
Научная статья

УДК 543.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-83-90

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОЙ ДОЛИ УРОТРОПИНА В КАТАЛИЗАТОРЕ ФУ

Л.А. Прокопова¹, Е.Ю. Головина¹, С.А. Пономаренко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведено сравнение методов определения массовой доли уротропина в образцах катализатора ФУ с использованием ручного и инструментального подходов. Описаны принципы и этапы каждого метода, анализируются их преимущества и недостатки. Приведена статистика результатов определения состава катализатора ФУ тремя методами. На основании полученных результатов предложена методика определения массовой доли уротропина, позволяющая повысить точность и эффективность анализа.

Ключевые слова: аналитическая химия, количественный анализ, определение содержания азота, метод Кьельдаля, элементный анализ, элементный анализатор, высокоэффективная жидкостная хроматография

Для цитирования: Прокопова Л.А., Головина Е.Ю., Пономаренко С.А. Методы определения массовой доли уротропина в катализаторе ФУ // Труды ВИАМ. 2024. № 5 (135). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-83-90.

Scientific article

METHODS FOR DETERMINING THE MASS FRACTION OF HEXAMINE IN THE CATALYST FU

L.A. Prokopova¹, E.Yu. Golovina¹, S.A. Ponomarenko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The paper presents a comparative study of methods for determining the mass fraction of hexamine in samples of the «catalyst FU» using manual and instrumental approaches. The work describes the principles and stages of each method and analyzes their advantages and disadvantages. Statistics of the results of determining the composition of the product by three methods are presented. Based on the results obtained, a method for determining the mass fraction of urotropin has been proposed, which makes it possible to increase the accuracy and efficiency of the analysis.

Keywords: analytical chemistry, quantitative analysis, determination of nitrogen content, Kjeldahl method, elemental analysis, elemental analyzer, high pressure liquid chromatography

For citation: Prokopova L.A., Golovina E.Yu., Ponomarenko S.A. Methods for determining the mass fraction of hexamine in the catalyst FU. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-83-90.

Введение

Разнообразные полимерные композиционные и функциональные материалы нашли широкое применение в промышленности [1]. Такие материалы состоят из двух основных компонентов разной природы (полимерной матрицы и волокон армирующего наполнителя), что обеспечивает им свойства, превосходящие свойства отдельных компонентов. За счет множества комбинаций исходных материалов можно изготовить практически любые изделия с заранее заданными свойствами [2, 3]. Благодаря уникальному сочетанию характеристик, особенно относительно низкой плотности, высоких упруго-прочностных показателей и коррозионной устойчивости, такие материалы активно применяются в космической отрасли, авиационной промышленности, судо- и машиностроении. Они используются для изготовления крыльев, фюзеляжей, деталей интерьера, элементов шасси, изделий функционального назначения, таких как резинотехнические детали, огнезащитные и эрозионностойкие покрытия, а также других компонентов летательных аппаратов.

В зависимости от требуемых свойств изделия при производстве и переработке полимеров могут применяться органические вещества, содержащие азот в тех или иных функциональных группах. В частности, для отверждения полимеров используются аминные отвердители, образующие сшивающие мостики между молекулами смолы и способствующие достижению высокой химической стойкости, необходимых теплофизических и электроизоляционных свойств материалов [4]. Для производства эластомеров специального назначения [5], грибостойких резин [6] и модификации эрозионностойких покрытий [7] применяются бутадиеп-нитрильные каучуки, содержащие азот в виде связанного нитрила акриловой кислоты, количество которого является одним из показателей качества сырья.

В материалах для изготовления конструкций интерьера и создания теплозащитных покрытий могут применяться фенолформальдегидные связующие [8], отверждаемые с использованием азотсодержащих катализаторов. К отвердителям данного типа относится катализатор ФУ, представляющий собой раствор уротропина в фурфуролиловом спирте. Уротропин (гексаметилентетрамин) применяется для отверждения новолачных фенолформальдегидных смол [9]. При этом скорость такого процесса выше, чем скорость отверждения резольных одностадийных смол [10].

