

УДК 547.461.6:544.4

**Я. В. Боркина, В. Л. Флейшер**

Белорусский государственный технологический университет

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ  
АДИПИНОВОЙ КИСЛОТЫ С ДИЭТИЛЕНТРИАМИНОМ**

Полимерные материалы нашли широкое применение в технологии целлюлозосодержащих композиционных материалов в качестве упрочняющих веществ, коагулянтов, флокулянтов. Определенный интерес вызывают полиаминоамиды на основе адипиновой кислоты и диэтилен-триамина, в настоящее время являющиеся основой смол, придающих бумаге и картону прочность во влажном и сухом состоянии и предоставляющие возможность для их дальнейшего модифицирования благодаря наличию в их структуре вторичной аминогруппы.

В статье в форме графических зависимостей представлены результаты расчета следующих кинетических характеристик процесса поликонденсации адипиновой кислоты и диэтилен-триамина: степени завершенности реакции, среднечисловой и среднемассовой степеней полимеризации, среднечисловой и среднемассовой молекулярных масс. На основании полученных результатов рассчитаны константы скорости реакции при проведении ее при различных температурах. При проведении процесса поликонденсации адипиновой кислоты с диэтилен-триамином при 180°C возможно получение продукта со среднечисловой степенью полимеризации 412 и среднечисловой молекулярной массой 60 215 г/моль, при этом степень завершенности реакции составит 0,998.

Полученные результаты позволят управлять процессом поликонденсации диэтилен-триамина и адипиновой кислоты, проводимым в расплаве при мольном соотношении реагентов 1 : 1 при температуре 160–180°C с целью получения продукта с заданными характеристиками.

**Ключевые слова:** поликонденсация, кинетические характеристики, степень завершенности реакции, степень полимеризации, молекулярная масса, полиаминоамиды, константа скорости реакции.

**Для цитирования:** Боркина Я. В., Флейшер В. Л. Кинетические характеристики поликонденсации адипиновой кислоты с диэтилен-триамином // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 53–59.

**Ya. V. Borkina, V. L. Fleisher**

Belarusian State Technological University

**KINETIC CHARACTERISTICS OF POLYCONDENSATION  
OF THE ADIPIC ACID WITH DIETHYLENETRIAMINE**

Polymer materials are widely used in the technology of cellulose-containing composite materials as strengthening agents, coagulants, flocculants. Of particular interest are polyaminoamides based on adipic acid and diethylenetriamine, which are currently the basis of resins that give paper and cardboard strength in wet and dry conditions and provide an opportunity for their further modification due to the presence of a secondary aminogroup in their structure.

The article presents the results of calculating the following kinetic characteristics of the polycondensation process of adipic acid and diethylenetriamine in the form of graphical dependencies: the degree of suspension of the reaction, the average number and average mass degrees of polymerization the average number and average number and average mass of molecular masses. Based on the result obtained the reaction rate constants are calculated when the reaction is carried out at different temperatures. When conducting the process of polycondensation adipic acid with diethylenetriamine at 180°C, it is possible to obtain a product with an average acid degree of polymerization of 412 non acid molecules with a mass 60,215 g/mol, while the degree of completion of the reaction will be 0.998.

The results obtained will allow controlling the process of polycondensation of adipic acid and diethylenetriamine, conducted in the melt at the molar ratio of reagents 1 at a temperature of 160–180°C in order to obtain a product with the specified characteristics.

**Key words:** polycondensation, kinetic characteristics, degree of completion of the reaction, degree of polymerization, molecular weight, polyaminoamides, reaction rate constant.

**For citation:** Borkina Ya. V., Fleisher V. L. Kinetic characteristics of polycondensation of the adipic acid with diethylenetriamine. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 53–59 (In Russian).

**Введение.** Полиаминоамиды на основе адипиновой кислоты и диэтилентриамин (ДЭТА) представляют большой интерес для органического синтеза, прежде всего, благодаря наличию в своей структуре вторичных аминогрупп, предоставляющих возможности для дальнейшего модифицирования и получения на их основе новых химических продуктов.

В настоящее время полиаминоамиды адипиновой кислоты и ДЭТА являются основой влагопрочных веществ для бумаги и картона (полиамидамин эпихлоргидриновые смолы).

