценки полноты расходования реакционноспособных групп МФБМАК при взаимодействии с амино- и амидными функциональными группами ПА-6 в ходе формирования трехмерной структуры при нагревании образцов использовали ИК Фурье-спектрометр Nicolet 7101 (США) в диапазоне 4000–300 см<sup>-1</sup>, разрешение 1 см<sup>-1</sup>. Кроме того, возможность формирования межмолекулярных сшивок подтверждали методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Спектры ЭПР снимали с использованием модифицированного спектрометра РЭ-1306 с компьютерным обеспечением. Процесс нагревания полиамидных композиций, модифицированных МФБМАК, осуществляли в резонаторе спектрометра в интервале температур 20–250°C. Перед регистрацией спектров образцы охлаждали до комнатной температуры. В качестве внешнего стандарта использовали MnO, содержащий ионы Mn, в качестве метки – нитроксильные радикалы. Например, свидетельством более эффективного структурирования в системе полиамидных композиций, содержащих в качестве модифицирующей добавки МФБМАК, по сравнению с МФБМИ является то, что время корреляции стабильного нитроксильного радикала, вводимого в модифицированный МФБМАК ПА-6, возрастало с  $23 \cdot 10^{-10}$  с (исходный немодифицированный ПА-6) до  $50 \cdot 10^{-10}$  с у ПА-6, модифицированного 5 мас. % МФБМАК. Для ПА-6, модифицированного таким же количеством МФБМИ, время корреляции нитроксильного радикала составляло значительно меньший период –  $40 \cdot 10^{-10}$  с.

Сравнительный анализ ИК спектров поглощения полученных в безвоздушной среде композиций ПА-6 и МФБМАК различного состава (5–10 мас. % модифицирующей добавки МФБМАК) в расплаве полимера с последующим прогревом образцов при 150–210°C показал, что для модифицированных полимерных систем наблюдается снижение оптической плотности полос поглощения в области 1647 см<sup>-1</sup>, характерное для амидных групп. Вероятно, в процессе химической модификации ПА-6 бис-амидокислотой, также как и при модификации его соответствующим бис-имида, протекают реакции, приводящие к увеличению молекулярной массы ПА-6 как за счет взаимодействия карбоксильных групп бис-амидокислоты

модификатора с концевыми аминогруппами полиамида, так и за счет образования межцепных сшивок (раскрытие двойных связей образующегося в процессе термообработки при 150–200°C МФБМИ) в системе модифицированных поликапроамидных композиций. При этом не исключается и гомополимеризация МФБМИ, что обусловлено способностью двойных связей в МФБМИ активироваться соседними карбонильными группами имидного цикла и раскрываться при взаимодействии с соединениями, содержащими подвижный атом водорода (амидогруппы в элементарных звеньях ПА-6). В совокупности эти процессы приводят к изменению надмолекулярной структуры ПА-6, обуславливая изменения механических, термических и адгезионных свойств полимера [1].

В связи с этим оправдано использование в качестве модифицирующего компонента алифатических полиамидов МФБМАК и МФБМИ, тем более что МФБМИ, а соответственно и МФБМАК как его промежуточный продукт, в настоящее время вполне доступны и широко используются для получения термостойких композиционных материалов, а также для повышения адгезии корда к резиновой массе в резинотехнических производствах.

Эффективность модифицирующего действия МФБМАК в процессах термоокислительной деструкции композиций ПА-6 оценивалась на образцах трех типов: модельных модифицированных МФБМАК порошкообразных композициях, пленках, литевых образцах.

Модельные модифицированные порошкообразные композиции ПА-6 готовились с целью проведения экспресс-анализа возможного стабилизирующего действия МФБМАК на полимерную матрицу. Их получали следующим образом: гранулы нестабилизированного ПА-6 помещали в смеситель, куда подавался азот для обеспечения бескислородной среды. Температуру повышали до 240°C и включали мешалку. При непрерывном перемешивании в расплав полимера вводили расчетное количество МФБМАК. Смесь перемешивали в течение 5 мин. Затем сливали в форму и охлаждали. После отверждения образец извлекали из формы и дробили при криогенной температуре (после выдержки в течение 10 мин в среде жидкого азота при –180°C) в тонкодисперсный порошок. Исследование термостойкости осуществляли с помощью дифференциального термического и термогравиметрического анализа, проводимого на термоаналитической установке фирмы Mettler Toledo (Швейцария) в интервале температур 330–400°C. Среда испытания – воздух. Навеска образца – 200 мг, скорость нагревания в диапазоне 20–500°C – 5 град/мин. Энергия активации

термоокислительной деструкции полимера  $E_d$  рассчитывалась по методу Бройдо [3].