Помимо уротропина для изготовления катализаторов и отвердителей, применяемых при формовании изделий на основе термореактивных матриц, используются и другие аминные отвердители, такие как 4,4'-диаминодифенилсульфон. Для успешного образования сетчатой структуры полимерной матрицы каждая молекула отвердителя должна иметь по крайней мере две аминные функциональные группы [4]. Так как содержание азота – один из ключевых показателей качества сырья, то входной контроль предполагает обязательное его определение. Метод анализа выбирается в зависимости от химической структуры отвердителя. Это может быть как прямое или обратное титрование соляной кислотой [11], так и многоступенчатые методы разложения азотсодержащих веществ, требующие особых реактивов и условий.

Рассмотрим существующие методы определения массовой доли азота в органических веществах различной природы.

Если определяемый азот находится в составе аминогруппы и не представлен в молекуле другими функциональными группами, определить его содержание можно прямым титрованием в водной или неводной среде. Титрование можно проводить в широком спектре растворителей, критерием выбора которых является растворимость в них амина. Однако растворители основного характера применять нежелательно, так как они в силу основной природы самих аминов могут увеличить погрешность метода. Для

этих целей широко применяют уксусную кислоту, так как она является слабокислым растворителем, не вступающим в реакцию с аминогруппами [12].

Существуют также методы, основанные на воздействии избытка ангидрида уксусной кислоты и последующем обратном титровании непрореагировавшего ангидрида, переведенного в кислоту [11]. Таким способом определяют первичные и вторичные амины, однако его применение затруднено в силу ограничений, связанных с использованием уксусного ангидрида.

В 1883 г. разработан метод Кьельдаля. Изначально он предложен для определения общей концентрации белка, так как азот в природе встречается преимущественно в составе аминокислот [13]. В научно-технической литературе этот метод упоминается как «мокрое сжигание», т. е. процесс окисления проводят в жидкой фазе. Вещество подвергается воздействию концентрированной серной кислоты в присутствии катализаторов, выбираемых в зависимости от природы объекта анализа. Азот из соединения переходит в аммиак и образует сульфат аммония. По окончании окисления к реакционной смеси добавляют концентрированную щелочь, и выделяющийся аммиак поглощают известным количеством разбавленного раствора кислоты [11]. В качестве катализатора применяют селен, ртуть или ее оксид, глюкозу [14]. Для повышения температуры кипения в смесь добавляют сульфат калия, натрия или меди либо их смесь.

Метод Кьельдаля и его модификации стандартизованы, применяются для определения макро- и микроколичеств азота в широком круге веществ и материалов. Однако иногда его использование затруднено. Например, для соединений, содержащих нитрогруппу, рекомендуется сначала восстановить ее до аминной функциональной группы [11]. Для некоторых материалов со сложным составом возможно получение заниженных результатов, если в процессе измерения выделяется атомарный азот, который самопроизвольно удаляется из реакционной колбы.

При определении микроколичеств азота перенос реакционной смеси из одной емкости в другую нежелателен, так как на стенках каждого сосуда может остаться некоторое количество вещества [4]. Однако во многих вариантах метода Кьельдаля осуществляется перенос смеси из реакционной колбы в перегонную, что может вносить погрешность в результаты анализа. Таким образом, предпочтительно применение прибора, в который проба вносится однократно и далее не подвергается ручному воздействию. В настоящее время содержание общего азота в катализаторе ФУ определяют методом Кьельдаля без переноса вещества из реакционной колбы в перегонную, однако само титрование является обратным, что также может увеличить погрешность измерений.

При анализе методом Дюма связанный азот в органическом соединении независимо от формы его связи в молекуле переходит в газообразный и определяется объемным способом. Для проведения испытания образец смешивают с оксидом меди (II) и сжигают в трубке, заполненной диоксидом углерода. Важно, чтобы инертный газ полностью вытеснил воздух из трубки. Продукты реакции с потоком газа проходят через раскаленную медь и оксид меди (II), что приводит к восстановлению образующихся при сгорании веществ, в том числе к превращению оксидов азота в азот. Побочные газы поглощаются раствором щелочи, а объем выделившегося азота количественно соответствует его содержанию в анализируемом веществе [11]. В базовом исполнении этот способ трудоемок и требует применения высокотемпературных лабораторных печей.