В патентной литературе [1–9] достаточно подробно описаны способы синтеза полиаминоамидов адипиновой кислоты и ДЭТА как промежуточной стадии получения влагопрочных смол. Получение соответствующих полиаминоамидов возможно при проведении реакции в расплаве, в растворе, при различных соотношениях реагентов, с использованием регуляторов молекулярной массы и т. д.

При этом чаще всего исследуется влияние состава исходной смеси на степень полимеризации продукта, динамическую вязкость растворов полиаминоамидов в 1,0 М  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , на pH и динамическую вязкость водных растворов продуктов [10–11].

Для получения полиаминоамидов адипиновой кислоты и ДЭТА с заданной молекулярной массой применяются регуляторы молекулярной массы, в качестве которых используются монофункциональные вещества (этанол амины, одноосновные кислоты и т. д.). Изучено влияние количества регуляторов молекулярной массы на степень полимеризации и динамическую вязкость растворов полученных продуктов в 1,0 М хлористом аммонии [12].

Анализ зарубежной патентной литературы показал, что предпочтительными условиями получения полиаминоамидов адипиновой кислоты и ДЭТА являются:

- мольное соотношение адипиновая кислота : ДЭТА, варьируемое в пределах 1,0–1,1 : 0,9–1,0 соответственно;
- температура реакции – 150–180°C;
- продолжительность реакции – до достижения требуемой вязкости раствора.

Основными нерешенными вопросами являются:

- влияние температуры и продолжительности на степень завершенности реакции адипиновой кислоты и ДЭТА;
- определение среднemasсовой степени полимеризации продуктов;
- влияние температуры и продолжительности реакции на молекулярную массу продуктов, полученных без использования регуляторов молекулярной массы;

– определение константы скорости процесса поликонденсации адипиновой кислоты и ДЭТА.

Поэтому целью данной работы являлся расчет кинетических характеристик процесса поликонденсации адипиновой кислоты с ДЭТА, проводимого в расплаве при различных температурах.

**Основная часть.** Ранее нами [13] было изучено влияние температуры и продолжительности процесса поликонденсации адипиновой кислоты с ДЭТА на степень конверсии реагентов. Установлено, что увеличение температуры процесса приводит к увеличению скорости реакции, о чем свидетельствовало увеличение степени конверсии реагентов при меньшей продолжительности процесса. Взаимодействие эквимольных количеств адипиновой кислоты и ДЭТА проводили в расплаве. Соотношение реагентов 1 : 1 было выбрано для достижения наибольших степеней полимеризации. При этом из реакционной массы проводили удаление воды с целью смещения направления реакции в сторону образования высокомолекулярного продукта. Процесс поликонденсации исследовали при температурах 160, 170, 180°C. Контроль за ходом реакции осуществляли по изменению содержания функциональных групп в системе, для чего с периодичностью в 1 ч определяли кислотное и аминное числа реакционной массы. Процесс проводили до тех пор, пока вышеуказанные показатели не становились неизменными в течение некоторого времени либо в системе расходовались карбоксильные группы, о чем свидетельствовала невозможность определения кислотного числа.

Для расчета кинетических характеристик процесса поликонденсации были приняты следующие допущения [14]:

- отсутствуют обратные реакции (ввиду их низкой скорости);
- поликонденсация является линейной;
- соблюдается принцип Флори (реакционная способность функциональной группы не зависит от степени полимеризации макромолекулы);
- реакционная способность функциональной группы не зависит от других функциональных групп и вязкости среды;
- наблюдается стехиометрия реагирующих функциональных групп;
- процесс проводится в расплаве.

