

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-35-43

## ПРИМЕНЕНИЕ АНГИДРИДА ФТАЛЕВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОЙ ДОЛИ ГИДРОКСИЛЬНЫХ ГРУПП В ПОЛИЭФИРЕ 24К

Л.А. Прокопова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация:** Рассмотрена возможность замены ангидрида уксусной кислоты ангидридом фталевой кислоты при определении массовой доли гидроксильных групп в полиэфире 24К. Методом титриметрического анализа получены данные о содержании указанных функциональных групп, согласующиеся с данными более ранних анализов. Полноту протекания реакции контролировали методом инфракрасной спектроскопии, результаты которой свидетельствуют об успешном протекании процесса. Дополнительно проверена реакционная способность продукта с истекшим сроком годности.

**Ключевые слова:** полиэфир, содержание гидроксильных групп, фталевый ангидрид, ИК-спектроскопия, жизнеспособность, входной контроль сырья

**Для цитирования:** Прокопова Л.А. Применение ангидрида фталевой кислоты для определения массовой доли гидроксильных групп в полиэфире 24К // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-35-43.

Scientific article

## PHthalic ANHYDRIDE APPLICATION FOR HYDROXYL GROUPS CONTENTS DETERMINATION IN POLYESTER 24K

Lilia A. Prokopova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract:** The possibility of replacing acetic anhydride with phthalic anhydride when determining the hydroxyl groups contents in polyester 24K is discussed. Titrimetric analysis method obtained data on the content of these functional groups, consistent with previously analyzes. The reaction completeness was controlled by infrared spectroscopy, the results of which report on the successful process flow. Additionally, the reactivity of the product with an expired shelf life was checked.

**Keywords:** polyester, hydroxyl groups contents, phthalic acid anhydride, IR-spectroscopy, expiry, raw materials control

**For citation:** Prokopova L.A. Phthalic anhydride application for hydroxyl groups contents determination in polyester 24K. *Trudy VIAM*. 2022, no. 1 (107), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-35-43.

### Введение

Композиционные материалы – это неоднородные сплошные материалы, состоящие из двух и более компонентов: матрицы и армирующих элементов. В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композиции, не только отражающий исходные характеристики ее компонентов, но и включающий свойства, которыми исходные компоненты по отдельности не обладают. Объем мирового рынка полимерных композитов растет и спрос на них не показывает тенденцию к снижению [1, 2].

Полиэфир 24К – продукт поликонденсации этиленгликоля и глицерина с себадиновой кислотой [3], вследствие чего он является насыщенным сложным полиэфиром и применяется в отечественной промышленности в полиуретановых клеях, которые используются в двигателестроении [4]. Полиуретановые клеи отверждаются путем образования связи между изоцианатным отвердителем и гидроксильной группой полиэфира, а некоторые их свойства обусловлены, в том числе, образованием водородных связей [5]. Несмотря на то, что в основной документации на этот продукт указано применение его в клеевых композициях, в последнее время он, как и другие сложные эфиры, находит все большее применение и в лакокрасочной промышленности [6, 7]. Применение полиэфиров в лакокрасочных составах способствует образованию прочной пленки на различных поверхностях, что повышает срок службы изделий. В патенте [7] при разработке радиопрозрачной полимерной композиции введение полиэфира способствовало наиболее равномерному распределению компонентов в эпоксидном олигомере, что приводило к образованию качественного лакокрасочного покрытия, повышению его водостойкости, адгезионных и физико-механических свойств. Указанные свойства весьма важны при разработке покрытий, стойких к воздействию климата [8].

Простые алифатические полиэфиры применяются в качестве сырья для полиуретановых материалов, которые используются в составах защитных эмалей для авиационной техники [9].