Лабораторные образцы полиамидных пленок толщиной 15–20 мкм отливали из растворов ПА-6 в муравьиной кислоте. Для получения растворов навеску полимера (2 г) с относительной вязкостью 2,8 (определяли в растворе концентрированной серной кислоты) растворяли при комнатной температуре в 28 мл муравьиной кислоты, после чего в раствор вводили расчетное количество МФБМАК и тщательно перемешивали. Затем на обезжиренные и высушенные стеклянные пластинки методом полива через фильеру с регулируемым зазором наносился слой пленкообразующей композиции. Стеклянные пластинки помещали строго горизонтально в вакуумный сушильный термощкаф, где при остаточном давлении 2 мм рт. ст. и температуре не выше 30°C в течение 4–5 ч удалялся растворитель. Сформированную на стеклянной подложке полиамидную пленку снимали и подвергали исследованиям.

Образцы получали также методом литья под давлением следующим образом: модификатор МФБМАК в количестве 5–10 мас. % от массы ПА-6 наносили на гранулы полимера без термостабилизатора с относительной вязкостью 2,8 методом опудривания. Опудренные гранулы засыпали через бункер в литьевую машину, где они расплавлялись. Из расплавленной массы отливали двухсторонние лопатки с рабочей частью 50×10×3 мм. Экспериментальные образцы через сутки после их изготовления помещали в термокамеру со свободной циркуляцией воздуха, где выдерживали при температуре 150°C в течение заданного времени (30–210 ч). Определения разрывной прочности образцов осуществляли методом растяжения по ГОСТ 112–80 на разрывной машине Т 2020 ДС 10 SH (Alpha Technologies UK, США) при комнатной температуре и скорости перемещения захватов 100 мм/мин. Судя по результатам измерений разрывной прочности образцов, приведенным в табл. 1, формируемая на стадии термической обработки полиамидных композиций сетчатая структура алифатического ПА-6 за счет реакционноспособных групп МФБМАК (содержание в композиции 5–10 мас. %) и функциональных групп ПА-6 предопределяет более высокие показатели термостойкости (температура термоокислительной деструкции  $T_d$  возрастает на 10–15°C) и деформационно-прочностных свойств (прочность при разрыве возрастает почти на 10 МПа у исходных модифицированных образцов, составляя 64,0–68,0 МПа) по сравнению с немодифицированным ПА-6 (59,0 МПа) и сравнима с ПА-6, модифицированным бисмалеинимидом (МФБМИ).

Таблица 1

**Прочность при разрыве ПА-6 и модифицированных МФБМИ и МФБМАК образцов ПА-6 после термоокисления на воздухе при температуре 150°C в течение 30–210 ч**

Материал	Прочность при разрыве, МПа, после термоокисления на воздухе в течение, ч								$T_d$ , °C	$E_d$ , кДж/моль
	0	30	60	90	120	150	180	210		
ПА-6	59,0	50,0	49,0	41,0	35,5	30,5	23,0	18,6	275	120
ПА-6+ 5 мас. % МФБМАК	64,0	66,5	64,0	61,4	61,0	61,5	61,0	60,0	285	135
ПА-6 + 10 мас. % МФБМАК	68,0	69,0	69,5	62,4	62,0	63,4	63,0	61,0	290	148
ПА-6 + 5 мас. % МФБМИ	63,4	64,6	63,0	62,6	62,0	62,0	61,4	60,7	287	141

Важно отметить, что МФБМАК, также как и МФБМИ, оказывает термостабилизирующее действие на полиамид-6 при различных температурно-временных экспозициях образцов полимерных композиций. Расчет энергии активации термоокислительной деструкции полученных образцов ( $E_d$ ) также свидетельствует о формировании в структуре матрицы полимера поперечных сшивок за счет модифицирующих добавок МФБМАК и МФБМИ, возрастающая в зависимости от содержания модификатора МФБМАК от 135 до 148 кДж/моль.

Как видно из табл. 1, модифицированный бис-малеамидокислотой поликапроамид обладает не только улучшенными прочностными характеристиками по сравнению с исходным ПА-6, но и более высокой устойчивостью к воздействию температурно-временных полей.

