

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

DOI: 10.15593/2224-9400/2021.1.05

УДК 678.744.5

В.М. Зиновьев, О.А. Гладкова, С.А. Котельников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

СОЗДАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ШТАТНОМУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ γ -ПОЛИОКСИМЕТИЛЕНА

Одним из широко распространенных способов модификации свойств полимеров является создание полимерной композиции, содержащей два или несколько полимеров. При этом введение даже небольших количеств одного полимера может сильно улучшить характеристики композиции. Полиоксиметилен является универсальным конструкционным полимером, применяемым в чистом или модифицированном виде в различных отраслях промышленности. Кроме того, он часто является добавкой к другим полимерным материалам. Однако большое влияние на свойства полимерной композиции оказывает молекулярная масса используемого полиоксиметилена.

В настоящей работе представлены исследования по совершенствованию технологического процесса получения низкомолекулярного полиоксиметилена. Рассмотрены два технологических процесса получения γ -полиоксиметилена (γ -ПОМ): существующий промышленный и альтернативный высокопроизводительный, в котором предлагается использовать более эффективные агент передачи цепи и катализатор. В результате работы также предложено сократить продолжительность технологического процесса получения γ -ПОМ путем проведения щелочной стабилизации в одном реакторе, что позволит исключить стадии фильтрации, промывки ПОМ-сырца и перегрузки его в другой реактор. Проведенные исследования показали, что продолжительность технологического процесса сокращается с 53 до 29 ч, повышается выход γ -ПОМ с 40–50 до более 70 %, повышается количество растворителя, возвращаемого в производственный цикл, уменьшается среднemasсовый размер частиц с 40–80 мкм до менее 20 мкм, что является важным для более однородного распределения частиц в полимерной композиции. Различными исследовательскими методами подтверждено, что сохраняются все нормативные характеристики на данный полимер.

Ключевые слова: технология получения, γ -полиоксиметилен, выход, среднemasсовый размер частиц, щелочная стабилизация, апротонный катализатор, телоген.

V.M. Zinov'ev, O.A. Gladkova, S.A. Kotel'nikov

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

CREATION OF AN ALTERNATIVE STAFF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR PRODUCING γ -POLYOXIMETHYLENE

One of the widespread methods for modifying the properties of polymers is to create a polymer composition containing two or more polymers. Moreover, the introduction of even small amounts of one polymer can greatly improve the characteristics of the composition. Polyoxymethylene is a versatile engineering polymer used in pure or modified form in various industries. In addition, it is often an additive to other polymeric materials. However, the molecular weight of the polyoxymethylene used will have a great influence on the properties of the polymer composition.

This work presents studies on improving the technological process for obtaining low molecular weight polyoxymethylene. Two technological processes for the production of γ -polyoxymethylene (γ -POM) are considered: an existing industrial one and an alternative high-performance one, in which it is proposed to use a more efficient chain transfer agent and a catalyst. As a result of the work, it was also proposed to reduce the duration of the technological process for producing γ -POM by carrying out alkaline stabilization in one reactor, which will allow eliminating the stages of filtration, washing the raw POM and reloading it into another reactor. Studies have shown that the duration of the technological process is reduced from 53 to 29 hours, the yield of γ -POM increases from 40...50 % to more than 70 %, the amount of solvent returned to the production cycle increases, the average mass particle size decreases from 40...80 microns to less 20 μm , which is important for a more uniform distribution of particles in the polymer composition. It was confirmed by various research methods that all the standard characteristics for a given polymer are preserved.

Keywords: *production technology, γ -polyoxymethylene, yield, mass average particle size, alkaline stabilization, aprotic catalyst, telogen.*

Полиформальдегид (полиоксиметилен) – продукт полимеризации формальдегида. Гомополимер обладает низкой теплостойкостью и разлагается с выделением формальдегида, поэтому в промышленности используют его сополимеры (чаще с диоксаланом). Они отличаются высокой теплостойкостью. Под названием «полиформальдегид» объединяются как гомополимеры, так и сополимеры формальдегида [1–7].