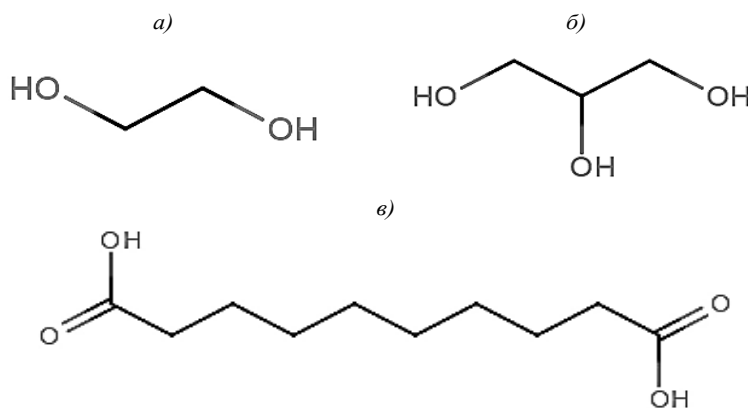


Рис. 1. Исходные компоненты для производства полиэфира 24К: *a* – этиленгликоль; *б* – глицерин; *в* – себадиновая кислота

Поскольку в составе полиэфира 24К содержится не только этиленгликоль (рис. 1, *a*), но и трехатомный спирт глицерин (рис. 1, *б*), поэтому строение молекул указанного полиэфира – разветвленное, что также влияет на свойства композиций на его основе [10]. Кроме гидроксильных групп, в структуре полиэфира содержатся свободные карбоксильные группы, присутствие которых обусловлено его третьим компонентом – себадиновой кислотой (рис. 1, *в*). Их количество характеризуется кислотным числом. Оба указанных вида функциональных групп являются важными показателями качества и влияют на степень сшивки, структуру и свойства получаемых композиций.

Реакционноспособность полиэфира напрямую связана с содержанием функциональных групп. Если функциональных групп будет недостаточно, то образуемая пленка получится непрочной, а при избытке возможны трудности – нестабильность композиции при хранении и переработке. Избыток кислотных или гидроксильных групп также ведет к неполному отверждению композиции. Это может приводить к повышенной гидрофильности, что влечет за собой недостаточную стойкость итоговой пленки вследствие неполного использования функциональных групп, а также приводит к снижению стабильности при хранении [11]. Таким образом, определение содержания функциональных групп является одним из важных испытаний этого вида сырья.

Определение массовой доли гидроксильных групп можно проводить различными методами – химическими и физико-химическими. Физико-химический метод анализа заключается в построении градуировочного графика зависимости оптической плотности раствора глицерина и определении по нему содержания гидроксильных групп в исследуемой композиции [12]. Однако этот метод рекомендуется использовать для эпоксидных смол. Химический же метод предполагает этерификацию гидроксильных групп избытком ангидрида, гидролиз неизрасходованного ангидрида и последующее титрование получившейся в ходе реакции кислоты. В основном стандарте для полиэфира 24К использован именно этот метод анализа, однако в нем применяется искусственный ангидрид (рис. 2, а). Применение этого вещества в настоящее время ограничено, вследствие чего возникает необходимость поиска новых методов анализа, при которых не используется ангидрид уксусной кислоты.

Отмеченный ранее метод ИК-спектроскопии хотя и применяется для количественного определения гидроксильных групп, имеет ряд особенностей, ограничивающих его использование. Присутствие гидроксильных групп приводит к появлению в ИК-спектре широкой и заметной полосы, однако кроме того, в этой области может проявляться обертоном карбонильной группы, которая имеется в молекулах полиэфира [13]. Следует также отметить, что положение полосы валентных колебаний гидроксильной группы в молекуле зависит не только от концентрации, но и от температуры, а кроме того, на него влияют водородные связи, образуемые искомой функциональной группой [14]. При образовании водородных связей внутри димеров или полимеров обычно узкая полоса поглощения свободных гидроксильных групп становится более широкой и может приобретать более сложный контур пиков в диапазоне интересующих исследователя волновых чисел [15]. Совокупность этих факторов мешает количественному определению искомого показателя таким способом.