На основании полученных экспериментальных данных рассчитывали следующие кинетические характеристики [14]:

- степень завершенности реакции  $p$ :

$$p = \frac{c_0 - c}{c_0}, \quad (1)$$

где  $c_0$  – исходная концентрация одной из функциональных групп, моль/л;  $c$  – текущая концентрация одной из функциональных групп, моль/л;  
 – среднечисловую степень полимеризации полимера  $\langle p_n \rangle$ :

$$\langle p_n \rangle = \frac{1}{1-p}; \quad (2)$$

– среднемассовую степень полимеризации  $\langle p_w \rangle$ :

$$\langle p_w \rangle = \frac{1+p}{1-p}; \quad (3)$$

– среднечисловую молекулярную массу  $\langle M_n \rangle$ , г/моль:

$$\langle M_n \rangle = m \cdot \langle p_n \rangle = \frac{m}{1-p}, \quad (4)$$

где  $m$  – молекулярная масса элементарного звена полимера, г/моль;

– среднемассовую молекулярную массу  $\langle M_w \rangle$ , г/моль:

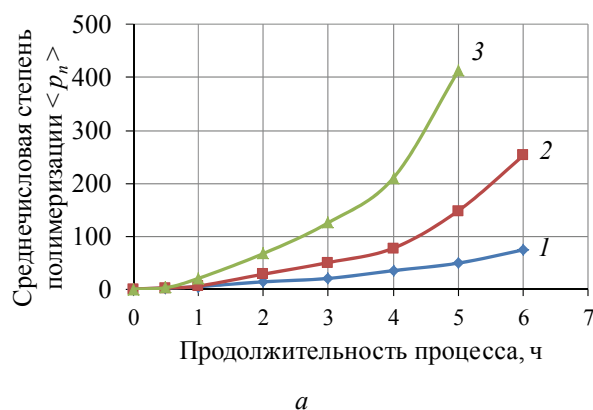
$$\langle M_w \rangle = \langle M_n \rangle \cdot (1+p). \quad (5)$$

При этом одновременно с проведенными расчетами молекулярной массы методом концевых (карбоксильных) групп экспериментально определяли фактическую среднечисловую молекулярную массу (6):

$$\langle M_n \rangle = \frac{56,11 \cdot 10^3}{\text{КЧ}}, \quad (6)$$

где КЧ – кислотное число смеси, мг КОН/г; и производили расчет фактической среднемассовой молекулярной массы по формуле (5).

В данном случае степень полимеризации и молекулярная масса полиаминоамида представляют собой средние величины, так как полимер состоит из макромолекул разной длины.



На рис. 1 представлен фрагмент зависимости степени завершенности реакции, под которой понимают степень истощения функциональных групп, от продолжительности процесса. Видно, что с повышением температуры процесса скорость реакции увеличивается, о чем свидетельствует рост степени завершенности реакции в самом начале процесса.

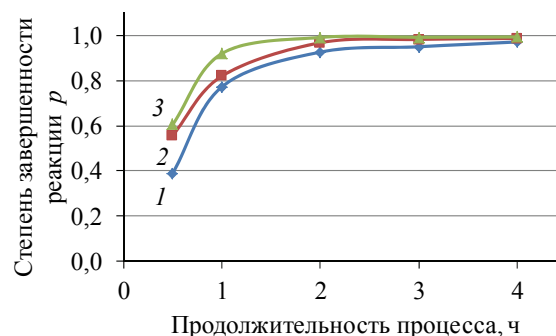


Рис. 1. Зависимость степени завершенности реакции ДЭТА с адипиновой кислотой от продолжительности процесса при температуре: 1 – 160°C; 2 – 170°C; 3 – 180°C

Зависимость среднечисловой (а) и среднемассовой (б) степени полимеризации полиаминоамидов от продолжительности процесса представлена на рис. 2. При проведении процесса поликонденсации адипиновой кислоты и ДЭТА при более высоких температурах образуется продукт с большей степенью полимеризации, имеющий, соответственно, большую молекулярную массу (рис. 3).

Диаграммы, представленные на рис. 3, показывают, что на практике не образуется продукт с рассчитанной степенью полимеризации, однако полимер, полученный при проведении процесса при температуре 180°C, имеет, как было указано ранее, большую молекулярную массу.