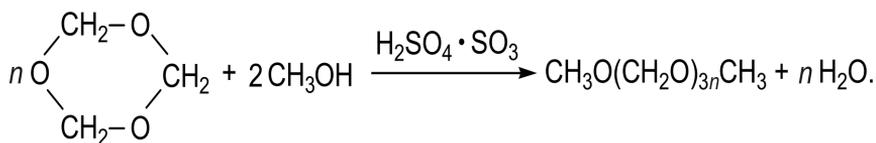
Высокомолекулярный полиоксиметилен (ПОМ) является универсальным конструкционным полимером, максимально приближенным к металлам по своим эксплуатационным свойствам. Он используется для создания деталей санитарно-гигиенического и технического назначения, в авто- и авиастроении [8, 9], в приборостроении, в производстве продукции народного потребления и пр. Низкомолекулярные ПОМ

(эфиры полиоксиметиленгликолей), в частности γ -полиоксиметилен (γ -ПОМ), могут использоваться в качестве компонента полимерных композиций для придания им необходимых свойств. γ -Полиоксиметилен – смесь диметиловых эфиров полиоксиметиленгликолей общей формулы $\text{CH}_3\text{-(OCH}_2\text{)}_n\text{-OCH}_3$, где n – степень полимеризации, равная 80–240.

В литературных источниках встречаются способы получения диметиловых эфиров полиоксиметиленгликолей различного назначения [10–12]. Однако в них основным катализатором являются кислоты.

Промышленная (штатная) технология получения γ -ПОМ, основанная на катионной полимеризации 1,3,5-триоксана в присутствии серно-кислотного катализатора (олеума) и агента передачи цепи – метанола, с последующей щелочной стабилизацией ПОМ-сырца 12 % водным раствором едкого натра, позволяет получать продукт с выходом 45–50 % и среднемассовым размером частиц (СМРЧ) 40–80 мкм.

Синтез осуществляется по схеме



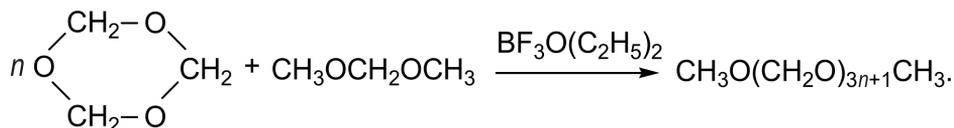
Недостатком данной технологии является длительность процесса (53 ч), связанная с выгрузкой ПОМ-сырца после синтеза из реактора на фильтр, фильтрацией, промывкой и щелочной стабилизацией во втором реакторе. Данные операции длительны по времени, полученный полиоксиметилен может содержать серную кислоту, что негативно может отразиться на эксплуатационных характеристиках изделия.

Кроме того, ПОМ-сырец выделяет формальдегид, оказывающий токсичное кумулятивное действие на организм человека [13].

Известны модернизированные способы получения γ -ПОМ по серно-кислотной технологии в присутствии стеариновой кислоты, направленные на снижение среднемассового размера частиц γ -ПОМ¹, но они не позволяют повысить его выход.

¹ Способ получения γ -полиоксиметилена: пат. 2176650 Рос. Федерация / Зиновьев В.М. и др. – № 99117306/04; заявл. 09.08.1999; опубл. 27.05.2001, Бюл. № 15; Способ получения γ -полиоксиметилена: пат. 2412953 Рос. Федерация / Зиновьев В.М. и др. – № 2009132433/04; заявл. 27.08.2009; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6; Способ получения высокодисперсного γ -полиоксиметилена: пат. 2467023 Рос. Федерация / Зиновьев В.М. и др. – № 20111366910/04; заявл. 06.09.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32.

В предыдущих работах [14–17] авторами проводились исследования по получению γ -ПОМ путем катионной полимеризации 1,3,5-триоксана в среде толуола в присутствии альтернативного метанола телогена – метилала и альтернативного олеуму апротонного катализатора – эфирата трехфтористого бора:



Этот способ может повысить выход продукта, но при этом использование толуола связано с повышенной пожароопасностью производства. В данной работе предлагается использование в качестве реакционной среды тетрахлорметана, в качестве телогена – метилала, в качестве катализатора – эфирата трехфтористого бора. Кроме того, проведены исследования по сокращению технологической схемы производства за счет исключения стадий фильтрации, отжима, водной промывки ПОМ-сырца и проведения щелочной стабилизации в одном реакторе, что позволит сократить продолжительность технологического процесса, уменьшить количество промывной воды и возратить в синтез путем регенерации до 90 % тетрахлорметана.

