

## STUDY OF THERMAL DECOMPOSITION OF THE COPOLYMER BASED ON POLYETHYLENE GLYCOL FUMARATE WITH METHACRYLIC ACID

S.Zh. Davrenbekov<sup>1</sup>, U.B. Toleuov<sup>1\*</sup>, A.N. Bolatbai<sup>1</sup>, D. Havlicek<sup>2</sup>,  
T.O. Khamitova<sup>3</sup>, E.J. Zhakupbekova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ye.A. Buketov Karaganda State University NPJSC, Kazakhstan

<sup>2</sup>Charles University, Prague, Czech Republic<sup>3</sup> The Department of Soil Science and Agrochemisrty,  
Agronomic Faculty, Saken Seifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan, Kazakhstan  
E-mail: [bekalols1@gmail.com](mailto:bekalols1@gmail.com)

**Abstract.** *Introduction.* Thermal performance of the copolymer based on polyethylene glycol fumarate and methacrylic acid in a dynamic mode, in an inert nitrogen environment are considered in the present work. Kinetic evaluation of thermal decomposition process has been conducted, using three different data processing methods (Friedman, Ozawa-Flynn-Wall, Kissinger-Akahira-Sunose). Utilizing a mixed-method approach the kinetic triplets  $E_a$ ,  $A$ ,  $g(a)$  have been received. The received kinetic parameters have been used to calculate the thermodynamic characteristics of Gibbs energy ( $\Delta G$ ), enthalpy ( $\Delta H$ ) and entropy of activation ( $\Delta S$ ). A negative value of  $\Delta S$  indicates a decrease in the random effects at the gas-solid interface, and a decrease in the degree of freedom of substances in the process of thermal degradation of the copolymer. The thermal gravimetric analysis (TGA) and differential thermogravimetric analysis (DTA) of the curves have been used in the nitrogen environment, using a heating rate of 2.5, 5, 10 or 20°C/min. The method of the Invariant Kinetic Parameters has been used to identify the reaction model and pre-exponential factor. The main phase of the copolymer decomposition has been established, which has occurred within a narrow temperature interval, and is evidenced by the spike on the differential curve. In the range of 30-150°C there is a slight loss of mass with the release of volatile compounds. The second stage occurs in the range of 150-300°C; the weight loss is ~10% of the total mass of the substance. The third stage of decomposition at which the main loss of the sample is observed, is the key one and begins at the temperature of 300°C and ends at 500°C. The mass of the substance residue has been ~15%. It can be seen that the temperature of the DTG peaks is related to the heating rate: with an increase in the heating rate, the temperature at the DTG maximum increases, and the temperatures at the beginning and end of the process are shifted towards higher values. The kinetic parameters for the p-EGF:MAA copolymer have been obtained from the slope and intersection of the graph  $E$  and  $\ln A$ . The values for the 13 reaction models have been received. The used methods have resulted in a proper energy activation alignment within 223-229 kJ mol<sup>-1</sup>. The design and experimental data have provided the close values. The TGA and DTA curve analysis has shown a sufficient thermal stability of these copolymers in the nitrogen environment. According to the results of the calculations, it can be seen that the values found by these methods do not strongly depend on the conversion.

**Keywords:** dynamic thermogravimetry, thermal decomposition, copolymer based on polyethylene glycol fumarate and methacrylic acid, energy activation, isoconversional kinetic analysis

**Citation:** S.Zh. Davrenbekov, U.B. Toleuov, A.N. Bolatbai, D. Havlicek, T.O. Khamitova, E.J. Zhakupbekova. Study of thermal decomposition of the copolymer based on polyethylene glycol fumarate with methacrylic acid. *Chem. J. Kaz.*, **2022**, 4(80), 110-119. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2022-3/2710-1185.99>