С учетом вышеизложенного целью данного исследования являлась разработка методики определения гидроксильного числа в полиэфире 24К альтернативным методом и оценка его эффективности.

В качестве реагента для определения гидроксильных групп методом обратного титрования выбран фталевый ангидрид. Это ангидрид двухосновной кислоты, поэтому реакция полиэфира с ним мало исследована.

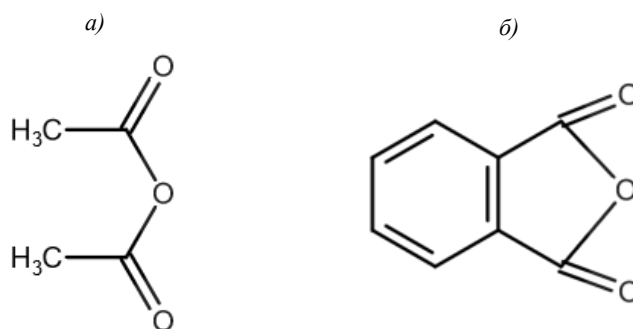


Рис. 2. Химические формулы уксусного (а) и фталевого ангидридов (б)

Фталевый ангидрид (рис. 2, б) в среде пиридина не реагирует с фенольными гидроксилами, но этерифицирует первичные и вторичные спирты [16]. Поскольку фталевый ангидрид из-за своего строения менее реакционноспособен, чем уксусный, то количество стандартов, использующих его для определения гидроксильного числа, также меньше. В работе [17] фталированием в течение 35 мин при температуре 182 °С в пиридине успешно определено гидроксильное число сложного полиэфира после его синтеза (методика разработана Bayer Corp.). Для полиоксиалкильных конденсатов

алифатических и алициклических соединений применяют также фталирующую смесь, в которой на 100 мл пиридина приходится 14 г ангидрида. Реакция фталирования проходит при температуре кипения пиридина (~115 °С). Гидролиз и титрование проводят при комнатной температуре одновременно. Аналогично в отечественном стандарте определяют массовую долю гидроксильных групп в простых полиэфирах для полиуретанов [18]. Для сложных полиэфигов в указанном стандарте рекомендуется применение ангидрида уксусной кислоты, однако причины отказа от этого реактива указаны ранее.

### Материалы и методы

В данной работе исследованы два образца полиэфира 24К после продолжительного хранения в течение 45 и 15 мес с момента изготовления. Гарантийный срок хранения продукта составляет 2 года, однако ГОСТ допускает применение полиэфира после этого срока при соответствии его свойств требованиям стандарта. Производителем проверены показатели качества указанных образцов, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Свойства исследуемых образцов полиэфира 24К

Свойства	Значения свойств для образцов		
	по ГОСТ 22234–76	после 45 мес с момента изготовления (1)	после 15 мес с момента изготовления (2)
Внешний вид	Парафиноподобная масса от серого до темно-серого или коричневого цвета	Парафиноподобная масса серого цвета	
Плотность 50 %-ного раствора полиэфира в ацетоне при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,93–0,94	0,937	0,936
Динамическая вязкость раствора полиэфира в ацетоне с массовой долей 50 % при 20 °С, мПа·с	20–30	27	27
Кислотное число, мг КОН на 1 г полиэфира	8–18	17,0	17,5
Массовая доля гидроксильных групп, %	5,2–8,0	5,3	5,3
Массовая доля воды, %	Не более 0,3	0,1	0,1

Для определения массовой доли гидроксильных групп в полиэфире химическим методом в данной работе в методиках использован ангидрид фталевой кислоты.