Отработку альтернативного технологического процесса получения γ -ПОМ ведут в следующих условиях: концентрация 1,3,5-триоксана в тетрахлорметане 3,7 моль/дм³, массовая доля эфирата трехфтористого бора – 3,5 % от массы 1,3,5-триоксана, количество метилала – 5,0 % от массы 1,3,5-триоксана. Температура синтеза варьировалась от 40 до 60 °С, продолжительность синтеза 1–2 ч.

В реактор емкостью 1 дм³, снабженный лопастной мешалкой, обратным холодильником, термометром, насадкой с обратным холодильником и дозировочным устройством, загружают 1,3,5-триоксан, тетрахлорметан, метилал. Температуру в реакторе поднимают при перемешивании до заданной и дозируют катализатор. После завершения ввода катализатора реакционную смесь выдерживают при заданной температуре и постоянном перемешивании необходимое время.

После завершения синтеза обратный холодильник меняют на прямой (холодильник Либиха), вводят при перемешивании 7%-ный водный раствор едкого натра и постепенно повышают температуру в реакторе до 75–80 °С для отгонки тетрахлорметана. После отгонки тетрахлорметана в течение 2–2,5 ч поднимают температуру в реакторе

до $(85 \pm 2)^\circ\text{C}$ (выдержка 30 мин), затем до $(95 \pm 2)^\circ\text{C}$ (выдержка 150 мин). Суспензию γ -ПОМ охлаждают до температуры $35\text{--}40^\circ\text{C}$, γ -ПОМ отделяют на фильтре и после водной промывки до pH водной вытяжки $6,5\text{--}7,3$ отжимают и упаковывают.

В табл. 1 приведены условия экспериментов, проведенных при температурах $40\text{--}60^\circ\text{C}$, и свойства полученных образцов. Из данных таблицы следует, что повышение температуры синтеза с 40 до 60°C существенно не влияет на выход γ -ПОМ ($71,0\text{--}74,3\%$).

Таблица 1

Условия синтеза и свойства опытных образцов

Показатель	Норма по ТУ 84-841-79	Результаты испытаний опытных образцов			
		1 (период. способ)	2	3	4
Температура синтеза, $^\circ\text{C}$	–	40	40	50	60
Продолжительность синтеза, ч	–	4	2	2	2
Продолжительность стабилизации при температуре $95 \pm 2^\circ\text{C}$, ч	–	4	2,5	2,5	2,5
Выход, %	–	42	74,3	74,2	71,0
Внешний вид	Аморфный порошок без посторонних примесей	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.
Цвет	От белого до серого	Белый	Белый	Белый	Белый
Массовая доля влаги, %	20–70	66,4	48,5	58,0	54,2
Зольность, %, не более	0,8	0,6	0,1	0,04	0,08
Температура плавления, К, не более	160–180	162	161	170	170
Массовая доля летучих веществ, %, не более	1,5	0,8	Отсут.	Отсут.	0,2
Реакция водной вытяжки, pH	Нейтр.	Нейтр.	Нейтр.	Нейтр.	Нейтр.
Остаток на сите с сеткой № 05, %, не более	1,5	1,0	0,14	0,06	0,13
СМРЧ*, мкм	–	47,3	18,0	17,86	18,84

*СМРЧ γ -ПОМ определялся на лазерном анализаторе частиц Microsizer.

На рис. 1, 2 представлены циклограммы сернокислотного (штатного) и альтернативного апротонного технологических процессов получения γ -ПОМ.