Несмотря на точность и распространенность, метод Кьельдаля является длительным, что замедляет анализ больших серий образцов, и чаще предлагается в качестве арбитражного [14]. Это обуславливает необходимость внедрения альтернативных

способов определения массовой доли общего азота. Важным критерием при этом является возможность определения содержания азота независимо от его положения в органической молекуле, что обеспечивают элементные анализаторы для определения состава органических веществ.

Стандартизованный инструментальный метод определения содержания углерода, водорода и азота применяется для проверки качества минеральных топлив [15]. Автоматические элементные анализаторы в конфигурации CHN–O используются для определения процентного содержания углерода, водорода, азота и кислорода, содержащихся в веществах различной природы и происхождения в твердых, жидких и газообразных образцах. Содержание углерода, водорода и азота определяется в ходе одного анализа, а кислорода – в отдельном образце.

Сущность метода инструментального анализа состоит в сжигании пробы в потоке кислорода в реакторе, заполненном медью и оксидом меди, что схоже с методом Дюма. Далее продукты реакции разделяются на хроматографической колонке и определяются прибором. При этом нет необходимости контактировать с вредными и опасными веществами, возможно проведение серийного анализа образцов. Проведение точного анализа также способствует лучшей воспроизводимости результатов.

Разработаны методы определения химического состава образцов путем разделения веществ на отдельные соединения, в частности хроматографические методы анализа. За счет высокой разрешающей способности и возможности применения различных вариантов детектирования эти методы отличаются высокой универсальностью и часто применяются для анализа различных объектов, в том числе в авиационной промышленности [16, 17].

С учетом физико-химических характеристик уротропина (относительно низкая молекулярная масса, невысокая летучесть и температура плавления (280 °C)) определять его содержание в катализаторе ФУ, имеющем относительно простой состав, целесообразно методами ионной и жидкостной хроматографии, например обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ОФ ВЭЖХ). При этом необходимо отметить, что из-за высокой реакционной способности уротропин может находиться в частично связанной форме (с другими компонентами катализатора), поэтому его содержание, полученное по результатам анализа, может быть ниже расчетного.

Материалы и методы

Объектами исследования являются пять образцов катализатора ФУ. Из одной пробы одновременно брали четыре аналитические навески для каждого из методов анализа: минерализация серной кислотой в колбе Кьельдаля, испытания в элементном анализаторе и хроматографическое определение методом ОФ ВЭЖХ.

Метод Кьельдаля реализован в следующем виде. Навеску продукта массой 0,05–0,10 г помещали в колбу Кьельдаля, добавляли серную кислоту, сульфат калия для повышения температуры реакции и сульфат меди (II) в качестве катализатора. Колбу нагревали на газовой горелке, накрыв воронкой с запаянным концом. Окончанием реакции считали окрашивание реакционной смеси в ярко-голубой цвет. Отсутствие бурых или зеленых оттенков свидетельствовало о полной минерализации пробы. После этого колбу охлаждали, количественно переносили содержимое в круглодонную колбу. Применяли насадку Кьельдаля, соединяющую колбу и холодильник, аллонж которого опущен в раствор борной кислоты. Перед отгонкой аммиака к смеси в перегонной колбе добавляли 30 мл водного раствора гидроксида натрия с помощью делительной воронки. По окончании перегонки содержимое стакана титровали стандартным раствором серной кислоты. Установка для перегонки аммиака представлена на рис. 1.