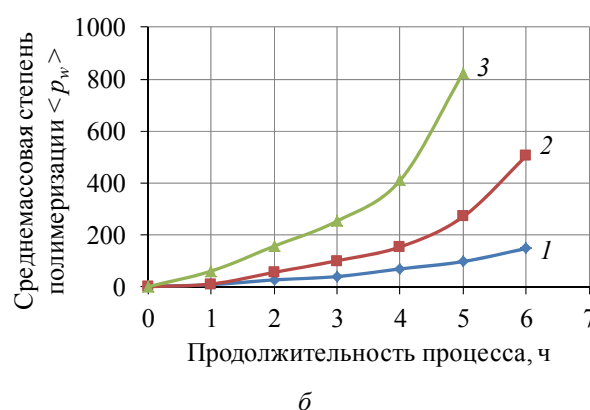


Рис. 2. Зависимость среднечисловой (а) и среднемассовой (б) степеней полимеризации полиаминоамидов от продолжительности процесса поликонденсации адипиновой кислоты с ДЭТА, проведенного при температуре: 1 – 160°C; 2 – 170°C; 3 – 180°C

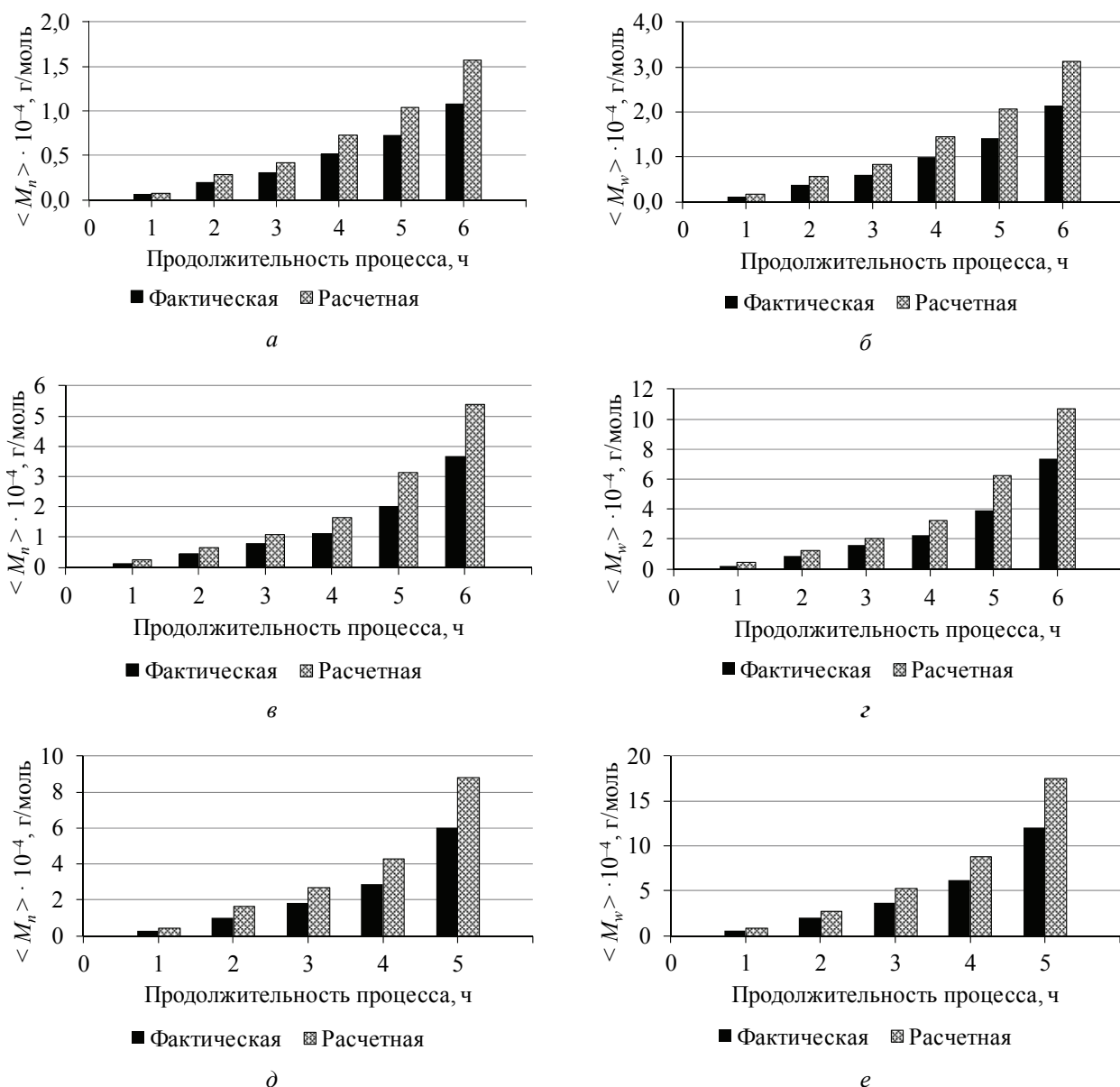


Рис. 3. Изменение среднечисловой (а, в, д) и среднемассовой (б, г, е) молекулярной массы продукта в процессе поликонденсации адипиновой кислоты с ДЭТА, проведенном при температуре: а, б – 160°C; в, г – 170°C; д, е – 180°C

Представленный на рис. 4 фрагмент зависимости среднечисловой степени полимеризации полиаминоамидов от степени завершенности реакции показывает, что при низких степенях завершенности реакции ДЭТА с адипиновой кислотой образуются олигомерные соединения.

С учетом принятого ранее допущения о линейности протекающего процесса при мольном соотношении реагентов 1 : 1 концентрация карбоксильных групп  $c(-\text{COOH})$  в исходной смеси равна концентрации первичных аминогрупп  $c(-\text{NH}_2)$ :