Таким образом, использование в качестве модифицирующей добавки в системе алифатического ПА-6 бис-амидокислоты (МФБМАК) обеспечивает улучшение прочностных свойств и термических характеристик полимерного материала практически в тех же пределах, что и ранее используемый для этих же целей БМИ, что явилось предпосылкой возможности использования в рецептуре клея-расплава на основе поликапроамида более доступной полифункциональной модифицирующей добавки МФБМАК.

Клеи-расплавы на полимерной основе используются для склеивания деталей из древесных материалов, тканей, бумажных пленок, предварительного крепления деталей обуви и т. д.

Известны различные клеи-расплавы на основе полиамидных смол, полученных путем сополимеризации гексаметилендиаммонийадипината с  $\epsilon$ -капролактамом (смола П-54), гексаметилендиаммонийсебагинатом и  $\epsilon$ -капролактамом (смола П-548), а также на основе смесей этих сополимеров. Известен клей-расплав, включающий полиамидную смолу, глицерин, фталевый ангидрид, триметилпропан [5].

Известна клеевая композиция [5], содержащая полиамидную смолу, пластификатор, стеариновую кислоту, адипиновую кислоту, продукт конденсации гексаметилендиамина с адипиновой кислотой, канифоль, стабилизатор.

Общий недостаток используемых клеев – низкая адгезия к склеиваемым материалам. С целью получения клеев-расплавов на основе промышленно производимого в Республике Беларусь ПА-6 (поликапроамида) с повышенными адгезионными свойствами к склеиваемым элементам изделий, например кожи, используемой в производстве обуви, было проведено исследование влияния добавки 1,0–2,0 мас. % МФБМАК в клеевую рецептуру состава:

- поликапроамид (полиамид-6) – 90,0–97,0;
- терефталевая кислота – 1,0–5,0;
- модифицированная канифоль – 1,0–3,0.

Клей готовили следующим образом: в реактор при температуре 260–270°C в токе инертного газа (азота) вводили последовательно поликапроамид (полиамид-6) и терефталевую кислоту, перемешивали 10–15 мин, затем вводили МФБМАК и температуру в зоне реакции снижали до 210–220°C, затем загружали модифицированную канифоль и содержимое реактора гомогенизировали при перемешивании компонентов системы. Общее время синтеза составляло 25–30 мин.

В качестве модифицированной канифоли использовали талловую канифоль, содержащую 3–5% фумаровой кислоты.

Ток предварительно осушенного инертного газа необходим для исключения контакта расплавленной смеси компонентов с кислородом воздуха и влагой, содержащейся в воздухе, для предотвращения термоокислительной деструкции компонентов и исключения гидролитической деструкции поликапроамида.

За счет особенностей структуры МФБМАК, по-видимому, возможно более эффективное структурирование системы в процессе формирования клеевого шва, что обеспечивает увеличение его адгезионной прочности к субстратам путем образования дополнительных химических связей по сравнению с известными аналогами.

Готовый клей сливают из реактора и охлаждают (под азотной подушкой), затем измельчают. В табл. 2 представлены примеры состава ряда исследованных композиций клея-расплава и его свойства, а также клея-расплава, выбранного в качестве прототипа для сравнения.

Таблица 2

## Состав и свойства клея-расплава

Состав полимерной композиции, мас. %					Предел прочности при сдвиге, МПа		Предел прочности при расслаивании, кгс/см <sup>2</sup>		Температура размягчения, °С	
ПА-6	Терефталевая кислота	Модифицированная канифоль	Малеинимидное производное полиамина		Предлагаемый клей-расплав	Прототип	Предлагаемый клей-расплав	Прототип	Предлагаемый клей-расплав	Прототип
			МФБМАК	МФБМИ (для сравнения)						
97,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,9	2,7	2,1	1,9	219	220
92,5	1,0	6,0	0,5	0,5	2,5	2,3	1,2	1,1	219	220
92,5	3,0	1,0	0,5	0,5	3,4	3,0	3,1	2,8	199	200
95,0	3,0	1,0	1,0	1,0	3,6	3,1	4,0	3,6	210	210
93,50	3,0	3,0	0,5	0,5	3,8	3,3	3,9	3,4	194	195
93,0	3,0	3,0	1,0	1,0	3,9	3,7	4,5	4,1	200	200
92,0	3,0	3,0	2,0	2,0	3,3	3,2	3,9	3,6	205	205
90,0	3,0	6,0	0,5	0,5	3,0	2,9	1,9	1,6	191	190
93,5	3,0	1,0	0,5	0,5	2,6	2,4	2,4	2,2	184	185

Адгезионную прочность оценивали путем испытания склеек на расслаивание и сдвиг по известным методикам. Для приготовления клеевых соединений использовали кожу для верха обуви (ГОСТ 939–88). Испытания проводили на разрывной машине З-05. Температуру размягчения определяли методом кольца и шара по ГОСТ 11506–73.