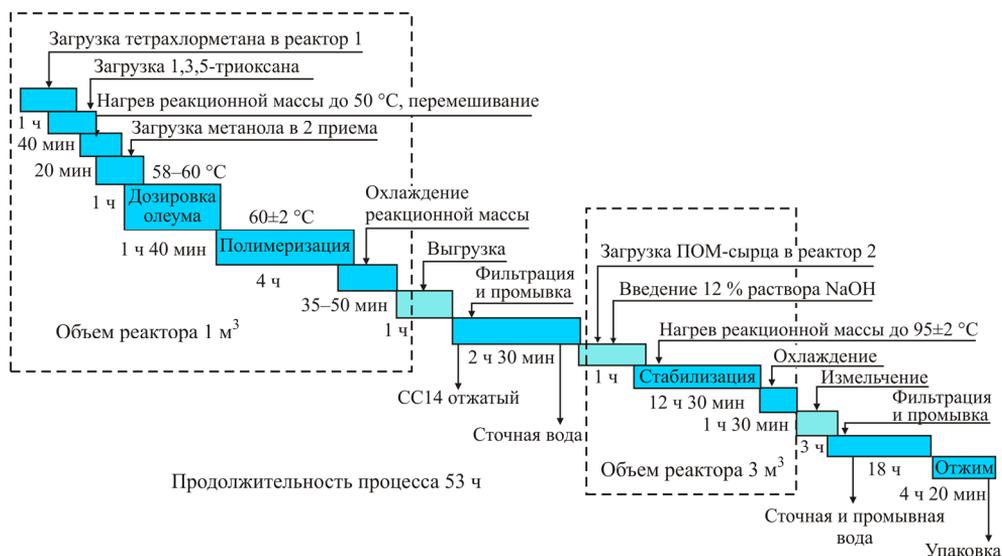


Рис. 1. Циклограмма получения γ -ПОМ по сернокислотной (штатной) технологии

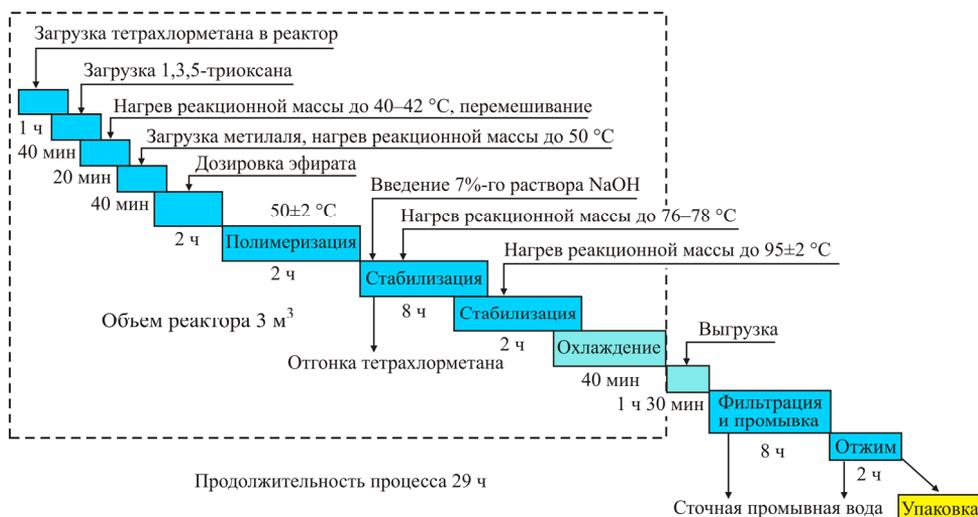


Рис. 2. Циклограмма технологического процесса получения γ -ПОМ по альтернативной апротонной технологии

Переход от штатной технологии получения γ -ПОМ в двух реакторах к альтернативной, осуществляемой в одном реакторе, позволяет увеличить выход с 40–50 до 71–74 %. При этом сокращаются продолжительность синтеза и стабилизации процесса получения γ -ПОМ, ликвидируются стадии фильтрации и промывки ПОМ-сырца, перегрузки в другой реактор. СМРЧ γ -ПОМ снижается с 40–80 до менее 20 мкм.

Эти мероприятия приводят к сокращению продолжительности технологического процесса с 53 до 29 ч и увеличению выхода γ -ПОМ до более 70 %.

На лазерном анализаторе частиц Microsizer лазерно-дифракционным методом сняты кривые распределения частиц γ -ПОМ по фракционному составу и определен СМРЧ γ -ПОМ, полученного по штатной и альтернативной технологиям. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Как видно из табл. 2 и рис. 3, СМРЧ γ -ПОМ, изготовленного по штатной технологии, больше в 2–3 раза, чем полученного по альтернативной технологии.