$$c(-\text{COOH}) = c(-\text{NH}_2) = c_0. \quad (7)$$

Процесс поликонденсации адипиновой кислоты с ДЭТА проводили в отсутствие катали-

затора, поэтому кинетическое уравнение реакции выражается следующей формулой [15]:

$$\langle p_n \rangle^2 = 2kc_0^2t + \text{const}, \quad (8)$$

где  $k$  – константа скорости реакции,  $\text{л}^2/(\text{моль}^2 \cdot \text{с})$ ;  $t$  – продолжительность реакции, с.

Кинетические зависимости  $\langle p_n \rangle^2 = f(t)$  для различных температур (рис. 5) включают две области: область низких степеней полимеризации (линейная зависимость) и область высоких степеней полимеризации. Отклонения кривых от линейной зависимости в области высоких степеней полимеризации можно объяснить совокупностью побочных реакций, протекающих при продолжительном воздействии температуры [15].

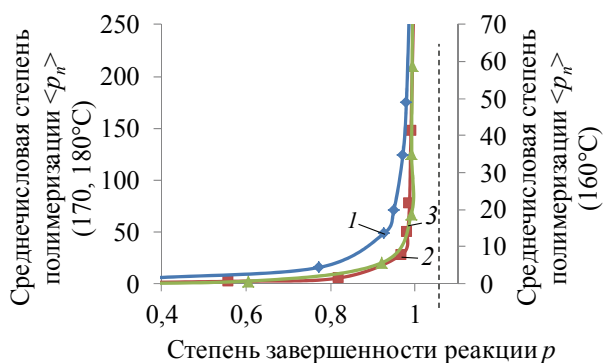


Рис. 4. Зависимость среднечисловой степени полимеризации полиаминоамидов от степени завершенности реакции ДЭТА с адипиновой кислотой, проведенной при температуре: 1 – 160 °C; 2 – 170 °C; 3 – 180 °C