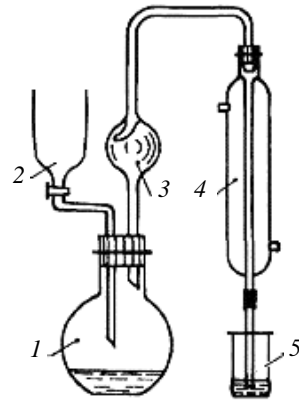


Рис. 1. Аппарат для перегонки аммиака: 1 – круглодонная перегонная колба; 2 – капельная воронка; 3 – каплеуловитель (насадка Кьельдаля); 4 – холодильник; 5 – стакан-приемник

При работе на элементном анализаторе оловянную капсулу с 1,5–2,0 мг катализатора ФУ помещали в устройство автоматической подачи образцов. В качестве инертного газа использовали гелий, окислителя – кислород. Температура печи, окружающей реактор, составляла 950 °С, однако температура образца в момент сгорания капсулы может достичь 2000 °С. Далее продукты сгорания с потоком инертного газа попадали в реактор, заполненный медью и оксидом меди. Из оксидов азота выделяется азот, содержание которого определяется детектором прибора.

При анализе водных растворов образцов методом ОФ ВЭЖХ применяли гидрофобизированную колонку C_{18} (3 мкм, 4,6×100 мм) в изократическом режиме (водный раствор 0,35%-ного триэтиламина, рН = 5,5) со скоростью потока 0,75 мл/мин и рефрактометрическим детектированием. Объем пробы составил 20 мкл, в качестве образца сравнения использовали разбавленный водный раствор уротропина. Из-за высокой реакционной способности уротропина водные растворы образцов следует готовить непосредственно перед проведением анализа. Во избежание засорения колонки потенциально присутствующими олигомерными компонентами рекомендуется периодически использовать градиентный режим с высоким содержанием органической фазы. Концентрацию уротропина рассчитывали по площади соответствующих пиков на хроматограммах образцов. Пример полученных хроматограмм представлен на рис. 2.

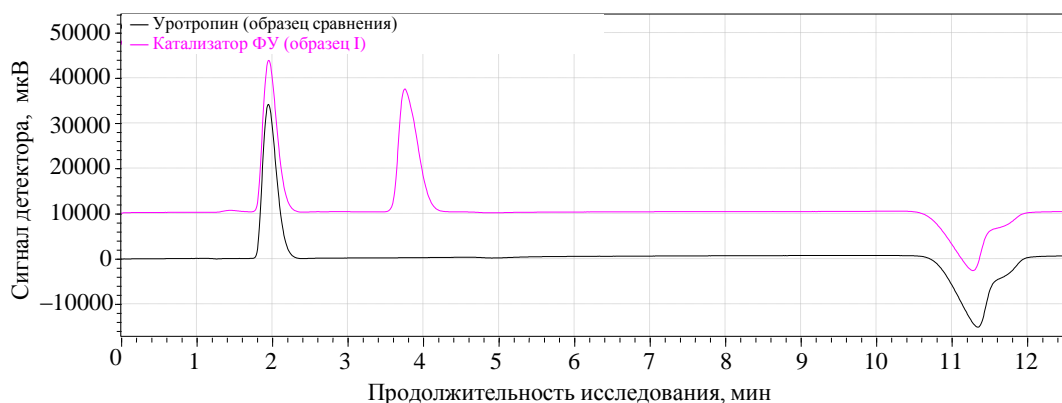


Рис. 2. Хроматограммы уротропина (1,7 г/л) и катализатора ФУ (5,0 г/л). Идентификация пиков соединений по времени удерживания: ~ (1,9–2,0) мин – уротропин; ~ (3,7–4,0) мин – фурфуроловый спирт; ~ (11,1–11,7) мин – модификатор подвижной фазы (в исследованных образцах отсутствует)

Результаты и обсуждение

Результаты определения массовой доли уротропина в катализаторе ФУ описанными методами приведены в таблице.