<i>Davrenbekov Santai Zhanabilovich</i>	<i>Professor, Doctor of Chemical Sciences, e-mail: sdavrenbekov@mail.ru</i>
<i>Tuleuov Ulygbek Borashevich</i>	<i>Doctoral student, e-mail: bekalols1@gmail.com</i>
<i>Bolatbai Abylaikhan Nurmanovich</i>	<i>Doctoral student. e-mail: abylai_bolatbai@mail.ru</i>
<i>Havlicek David</i>	<i>Associate Professor, e-mail: David.havlicek@natur.cuni.cz</i>
<i>Khamitova Tolkyn Ondirissovna</i>	<i>Doctor of Chemical Sciences, e-mail: khamitova.t@inbox.ru</i>
<i>Zhakupbekova Elmira</i>	<i>Candidate of Chemical Sciences, e-mail: elmira_zhakupbek@mail.ru</i>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СОПОЛИМЕРА ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЬФУМАРАТА С МЕТАКРИЛОВОЙ КИСЛОТОЙ

*С.Ж. Давренбеков<sup>1</sup>, У.Б. Тулеуов<sup>1\*</sup>, А.Н. Болатбай<sup>1</sup>, Д. Хавличек<sup>2</sup>,  
Э.Ж. Жакупбекова<sup>1</sup>, Т.О. Хамитова<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Химический факультет НАО Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан*

<sup>2</sup>*Карлов Университет, Прага, Чехия*

<sup>3</sup>*Кафедра почвоведения и агрохимии агрономического факультета, Казахского агротехнического университета имени Сакена Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан  
E-mail: bekalols1@gmail.com*

**Резюме.** *Введение.* В настоящей работе рассмотрены термические характеристики сополимера полиэтиленгликольфумарата с метакриловой кислотой в динамическом режиме, в инертной среде азота. Кинетический анализ процесса термической деструкции проведен при трех разных методах обработки данных (Фридмана, Озавы-Флина-Уолла, Киссинджеры-Акахиры-Сануза). Используя комбинации различных методов, получены кинетические триплеты  $E_a$ ,  $A$ ,  $g(a)$ . Полученные кинетические параметры были использованы для расчета термодинамических характеристик энергии Гиббса ( $\Delta G$ ), энтальпии ( $\Delta H$ ) и энтропии активации ( $\Delta S$ ). Отрицательное значение  $\Delta S$  говорит об уменьшении случайных эффектов на границе газ-твердое тело и уменьшении степени свободы веществ в процессе термической деградации сополимера. Кривые термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциального термогравиметрического анализа (ДТА) сополимера были изучены в атмосфере азота при скорости нагревания 2.5, 5, 10, 20°C/мин. Использован метод инвариантных кинетических параметров для определения модели реакции и предэкспоненциального множителя. Установлен основной этап разложения сополимера происходящие в узком интервале температур, который подтверждается пиком на дифференциальной кривой. В интервале 30-150°C происходит незначительная потеря массы с выделением легколетучих соединений. Вторая стадия происходит в интервале 150-300°C потеря массы составляет ~10% от общей массы вещества. Третья стадия разложения при которой наблюдается основная убыль образца является ключевой и начинается при температуре 300°C и оканчивается при 500°C. Масса остатка вещества составила ~15%. видно, что температура пиков ДТГ связана со скоростью нагрева: с увеличением скорости нагрева увеличивается температура в максимуме ДТГ, а также температуры начало и конца процесса смещены в сторону более высоких значений. Кинетические параметры для сополимера п-ЭГФ:МАК были получены по наклону и пересечению графика  $E$  и  $\ln A$ . Были получены значения для 13-и моделей реакции. Использованные методы дали хорошее согласование энергий активации в пределах 223-229 кДж моль<sup>-1</sup>. Расчетные и экспериментальные данные дали близкие значения. Анализ ТГА и ДТГ кривых, показал достаточную термоустойчивость данных сополимеров в атмосфере азота. По результатам расчетов можно увидеть, что значения, найденные данными методами, не сильно зависят от конверсии.