Из данных табл. 2 видно, что предел прочности при расслаивании и предел прочности при сдвиге клеевого шва у предлагаемой композиции клея-расплава для всех сравниваемых примеров несколько выше, чем у композиции прототипа, при практически одинаковых температурах размягчения.

Повышенные адгезионные характеристики изученных композиций клея-расплава обусловлены свойствами образующихся продуктов взаимодействия поликапроамида (поли-

амида-6) с терефталевой кислотой, модифицированной канифолью, МФБМАК за счет особенностей химического строения молекул МФБМАК.

**Заключение.** Таким образом, в результате проведенного исследования показано, что для модификации полиамида-6 можно использовать промежуточный продукт синтеза бис-малеинимида – бис-малеинамидокислоту с тем же модифицирующим эффектом. Это позволяет удешевить процесс получения имидосодержащего полиамида-6 за счет снижения стоимости модификатора. Клей-расплав, полученный с использованием бис-амидокислоты вместо бис-малеинимида, может быть использован на операциях точечного склеивания шпона, монтажного крепления деталей, при облицовывании кромок мебельных щитов и т. п.

## Литература

1. Выгодский Я. С. Анионная полимеризация  $\epsilon$ -капролактама и его сополимеризация с  $\omega$ -додекалактидом в присутствии ароматических полиимидов // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2006. Т. 48. № 6. С. 885–891.
2. Биран В. В. О модифицирующем действии N,N'-бис-имидов ненасыщенных дикарбоновых кислот на алифатические полиамиды // Доклады АН БССР. 1983. Т. 27. № 8. С. 717–719.
3. Broido A., Semple A. Sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data // Polym. Sci. 1969. Part A.2. Vol. 7. No. 10. P. 1761–1773.
4. Воложин А. И., Крутько Э. Т. Синтез N,N'-бис-имидов ненасыщенных циклоалифатических дикарбоновых кислот // Весці АН БССР. Серія хімічных навук. 1974. № 1. С. 98–100.
5. Кардашов Д. А. Синтетические клеи. М.: Химия, 1976. 262 с.

### References

1. Vygodskiy Ya. S. Anionic polymerization of  $\epsilon$ -caprolactam and its copolymerization with  $\omega$ -dodecalactam in the presence of aromatic polyimides. *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [High-molecular compounds], Serie A, 2006, vol. 48, no. 6, pp. 885–891 (In Russian).
2. Biran V. V. The modifying effect of N,N'-bis-imides of unsaturated dicarboxylic acids on aliphatic polyamides. *Doklady AN BSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the BSSR], 1983, vol. 27, no. 8, pp. 717–719 (In Russian).
3. Broido A., Semple A. Sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data. *Polym. Sci.*, 1969, Part A.2, vol. 7, no. 10, pp. 1761–1773.
4. Volozhin A. I., Krut'ko E. T. Synthesis of N,N'-bis-imides of unsaturated cycloaliphatic dicarboxylic acids. *Vestsi AN BSSR. Seryya khimichnykh navuk* [News of the Academy of Sciences of the BSSR. Chemical series], 1974, no. 1, pp. 98–100 (In Russian).
5. Kardashov D. A. *Sinteticheskie klei* [Synthetic adhesives]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 262 p.

### Информация об авторах

**Прокопчук Николай Романович** – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tnsippm@belstu.by

**Крутько Эльвира Тихоновна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ela\_krutko@mail.ru

**Журавлева Мария Викторовна** – научный сотрудник кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: masha\_zhur@mail.ru

**Глоба Анастасия Ивановна** – кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Orion-2308@yandex.ru

### Information about the authors

**Prokopchuk Nicolay Romanovich** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tnsippm@belstu.by

**Krutko Elvira Tihonovna** – DSc (Technology), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ela\_krutko@mail.ru

**Zhuravleva Mariya Viktorovna** – Researcher, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: masha\_zhur@mail.ru

**Hloba Nastassia Ivanovna** – PhD (Chemistry), Senior Lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Orion-2308@yandex.ru

Поступила 15.03.2018