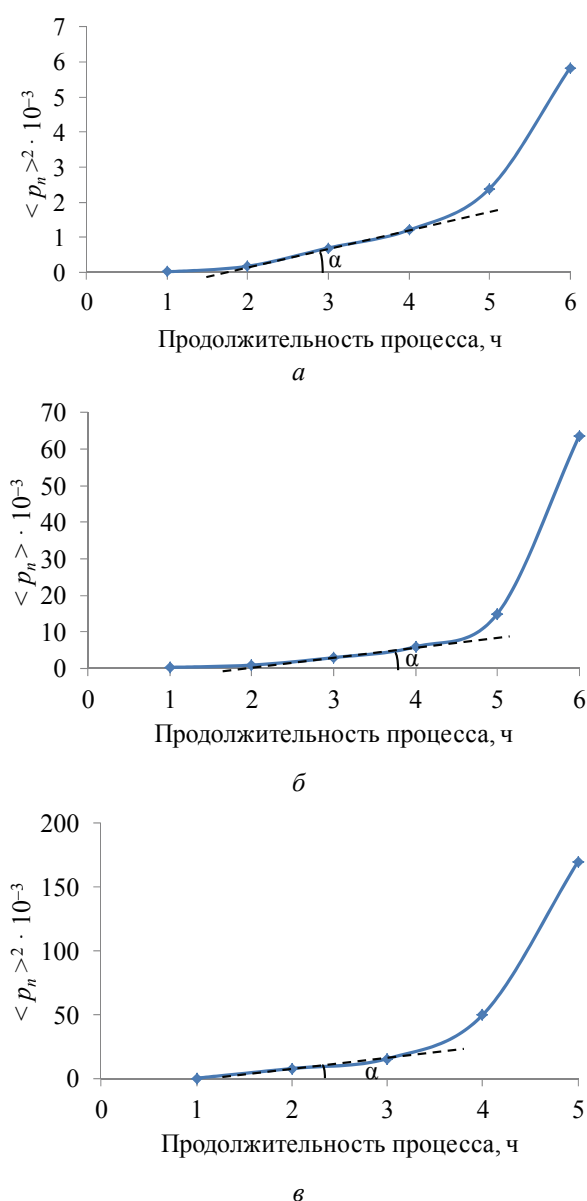


Рис. 5. Кинетика процесса взаимодействия адипиновой кислоты с ДЭТА при температуре: а – 160 °C; б – 170 °C; в – 180 °C

По тангенсу угла наклона  $\alpha$  кривой в области низких степеней полимеризации по отношению к оси абсцисс (рис. 5) рассчитывали константу скорости реакции, которая при разных температурах составляла:

- $k_1 = 5,77 \cdot 10^5 \text{ л}^2/(\text{моль}^2 \cdot \text{с})$  при 160 °C;
- $k_2 = 57,86 \cdot 10^5 \text{ л}^2/(\text{моль}^2 \cdot \text{с})$  при 170 °C;
- $k_3 = 201,00 \cdot 10^5 \text{ л}^2/(\text{моль}^2 \cdot \text{с})$  при 180 °C.

Расчетные данные подтверждают сделанные выводы, а также свидетельствуют о неравновесном характере проводимой реакции.

В связи с тем что одним из основных требований к химическим вспомогательным веществам для целлюлозосодержащих композиционных материалов является их растворимость в воде, продукт поликонденсации адипиновой кислоты с ДЭТА должен быть линейным. Ранее проведенные нами исследования [13], а также полученные кинетические характеристики показывают, что в процессе поликонденсации адипиновой кислоты с ДЭТА образуются соответствующие полиаминоамиды линейного строения.

**Заключение.** Таким образом, на основании произведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- повышение температуры процесса поликонденсации эквивалентных количеств адипиновой кислоты и ДЭТА, проводимого в расплаве, приводит к увеличению степени завершенности реакции в самом начале процесса за счет возрастания скорости реакции, что подтверждается расчетом констант скорости реакции адипиновой кислоты с ДЭТА при различных температурах ( $k_1 = 5,77 \cdot 10^5 \text{ л}^2/(\text{моль}^2 \cdot \text{с})$  при 160 °C;  $k_2 = 57,86 \cdot 10^5 \text{ л}^2/(\text{моль}^2 \cdot \text{с})$  при 170 °C;  $k_3 = 201,00 \cdot 10^5 \text{ л}^2/(\text{моль}^2 \cdot \text{с})$  при 180 °C);

- среднечисловая степень полимеризации полиаминоамидов аналогично среднечисловой степени полимеризации зависит от температуры реакции, увеличение которой до 180 °C позволит получить продукт со среднечисловой и среднечисловой степенью полимеризации 412 и 824 соответственно при степени завершенности реакции, равной 0,998;

- при увеличении температуры реакции ДЭТА и адипиновой кислоты повышается степень полимеризации полиаминоамидов, соответственно, возрастают среднечисловая и среднечисловая молекулярные массы продуктов, которые при среднечисловой степени полимеризации полиаминоамидов 412 составляют 60 215 и 120 284 г/моль соответственно (при проведении реакции при 180 °C в течение 5 ч).

Проведенные исследования позволяют управлять процессом поликонденсации адипиновой кислоты и ДЭТА в расплаве путем контроля температуры и продолжительности реакции с целью получения продуктов с заданными свойствами.