Таблица 2

Среднемассовый размер частиц γ -ПОМ

Образец	Технология	СМРЧ, мкм
1	Альтернативная	18,0
2		17,86
1	Штатная	27,3
2		45,8
3		48,1

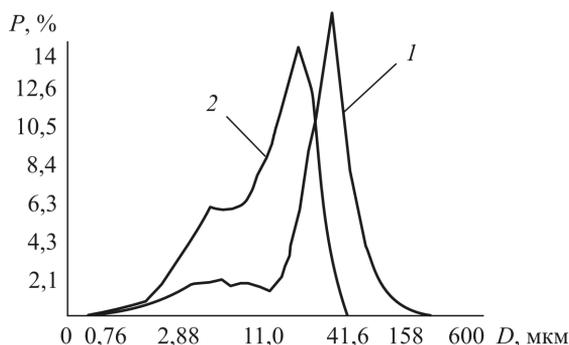


Рис. 3. Зависимость массовой доли фракции от размера частиц γ -ПОМ:
1 – штатная технология; 2 – альтернативная технология

Применение альтернативной технологии получения γ -ПОМ позволяет получить меньший СМРЧ и более однородное распределение по гранулометрическому составу.

Методом рентгеноструктурного анализа определены степени кристалличности γ -ПОМ, изготовленного по разным технологиям (табл. 3). Фазовый рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE на медном излучении. Идентификация фаз проводилась с использованием программы DIFFRACЕVA и рентгенометрической базы данных PDF-2.

Таблица 3

Степень кристалличности образцов, получаемых по разным технологиям

Образец	Технология	Степень кристалличности
1	Штатная	86,4
2		86,3
1	Альтернативная	85,1
2		86,0
3		86,3

Как видно из данных, представленных в табл. 3, степень кристалличности образцов γ -ПОМ, полученных по сернокислотной (штатной) технологии производства, и образцов, полученных по апротонной (альтернативной) технологии, находятся в пределах 85–86,4 %.

Методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) определена теплота разложения образцов. Характер разложения образцов, изготовленных по штатной (рис. 4) и альтернативной технологиям (рис. 5), имеет отличия. Однако суммарный эндоэффект колеблется в пределах $-1200 \dots -2200$ Дж/г для всех образцов.

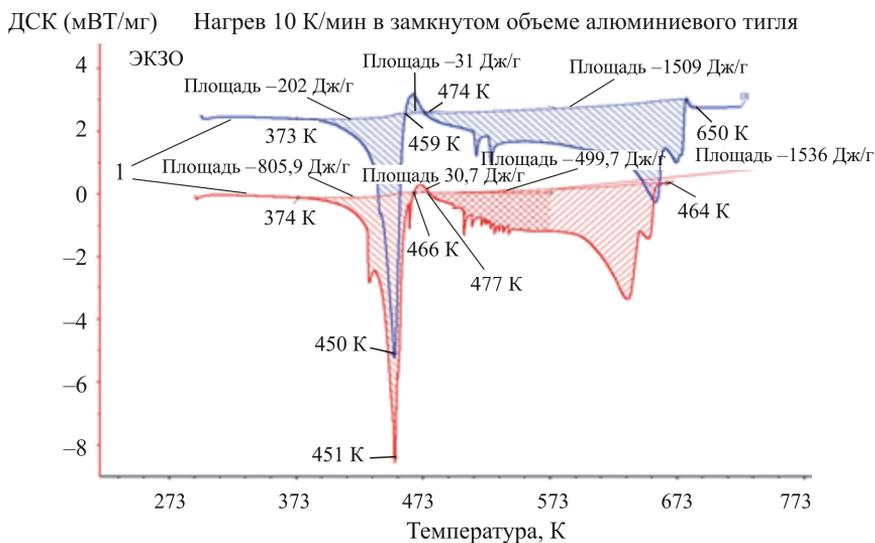


Рис. 4. Кривая ДСК образцов γ -ПОМ, изготовленного по сернокислотной технологии

Исследование спектральных характеристик образцов γ -ПОМ методом ИК-спектроскопии (рис. 6) показывает, что для образцов полимера, синтезированного по штатной технологии, наблюдаются индивидуальные полосы поглощения с неразделенным плечом $930,5$ и $930,7$ см^{-1} соответ-

ственно, характерные для γ -ПОМ с высокой степенью кристалличности. Образцы, синтезированные по альтернативной технологии, имеют разделение максимумов поглощения в областях длин волн 897,0 и 931,2 см^{-1} .