*Методика 1.* Реакционную смесь готовили следующим образом: к 14 г фталевового ангидрида добавляли 100 мл безводного свежеперегнанного пиридина и тщательно перемешивали при комнатной температуре. Для реакции использовали ~1,0 г полиэфира, взятого с точностью до 0,0001 г, и 20 мл фталирующей смеси, добавленные пипеткой. После растворения полиэфира колбу с реакционной смесью устанавливали на песчаную баню, закрывали обратным холодильником и нагревали до температуры кипения пиридина (115 °С)\*. Далее, не отсоединяя колбу, через холодильник в нее сливали 20 мл дистиллированной воды и продолжали нагрев\*\*. Затем колбу снимали с бани, охлаждали до комнатной температуры и титровали до появления розовой окраски водным раствором гидроксида натрия с концентрацией 1 моль/л в присутствии 1%-ного спиртового раствора фенолфталеина.

\* В табл. 2 этот процесс указан как время реакции фталирования.

\*\* В табл. 2 этот процесс указан как время гидролиза.

*Методика 2.* Реакционную смесь готовили аналогично методике 1. В 20 мл смеси растворяли ~1,0 г полиэфира 24К, взятого с точностью до 0,0001 г, после чего колбу плотно закрывали притертой пробкой и нагревали в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение 2 ч. Далее колбу с реакционной смесью устанавливали на песчаную баню, закрывали обратным холодильником и нагревали до температуры кипения пиридина. Реакцию проводили в течение 1 ч. По окончании реакции, не отсоединяя колбу, через холодильник в нее сливали 10 мл пиридина, снимали колбу и добавляли 100 мл дистиллированной воды. Момент добавления воды считали началом гидролиза фталевого ангидрида, который проводили в течение 20 ч при комнатной температуре, затем раствор титровали и хорошо перемешивали в колбе. В качестве титранта применяли водный раствор гидроксида натрия с концентрацией 1 моль/л, в качестве индикатора: 1 %-ный спиртовой раствор фенолфталеина. Конечной точкой титрования считали появление розовой окраски, не исчезающей в течение 30 с.

Поскольку в образовании трехмерной матрицы полимера участвуют также остаточные гидроксильные группы себациновой кислоты, то их содержание определяют простым прямым титрованием и именуют кислотным числом [3]. Для полноты информации о качестве полиэфира это число в виде массовой доли кислотных гидроксильных групп прибавляли к массовой доле спиртовых гидроксильных групп, определенных описанным ранее методом фталирования.

Для того чтобы удостовериться в полноте протекания реакции фталирования, получены ИК-спектры исходного полиэфира и полиэфира после реакции с фталевым ангидридом. Раствор фталевого ангидрида в пиридине добавляли к полиэфире, проводили реакцию как описано ранее и после реакции высушивали реакционную смесь в течение 1 сут в следующих условиях: при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 30 %, далее выдерживали непосредственно перед снятием спектра 30 мин в сушильном шкафу при температуре 40 °С. Образец высушивали, так как при проведении исследования раствора полосы поглощения растворителя мешают расшифровке спектра. Высушенные образцы помещали в ИК-спектрометр с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения для записи спектров.

Поскольку количество функциональных групп в полиэфире должно показывать, насколько он реакционноспособен, то проконтролировать это свойство помогают другие показатели качества, описанные в стандарте на продукт, – время пастообразования и жизнеспособность клея на основе полиэфира. В качестве отвердителя применяют толуилендиизоцианат – бифункциональный изоцианат, образующий с гидроксильными группами прочную химическую связь. Время пастообразования – это время между смешением компонентов (50 %-ный раствор полиэфира в ацетоне, отвердитель, портландцемент и вода в качестве катализатора отверждения в соотношении соответственно 16:8:2:0,1) и потерей текучести этой смеси. Непосредственно после смешивания система имеет очень низкую вязкость, а по истечении времени при регулярном перемешивании визуально наблюдается заметный переход в пастообразное состояние.

После этого замеряется жизнеспособность, которую проверяют при нанесении образовавшейся пасты на металлическую пластину. Отсчитывается время от момента пастообразования до потери способности наноситься на означенную пластину вследствие отверждения композиции. Композиция перестает наноситься на пластину, так как теряется адгезия, которая зависит от функциональности компонентов.