Результаты определения содержания уротропина в катализаторе ФУ различными методами

| Образец катализатора ФУ | Содержание уротропина, % | | | | Среднеквадратичное отклонение, % | Коэффициент вариации, % | |
|--|--------------------------|-------|-------|-------|----------------------------------|-------------------------|---------|
| | в аналитической навеске | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | | | среднее |
| Методом Кьельдаля | | | | | | | |
| I | 34,38 | 33,43 | 33,51 | 34,42 | 33,94 | 0,47 | 1,37 |
| II | 34,52 | 33,55 | 33,65 | 34,49 | 34,05 | 0,46 | 1,34 |
| III | 35,00 | 34,23 | 34,23 | 33,72 | 34,29 | 0,46 | 1,38 |
| IV | 34,51 | 34,84 | 34,59 | 34,44 | 34,60 | 0,15 | 0,47 |
| V | 34,52 | 34,91 | 34,04 | 33,89 | 34,34 | 0,40 | 1,22 |
| На элементном анализаторе | | | | | | | |
| I | 34,11 | 33,81 | 34,22 | 34,03 | 34,04 | 0,15 | 0,45 |
| II | 34,08 | 33,90 | 33,95 | 34,03 | 33,99 | 0,07 | 0,21 |
| III | 34,08 | 34,40 | 34,42 | 34,34 | 34,31 | 0,14 | 0,40 |
| IV | 34,40 | 34,45 | 34,76 | 34,65 | 34,56 | 0,15 | 0,42 |
| V | 34,40 | 34,60 | 34,25 | 34,33 | 34,40 | 0,13 | 0,38 |
| Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии | | | | | | | |
| I | 34,08 | 34,08 | 34,11 | 34,13 | 34,10 | 0,02 | 0,06 |
| II | 33,93 | 33,53 | 33,91 | 34,02 | 33,85 | 0,19 | 0,56 |
| III | 34,23 | 34,37 | 34,31 | 34,40 | 34,33 | 0,06 | 0,19 |
| IV | 34,56 | 34,57 | 34,63 | 34,58 | 34,59 | 0,03 | 0,08 |
| V | 34,45 | 34,47 | 34,45 | 34,41 | 34,45 | 0,02 | 0,06 |

Для сравнения эффективности методов анализа применяли статистическую обработку результатов: для каждой серии из четырех параллельных определений рассчитывали коэффициент вариации. Он является мерой разброса или дисперсии данных относительно среднего значения и представляет собой отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению полученных при анализе результатов. Коэффициент вариации часто используется для сравнения точности различных измерительных систем или методов. Чем коэффициент меньше, тем более точными и повторяемыми являются измерения (при одинаковом количестве параллельных испытаний). При сравнении точности различных измерительных систем обычно выбирают систему, имеющую наименьший коэффициент вариации.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что по сравнению с методом Кьельдаля элементный анализатор позволяет получить более высокую точность определения массовой доли уротропина. При этом продолжительность анализа значительно сокращается, так как любая лабораторная установка требует внимания, а промежуточные этапы исследования выполняются испытателем. При работе на автоматическом элементном анализаторе испытатель задействован только в момент запуска анализа и загрузки образцов. Хроматографический анализ, который применяли в качестве метода сравнения, показал наиболее высокую точность.

Заключения

Применение элементного анализатора в силу высокой стоимости прибора и комплектующих деталей целесообразно только при высокой рабочей нагрузке. Хроматографический метод анализа требует высокой квалификации персонала и применения дорогостоящего оборудования, а для создания подходящей подвижной фазы необходимы специальные реактивы. Метод Кьельдаля, напротив, не требует специальных расходных материалов и устройств, единственными недостатками являются продолжительность