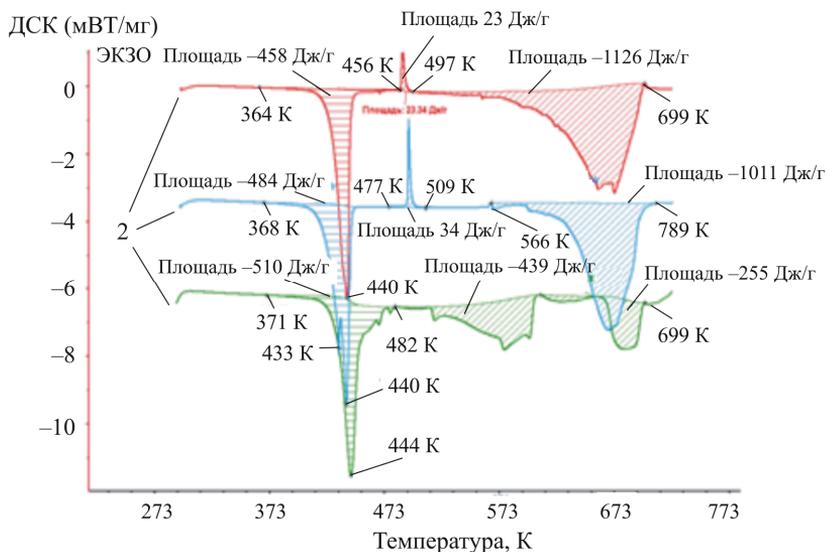


Рис. 5. Кривая ДСК образцов γ -ПОМ, изготовленных по альтернативной технологии

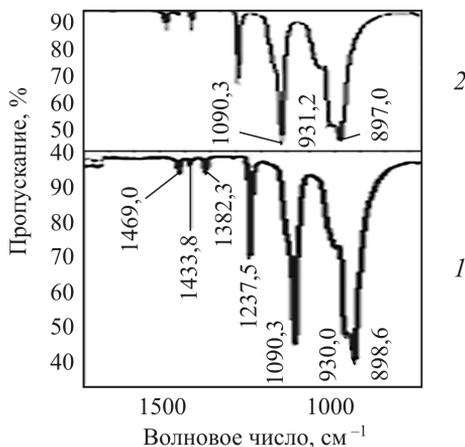


Рис. 6. ИК-спектры γ -ПОМ, полученного по технологии: 1 – сернокислотной; 2 – апротонной

Полученные данные ИК-спектроскопии позволяют сделать вывод, что образцы γ -ПОМ, синтезированные по альтернативной технологии, близки к продукту, полученному по штатной технологии.

По результатам проведенных исследований можно констатировать:

1. Переход от штатной серноокислотной технологии получения γ -ПОМ к альтернативной апротонной за счет замены катализатора олеума на эфират трехфтористого бора и агента передачи цепи метанола на метилаль позволяет повысить выход γ -ПОМ с 40–50 до 71–74 %, уменьшить размер частиц γ -ПОМ до менее 20 мкм.

2. Переход к альтернативной технологии получения γ -ПОМ позволяет исключить стадии фильтрации, промывки ПОМ-сырца, перегрузки в другой реактор, что приводит к сокращению продолжительности технологического процесса с 53 до 29 ч.

3. Альтернативная технология получения γ -ПОМ позволяет вернуть в цикл до 92,5 % тетрахлоорметана и увеличить производительность производства γ -ПОМ на 30–35 %.

4. Лазерно-дифракционным методом, рентгеноструктурным анализом, дифференциально-сканирующей калориметрией (ДСК), ИК-фурье-спектроскопией проведено сравнение образцов γ -ПОМ, полученных по серноокислотной (штатной) и апротонной (альтернативной) технологиям. Установлено, что γ -ПОМ, синтезированный по альтернативной технологии, соответствует по основным характеристикам продукту, получаемому по штатной технологии.