### Результаты и обсуждение

Как видно из данных табл. 2, полученных по методике 1, в результате повторения методики из ГОСТ 22234–76 с простой заменой уксусного ангидрида фталевым, реакция не протекает и не дает понимания о содержании гидроксильных групп в образце.

Поэтому метод анализа модифицировали, исходя из информации из других научно-технических литературных источников. В стандарте ASTM D4274–11 [19] при анализе сырья для полиуретанов предлагается выбрать из нескольких методов – в их числе три варианта фталирования. В одном из них гидроксильные группы этерифицируют раствором фталевого ангидрида в пиридине в закрытой колбе при температуре 98 °С, в другом же – над реакционной колбой находится холодильник, а температура реакции равна температуре кипения пиридина. Принято решение скомбинировать эти подходы, получив методику 2. Температуру проведения реакции в закрытой колбе в сушильном шкафу снизили во избежание вылета пробки из-за повышения давления внутри сосуда.

Таблица 2

**Результаты титриметрического определения массовой доли гидроксильных групп в полиэфире 24К после реакции фталирования**

Объем воды, взятой для гидролиза, мл	Время реакции фталирования	Время гидролиза	Массовая доля спиртовых гидроксильных групп, найденная в результате обратного титрования, %, для образца		Суммарная массовая доля гидроксильных групп, %, для образца	
			1	2	1	2
20	30 мин	30 мин	0	0	0,5	0,5
20	1 ч	1 ч	0	0	0,5	0,5
20	2 ч	2 ч	0	0	0,5	0,5
20	2 ч	16 ч	0	0	0,5	0,5
20	2 ч	20 ч	1,1	0,9	1,6	1,4
100	2 ч	20 ч	2,4	2,8	2,9	3,3
100	См. методику 2	20 ч	5,0	5,0	5,5	5,5

Таким образом, выявлено, что полнота протекания реакции значительно зависит от времени, затраченного на саму реакцию фталирования, и от времени, отведенного на последующий гидролиз.

Результаты ИК-спектроскопии высушенных образцов после проведения реакции фталирования приведены на рис. 3.