### Список литературы

1. Method of stabilizing aqueous cationic polymers: pat. CN 101765630 B. Date of appl.: 28.07.2008; publ. date: 13.11.2013. URL: <https://patents.google.com/patent/CN101765630B/en> (date of access: 07.07.2020).
2. Polyamide-epoxy chloropropane resin wrinkling agent: pat. CN 102286150 A. Date of appl.: 12.07.2011; publ. date: 21.12.2011. URL: <https://patents.google.com/patent/CN102286150A/en> (date of access: 06.07.2020).
3. Thermosetting creping adhesive with reactive modifiers: pat. CN 102906209 B. Date of appl.: 01.03.2011; publ. date: 02.07.2014. URL: <https://patents.google.com/patent/CN102906209B/en> (date of access: 07.07.2020).
4. Process for the production of improved polyaminopolyamide epichlorohydrin resins: pat. EP 0469891 B1. Date of appl.: 31.07.1991; publ. date: 03.05.1995. URL: <https://patents.google.com/patent/EP1680546B1/de> (date of access: 06.07.2020).
5. Polyamide-epichlorohydrin resin: pat. EP 0515750 A2. Date of appl.: 21.08.1991; publ. date: 02.12.1992. URL: <https://patents.google.com/patent/EP0515750A2/ru> (date of access: 03.03.2021).
6. Reduced byproduct high solids polyamine-epihalohydrin compositions: pat. EP 1337576 B1. Date of appl.: 12.07.2001; publ. date: 08.08.2012. URL: <https://patents.google.com/patent/EP1337576B1/en> (date of access: 06.07.2020).
7. Process of preparing polyamine-epihalohydrin resins with reduced byproduct content: pat. EP 1770110 A2. Date of appl.: 12.06.2000; publ. date: 04.04.2007. URL: <https://patents.google.com/patent/EP1770110A2/en> (date of access: 01.02.2021).
8. Thermally hardenable cationic resin from dicarboxylic acid, dialkanolamine and polyamine copolymer condensed with epichlorohydrin: pat. US 4075177. Date of appl.: 12.01.1978; publ. date: 01.02.1978. URL: <https://uspto.report/patent/grant/4075177> (date of access: 06.07.2020).
9. Dry-strength system: pat. US 6294645 B1. Date of appl.: 25.07.1997; publ. date: 25.09.2001. URL: <https://patents.google.com/patent/US6294645B1/en> (date of access: 08.01.2021).
10. Creping adhesives made from amineterminated polyamidoamines: pat. KR 101451452 B1. Date of appl.: 18.01.2008; publ. date: 15.10.2014. URL: <https://patents.google.com/patent/kr10145145b1/en> (date of access: 07.07.2020).
11. Adhesive composition of low molecular weight polyaminopolyamide-epichlorohydrin (PAE) resin and protein: pat. EP 2054461 B1. Date of appl.: 23.08.2007; publ. date: 23.08.2017. URL: <https://patents.google.com/patent/EP2054461B1/en> (date of access: 06.07.2020).
12. Highly branched polyamidoamines and their preparation: pat. EP 0802215 A1. Date of appl.: 17.04.1997; publ. date: 22.10.1997. URL: <https://patents.google.com/patent/EP0802215A1/en> (date of access: 08.01.2021).
13. Боркина Я. В., Флейшер В. Л. Влияние температуры и продолжительности поликонденсации диэтилентриамина и адипиновой кислоты на степень конверсии реагентов // Технология органических веществ: материалы 85-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 1–13 февр. 2021 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2021. С. 52–54.
14. Шишонюк М. В. Высокмолекулярные соединения. Минск: Выш. шк., 2012. 535 с.
15. Осипова Г. В., Беспалова Г. Н. Химия и физика полимеров. В 2 ч. Ч. 2. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2012. 92 с.