Список литературы

1. Уокер Дж.Ф. Формальдегид. – М.: Госхимиздат, 1957. – 608 с.
2. Вольфсон С.А. От колбы до реактора. – М.: Химия, 1982. – 224 с.
3. Ениколопян Н.С., Вольфсон С.А. Химия и технология полиформальдегида. – М.: Химия, 1968. – 280 с.
4. Фурукава Дж., Саегуса Т. Полимеризация альдегидов и окисей: пер. с англ. – М.: Мир, 1965. – 480 с.
5. Brown N. Polymerization of formaldehyde // J. Macromol. Sci. (Chem.), Part A. – 1967. – Vol. 1, iss. 2. – P. 209–230.
6. Самадруков Е.В., Билль В.С., Атрушкевич Л.А. Термодинамические параметры плавления полиформальдегида // Пластические массы. – 1971. – № 10. – С. 30–32.
7. Алишоев В.Р., Нейман М.Б., Коварская Б.М. Термоокислительная деструкция и стабилизация полиформальдегида // Пластические массы. – 1962. – № 7. – С. 11–14.
8. Технология полимерных материалов: учеб. пособие / А.Ф. Николаев [и др.]. – СПб.: Профессия, 2008. – 533 с.
9. Иренеуш Д., Лабунец В.Ф. Применение полимерных трибологических материалов в авиации // Проблемы тертя та зношування. – 2012. – № 58. – С. 119–127.

10. Reaction Equilibrium and Kinetics of Synthesis of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers from Formaldehyde and Methanol / M. Shi, X. Yu, L. Wang, F. Dai, G. He, Q. Li // *Kinetics and Catalysis*. – 2018. – Vol. 59. – P. 255–261.

11. The green and expeditious synthesis of sulfated titania with enhanced catalytic activity in polyoxymethylene dimethyl ethers synthesis / H. Li, Yanxing Li, T.Guo, J.g Zhang, L. He // *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. – 2018. – Vol. 124. – P. 139–151.

12. Reaction kinetics of the production of polyoxymethylene dimethyl ethers from methanol and formaldehyde with acid cation exchange resin catalyst / J. Zhang, M. Shi, D. Fang, D. Liu // *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. – 2014. – Vol. 113. – P. 459–470.

13. Вредные вещества в промышленности: в 3 т. / под ред. Н.В. Лазарева, Э.Н. Левиной. – Л.: Химия, 1977.

14. Зиновьев В.М., Гладкова О.А. Совершенствование промышленного и создание нового высокопроизводительного технологического процесса получения высокодисперсного γ -полиоксиметилена // *Итоги диссертационных работ: материалы V Всерос. конкурса молодых ученых*. – Миасс, 2013. – Т. 3. – С. 42–52.

15. Zinov'ev V.M., Fedoseev A.M., Gladkova O.A. Optimization of the new technology for manufacturing γ -polyoxymethylene // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2016. – Vol. 86, no. 6. – P. 1476–1478.

16. Zinov'ev V.M., Gladkova O.A., Fedoseev A.M. Optimization of process parameters of γ -polyoxymethylene// *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2015. – Vol. 88, no. 10. – P. 1673–1678.

17. Зиновьев В.М., Гладкова О.А., Федосеев А.М. Использование апротонного катализатора при получении гамма-полиоксиметилена в среде толуола // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2013. – № 35. – С. 156–165.

References

1. Worker J.F. Formal'degid [Formaldehyde]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchnotekhnicheskoe izdatel'stvo khimicheskoi literatury, 1957, 608 p.

2. Vol'fson S.A. Otkolby do reaktora [From flask to reactor]. Moscow, Khimiia, 1982, 224 p.

3. Enikolopian N.S., Vol'fson S.A. Khimiia I tekhnologiia poliformal'degida [Chemistry and technology of polyformaldehyde]. Moscow, Khimiia, 1968, 280 p.

4. Furukava Dzh., Saegusa T. Polimerizatsiia al'degidov I okisei [Polymerization of aldehydes and oxides]. Moscow, Mir, 1965.