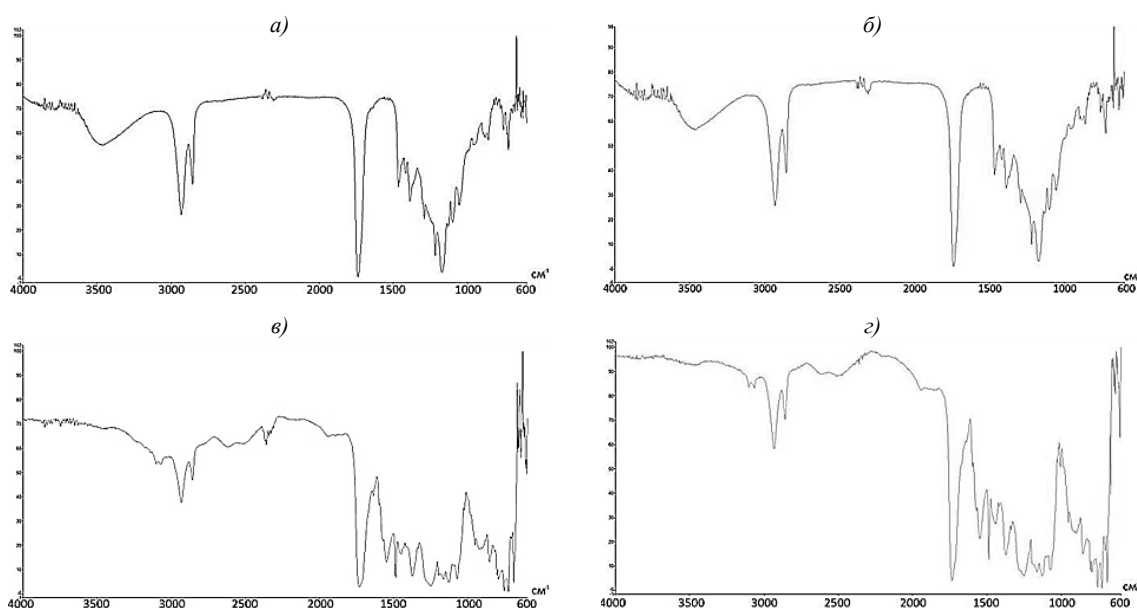


Рис. 3. Инфракрасные спектры полиэфира 24К в исходном состоянии для образцов 1 (а) и 2 (б), а также после реакции фталирования образцов 1 (в) и 2 (г)

Как видно из показанных спектров, у исходных образцов наблюдается широкая полоса поглощения с пиком в области длины волны  $3450\text{ см}^{-1}$  (рис. 3, а, б), что является характеристической частотой для гидроксильной группы. Полоса поглощения расширена, по-видимому, вследствие образования гидроксильными группами водородных связей. Указанный пик исчезает со спектра после проведения реакции фталирования (рис. 3, в, г), что свидетельствует о достаточно полном ее протекании.

В результате проверки времени пастообразования и жизнеспособности клея на основе полиэфира, проведенной в соответствии со стандартом на продукт, получены данные, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты проверки реакционной способности исследуемых образцов полиэфира 24К**

Свойства	Значения свойств для образцов		
	по ГОСТ 22234–76	после 45 мес с момента изготовления (1)	после 15 мес с момента изготовления (2)
Время пастообразования клея на основе полиэфира, мин	10–60	42	33
Жизнеспособность клея на основе полиэфира, ч	3–12	6,5	5,0

Полученные данные свидетельствуют о том, что реакционная способность полиэфира со временем хотя и снижается, но еще остается на уровне, достаточном для признания продукта годным по этому показателю качества.

### Заключения

При помощи анализов и дополнительных исследований материала проверена гипотеза о возможности применения фталевого ангидрида для анализа массовой доли гидроксильных групп в полиэфире 24К, что не отмечалось ранее в научно-технической литературе. Несмотря на то что методика анализа требует более длительного по времени эксперимента, чем предлагается в стандарте на продукт, она применима в условиях отсутствия основного используемого реактива – ангидрида уксусной кислоты. Дальнейшее исследование может расширить применение описанного метода анализа и модифицировать его с целью уменьшения времени проведения реакций и увеличения точности результатов: вследствие использования для титрования раствора высокой концентрации снижается точность определения. Однако описанной методики достаточно для оценки качества продукта, а ее точность совпадает с точностью методики из исходного стандарта. Кроме того, полученные результаты дают дополнительную информацию о жизнеспособности полиэфира после окончания его гарантийного срока годности. Будущие исследования в этой области могут быть также направлены на замену указанных ангидридов другими веществами, способными реагировать со спиртовыми гидроксильными группами в полимерных или олигомерных структурах.

### Список источников

1. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 344–348. DOI: 10/18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
2. Kablov E.N. Chemistry in Aviation Materials Science (Химия в авиационном материаловедении) // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 967–969.