### References

1. Luo Y., Lin Geld C. E., Johnson D. C., Hajapo C. Method of stabilizing aqueous cationic polymers. Patent CN, no. 101765630 B, 2013. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN101765630B/en> (accessed 07.07.2020).
2. Song Hui, Kangliano, Zhao Min, Youth Cong. Polyamide-epoxy chloropropane resin wrinkling agent. Patent CN, no. 102286150 A, 2011. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN102286150A/en> (accessed 06.07.2020).
3. Ling Gaode C. E., Faworth K. D., Johnson D. C., Town Thunder D. F., White T. I., Hajiope C. Thermosetting creping adhesive with reactive modifiers. Patent CN, no. 102906209 B, 2014. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN102906209B/en> (accessed 07.07.2020).
4. Miller A. J., Stubbs B. M. Process for the production of improved polyaminopolyamide epichlorohydrin resins. Patent EP, no. 0469891 B1, 1995. Available at: <https://patents.google.com/patent/EP1680546B1/de> (accessed 06.07.2020).
5. Chan L. L., Lau P. W.-K. Polyamide-epichlorohydrin resin. Patent EP, no. 0515750 A2, 1992. Available at: <https://patents.google.com/patent/EP0515750A2/ru> (accessed 03.03.2021).

6. Riehle R. J. Reduced byproduct high solids polyamine-epihalohydrin compositions. Patent EP, no. 1337576 B1, 2012. Available at: <https://patents.google.com/patent/EP1337576B1/en> (accessed 06.07.2020).
7. Allen A. J., Hoglen J. J., Busink R., Cheng H. N. Process of preparing polyamine-epihalohydrin resins with reduced byproduct content. Patent EP, no. 1770110 A2, 2007. Available at: <https://patents.google.com/patent/EP1770110A2/en> (accessed 01.02.2021).
8. Bonnet J.-C., Tesson G. Thermally hardenable cationic resin from dicarboxylic acid, dialkanolamine and polyamine copolymer condensed with epichlorohydrin. Patent US, no. 4075177, 1978. Available at: <https://uspto.report/patent/grant/4075177> (accessed 06.07.2020).
9. Allen A. J., Echt E., Maslanka W. W., Peters J. C. Dry-strength system. Patent US, no. 6294645 B1, 2001. Available at: <https://patents.google.com/patent/US6294645B1/en> (accessed 08.01.2021).
10. Allen A. J. Creping adhesives made from amineterminated polyamidoamines. Patent KR, no. 101451452 B1, 2014. Available at: <https://patents.google.com/patent/kr101451452b1/en> (accessed 07.07.2020).
11. Spraul B. K. Adhesive composition of low molecular weight polyaminopolyamide-epichlorohydrin (PAE) resin and protein. Patent EP, no. 2054461 B1, 2017. Available at: <https://patents.google.com/patent/EP2054461B1/en> (accessed 06.07.2020).
12. Allen A. J. Highly branched polyamidoamines and their preparation. Patent EP, no. 0802215 A1, 1997. Available at: <https://patents.google.com/patent/EP0802215A1/en> (accessed 08.01.2021).
13. Borkina Ya. V., Fleisher V. L. Effect of the temperature and duration of polycondensation of diethylenetriamine and adipic acid on the degree of conversion of reagents. *Materialy 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov: "Tekhnologiya organicheskikh veshchestv"* [Materials of the 85th scientific and technical conference of faculty, researchers and postgraduates "Technology of organic substances"]. Minsk, 2021, pp. 52–54 (In Russian).
14. Shishonok M. V. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya* [High molecular weight compounds]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 2012. 535 p.
15. Osipova G. V., Bepalova G. N. *Khimiya i fizika polimerov. V 2 chastyakh. Chast' 2* [Chemistry and physics of polymers. In 2 parts. Part 2]. Ivanovo, Ivanovskiy gosudarstvennyy khimiko-tekhnologicheskii universitet Publ., 2012. 92 p.

#### Информация об авторах

**Боркина Яна Валерьевна** – аспирант кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [yanaborkina@mail.ru](mailto:yanaborkina@mail.ru)

**Флейшер Вячеслав Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [v\\_fleisher@list.ru](mailto:v_fleisher@list.ru)

#### Information about the authors

**Borkina Yana Valer'evna** – PhD student, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [yanaborkina@mail.ru](mailto:yanaborkina@mail.ru)

**Fleisher Vyacheslav Leonidovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [v\\_fleisher@list.ru](mailto:v_fleisher@list.ru)

Поступила 30.04.2021