5. Brown N. Polymerization of formaldehyde. *J. Macromol. Sci. (Chem.)*, Part A, vol. 1, Iss. 2, 1967, pp. 209–230.

6. Samadrukov E.V., Bill' V.S., Atrushkevich L.A. Termodinamicheskie parametry plavleniia poliformal'degida [Thermodynamic parameters of melting polyformaldehyde]. *Plasticheskie massy*, 1971, no. 10, pp. 30–32.

7. Alishoev V.R., Neiman M.B., Kovarskaia B.M. Termookislitel'naia destrukttsiia i stabilizatsiia poliformal'degida [Thermooxidative destruction and stabilization of polyformaldehyde]. *Plasticheskie massy*, 1962, no. 7, pp. 11–14.

8. Nikolaev A.F. et al. Tekhnologiia polimernykh materialov [Technology of polymeric materials]. Saint Petersburg, Professii, 2008. 533 p.

9. Ireneush D., Labunets V.F. Primenenie polimernykh tribologicheskikh materialov v aviatsii [Application of polymer tribological materials in aviation]. *Problemitertia ta znoshuvannia*, 2012, no. 58, pp. 119–127.

10. Shi M., Yu X., Wang L., Dai F., He G., Li Q. Reaction Equilibrium and Kinetics of Synthesis of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers from Formaldehyde and Methanol. *Kinetic sand Catalysis*, 2018, vol. 59, pp. 255–261.

11. Li H., Li Yanxing, Guo T., Zhang J.g, He L. The green and expeditious synthesis of sulfated titania with enhanced catalytic activity in polyoxymethylene dimethyl ethers synthesis. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2018, vol. 124, pp. 139–151.

12. Zhang J., Shi M., Fang D., Liu D. Reaction kinetics of the production of polyoxymethylene dimethyl ethers from methanol and formaldehyde with acid cation exchange resin catalyst. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2014, vol. 113, pp. 459–470.

13. Vrednye veshchestva v promyshlennosti [Harmful substances in industry]. Ed. N.V. Lazareva, E.N. Levinoi, Leningrad, Khimiia, 1977.

14. Zinov'ev V.M., Gladkova O.A. Sovershenstvovanie promyshlennogo i sozdanie novogo vysokoproizvoditel'nogo tekhnologicheskogo protsessa polucheniia vysokodispersnogo γ -polioksimetilena [Improvement of industrial and creation of a new high-performance technological process for obtaining highly dispersed γ -polyoxymethylene]. *Materialy V Vserossiiskogo konkursa amolodykh uchenykh*, Miass, 2013, pp. 42–52.

15. Zinov'ev V.M., Fedoseev A.M., Gladkova O.A. Optimization of the new technology for manufacturing γ -polyoxymethylene. *Russian Journal of General Chemistry*, 2016, vol. 86, no. 6, pp. 1476–1478.

16. Zinov'ev V.M., Gladkova O.A., Fedoseev A.M. Optimization of process parameters of γ -polyoxymethylene. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015, vol. 88, no. 10, pp. 1673–1678.

17. Zinov'ev V.M., Gladkova O.A., Fedoseev A.M. Ispol'zovanie aprotonnogo katalizatora pri poluchenii gamma-polioksimetilena v srede toluola [The use of an aprotic catalyst in the preparation of gamma-polyoxymethylene in toluene]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2013, no. 35, pp. 156–165.

Получено 14.01.2021

Об авторах

Зиновьев Василий Михайлович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология полимерных материалов и порохов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: suzuk47@mail.ru).

Гладкова Ольга Александровна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и производство энергетических конденсированных систем и изделий из них для ракетно-космической техники и энергетических установок», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: gladkovish@yandex.ru).

Котельников Сергей Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология полимерных материалов и порохов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: ksa76@mail.ru).

About the authors

Vasili M. Zinov'ev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of "Polymer materials and propellants technology", Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: suzuk47@mail.ru).

Olga A. Gladkova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of "Design and manufacture of condensed energy systems and products from them for rocket and space technology and power plants" Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: gladkovish@yandex.ru).

Sergey A. Kotel'nikov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Polymer materials and propellants technology", Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: ksa76@mail.ru).