анализа и постоянная занятость испытателя. Точность данных, получаемых при определении содержания уротропина в катализаторе ФУ методом Кьельдаля, высокая, но ее расчет важен для оценки рисков испытательной лаборатории.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Перфилова Д.Н. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. Вып. 10. С. 61–71.
2. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
3. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
4. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. 232 с.
5. Хорова Е.А., Мышлявцев А.В., Стрижак Е.А., Третьякова Н.А. Исследование гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков методами дифференциальной сканирующей калориметрии и динамического механического анализа // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 11–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-11-16.
6. Хорова Е.А., Третьякова Н.А., Вакулов Н.В. Исследование стойкости резин к воздействию плесневых грибов // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-128-132.
7. Кузнецова В.А. Влияние эластомерного модификатора на механические и вязкоупругие свойства эпоксидно-каучуковых композиций для эрозионностойких покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-56-62.
8. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
9. Андрианов Р.А., Пономарев Ю.Е. Пенопласты на основе фенолоформальдегидных полимеров. Ростов: Изд-во Ростов. гос. ун-та, 1987. 80 с.
10. Воробьев В.А. Технология полимеров. М.: Высшая школа, 1980. 303 с.
11. Губен-Вейль. Методы органической химии: в 2 т. М.: Химия, 1967. Т. 2: Методы анализа. 1032 с.
12. Сиггиа С., Ханна Дж.Г. Количественный органический анализ по функциональным группам. М.: Химия, 1983. 672 с.
13. Зауэр Е.А., Ершов А.Б. Современные анализаторы для определения азота методом Кьельдаля // Аналитика и контроль. 2019. № 2. С. 168–192. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.2.002.
14. Исакова Н.А., Фихтенгольц В.С., Белова Г.А., Панкратова Е.Д. Технический анализ и контроль производства синтетических каучуков. Л.: Химия, 1976. 168 с.
15. ГОСТ 32979–2014. Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.
16. Основы аналитической химии: в 2 т. / под ред. Ю.А. Золотова. М.: Высшая школа, 1996. Т. 1: Общие вопросы. Методы разделения. 383 с.
17. Пономаренко С.А., Шимкин А.А. Хроматографические методы анализа: возможности применения в авиационной промышленности (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 4. С. 5–13.

References

1. Kablov E.N., Semenova L.V., Petrova G.N., Larionov S.A., Perfilova D.N. Polymer composite materials on a thermoplastic matrix. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2016, vol. 59, is. 10, pp. 61–71.

2. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Report XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
3. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE «VIAM» in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
4. Chernin I.Z., Smekhov F.M., Zherdev Yu.V. *Epoxy polymers and compositions*. Moscow: Khimiya, 1982, 232 p.
5. Khorova E.A., Myshlyavtsev A.V., Strizhak E.A., Tretyakova N.A. Examination of hydrogenated butadiene-nitrile rubbers by methods of differential scanning calorimetry and dynamic mechanical analysis. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 11–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-11-16.
6. Khorova E.A., Tretyakova N.A., Vakulov N.V. Research of resistance of rubbers to the exposure of mold fungi. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 12, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-128-132.
7. Kuznetsova V.A. Influence of the elastomeric modifier on mechanical and viscoelastic properties of epoxy and rubber compositions for erosion resistant coatings. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-56-62.
8. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
9. Andrianov R.A., Ponomarev Yu.E. *Foams based on phenol-formaldehyde polymers*. Rostov: Publ. house Rostov State Univ., 1987, 80 p.
10. Vorobyov V.A. *Polymer technology*. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 303 p.
11. Guben-Weil. *Methods of organic chemistry*: in 2 vols. Moscow: Khimiya, 1967, vol. 2: Methods of analysis, 1032 p.
12. Siggia S., Hannah J.G. *Quantitative organic analysis by functional groups*. Moscow: Khimiya, 1983, 672 p.
13. Sauer E.A., Ershov A.B. Modern analyzers for determining nitrogen using the Kjeldahl method. *Analitika i kontrol*, 2019, no. 2, pp. 168–192. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.2.002.
14. Isakova N.A., Fikhtengolts V.S., Belova G.A., Pankratova E.D. *Technical analysis and control of synthetic rubber production*. Leningrad: Khimiya, 1976, 168 p.
15. State Standard 32979–2014. *Solid mineral fuel. Instrumental method for the determination of carbon, hydrogen and nitrogen*. Moscow: Standartinform, 2015, 11 p.
16. *Fundamentals of analytical chemistry*: in 2 vols. Ed. Yu.A. Zolotov. Moscow: Vysshaya shkola, 1996, vol. 1: General questions. Separation methods, 383 p.
17. Ponomarenko S.A., Shimkin A.A. Chromatographic methods of analysis: possibilities of application in the aviation industry (review). *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 4, pp. 5–13.

Информация об авторах

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

Головина Елена Юрьевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пономаренко Сергей Александрович, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Elena Yu. Golovina, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Ponomarenko, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.04.2024.

The article was submitted 22.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 01.04.2024.