- ГОСТ 22234–76. Полиэфир 24К. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1989. 10 с.
- Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник РАН. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
- Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
- Эпоксиполиэфирная лакокрасочная композиция: пат. 2472830 Рос. Федерация. № 2011140686/05; заявл. 07.10.11; опубл. 20.01.13.
- Полимерная радиопрозрачная композиция: пат. 2570446 Рос. Федерация. № 2014137816/05; заявл. 18.09.14; опубл. 10.12.15.
- Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
- Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
- Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. I. Создание полимерных материалов с дополнительными механизмами диссипации механической энергии при низких температурах // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-50-55.
- Яковлев А.Д. Порошковые краски. Л.: Химия, 1987. 216 с.
- ГОСТ 17555–72. Пластмассы. Методы определения содержания гидроксильных групп в эпоксидных смолах и эпоксидированных соединениях. М.: Изд-во стандартов, 1979. 11 с.
- Наканиси К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений. М.: Мир, 1965. 219 с.
- Сиггиа С. Инструментальные методы анализа функциональных групп органических соединений. М.: Мир, 1974. 464 с.
- Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений: справочные материалы. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 55 с.
- Клайн Г. Аналитическая химия полимеров. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. Т. 1. 592 с.
- Kline B.J., Beckman E.J., Russell A.J. One-step biocatalytic synthesis of linear polyesters with pendant hydroxyl groups // Journal of the American chemical society. 1998. Vol. 120. No. 37. P. 9475–9480. DOI: 10.1021/ja9808907.
- ГОСТ 25261–82. Полиэфиры простые и сложные для полиуретанов. Метод определения гидроксильного числа. М.: Изд-во стандартов, 1982. 5 с.
- ASTM D4274–11. Standard Test Methods for Testing Polyurethane Raw Materials: Determination of Hydroxyl Numbers of Polyols. ASTM International, 2011. 9 с.

#### References

- Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
- Kablov E.N. Chemistry in Aviation Materials Science. *Russian Journal of General Chemistry*, 2011, vol. 81, no. 5. P. 967–969.
- State standart 22234–76. *Polyester 24K. Specifications*. Moscow: Publishing house of standards, 1989, 10 p.
- Kablov E.N. Aviation materials science: results and prospects. *Vestnik RAN*, 2002, vol. 72, no. 1, pp. 3–12.
- Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
- Epoxy polyester paint composition*: pat. 2472830 Rus. Federation, no. 2011140686/05; filed 07.10.11; publ. 20.01.13.
- Polymer radiotransparent composition*: pat. 2570446 Rus. Federation, no. 2014137816/05; filed 18.09.14; publ. 10.12.15.

8. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
9. Semenova L.V., Nefedov N.I., Belova M.V., Laptev A.B. Systems of paint coatings for helicopter equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
10. Perov N.S. Design of polymer materials on the molecular principles. I. The development of polymer materials with additional mechanisms of dissipation of mechanical energy at low temperatures. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-50-55.
11. Yakovlev A.D. *Powder paints*. Leningrad: Khimiya, 1987, 216 p.
12. State Standard 17555–72. *Plastics. Methods for determining the content of hydroxyl groups in epoxy resins and epoxidized compounds*. Moscow: Publishing house of standards, 1979, 11 p.
13. Nakanishi K. *Infrared spectra and structure of organic compounds*. Moscow: Mir, 1965, 219 p.
14. Siggia S. *Instrumental methods for the analysis of functional groups of organic compounds*. Moscow: Mir, 1974, 464 p.
15. Tarasevich B.N. *IR spectra of the main classes of organic compounds: reference materials*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2012, 55 p.
16. Kline G. *Analytical chemistry of polymers*. Moscow: Publ. of foreign literature, 1963, vol. 1, 592 p.
17. Kline B.J., Beckman E.J., Russell A.J. One-step biocatalytic synthesis of linear polyesters with pendant hydroxyl groups. *Journal of the American chemical society*, 1998, vol. 120, no. 37, pp. 9475–9480. DOI: 10.1021/ja9808907.
18. State Standard 25261–82. *Polyethers are simple and complex for polyurethanes. Method for determining the hydroxyl number*. Moscow: Publishing house of standards, 1982, 5 p.
19. ASTM D4274-11. Standard Test Methods for Testing Polyurethane Raw Materials: Determination of Hydroxyl Numbers of Polyols. ASTM International, 2011, 9 p.

#### *Информация об авторах*

**Прокопова Лилия Александровна**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### *Information about the authors*

**Lilia A. Prokova**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.11.2021; одобрена после рецензирования 11.11.2021; принята к публикации 11.11.2021.  
The article was submitted 09.11.2021; approved after reviewing 11.11.2021; accepted for publication 11.11.2021.