**Ключевые слова:** динамическая термогравиметрия, термическая деструкция, сополимер полиэтиленгликольфумарата с метакриловой кислотой, энергия активации, изоконверсионный кинетический анализ

<i>Давренбеков Сантай Жанабилови</i>	<i>Профессор, доктор химических наук</i>
<i>Тулеуов Улугбек Борашевич</i>	<i>Докторант</i>
<i>Болатбай Абылайхан Нурманович</i>	<i>Докторант</i>
<i>Хавличек Давид</i>	<i>Доцент</i>
<i>Хамитова Толкын Ондирисовна</i>	<i>Доктор химических наук</i>
<i>Жакупбекова Эльмира Жуматаевна</i>	<i>кандидат химических наук</i>

## 1. Введение.

В последнее время интерес к ненасыщенным полиэфирным смолам в мире существенно возрос. Это объясняется некоторыми особыми характеристиками продукта, полученными на их основе, такими как: высокая прочность, упругость, высокая стойкость к вибрационным нагрузкам, хорошее теплоизоляционное свойство, радиопрозрачность, достаточная жесткость конструкций и низкий удельный вес [1], что вывела их в ряд конструкционных материалов, имеющих особое преимущество перед другими материалами со схожими качествами. Имея такой спектр полезных свойств, подходящими объектами для получения, являются набухшие в растворителе сшитые полимеры - полимерные гели [2].

Термический анализ широко распространен в исследовании термической стабильности веществ [3,4]. Исследование кинетических параметров важно с точки зрения разработки процесса для получения продукта с четко определенными свойствами. Помимо того, информация, полученная в результате кинетических исследований, полезна при определении оптимальных условий процесса дегградации, а именно периода отжига, наибольшей температуры и режима нагрева сополимера.

В данной работе была исследована кинетика термической дегградации, раннее синтезированного сополимера [5-6] полиэтиленгликольфумарата с метакриловой кислотой.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1 Термический анализ

В качестве объектов исследования использовали синтезированные ранее [5] сополимеры полиэтиленгликольфумарата (п-ЭГФ) с метакриловой кислотой (МАК) 42.09:57.91 масс.%. Исследование термических свойств сополимеров п-ЭГФ:МАК осуществляли на приборе для синхронного термического анализа Labsys Evolution TG-DTA/DSC фирмы «Setaram» в динамическом режиме в интервале температур 30-600°C при нагревании в тигле Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со скоростью от 2.5, 5, 10, 20°C/мин в инертной среде азота со скоростью потока 30 мл/мин. Калибровку прибора для термогравиметрических исследований и теплового потока производили на стандартах CaCO<sub>3</sub> и In соответственно. Обработку экспериментальных данных выполняли с использованием программ Microsoft Excel, Processing и Origin.

### 2.2 Кинетический анализ

Кинетика термического разложения выражается данным уравнением:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (1)$$

где  $\alpha$  – степень превращения вещества,  $t$  – время реакции,  $k$  – константа скорости разложения, которая является функцией, зависимой от температуры, и описывается уравнением Аррениуса:

$$k(T) = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (2)$$

Следовательно, общий вид уравнения (1) записывается как:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (3)$$

где  $A$  – пред экспоненциальный множитель,  $E$  - энергия активации,  $R$  - универсальная газовая постоянная ( $8.314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ), а  $T$  - температура (К). Энергия активации ( $E$ ) может быть получена интегральными и дифференциальными методами.

### 2.3 Термодинамическое исследование

Термодинамические параметры можно получить из основного выражения [7-8]:

$$k = \frac{\chi^{ek_B T}}{h} \exp\left(\frac{\Delta S^\ddagger}{R}\right) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

где  $\chi$  - коэффициент прохождения равный единице для мономолекулярных реакций,  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $h$  - постоянная Планка,  $e$  - число Непера, и  $S$ - изменение энтропии при образования активного комплекса.

С учетом предэкспоненциальной константы  $A$  из уравнений Аррениуса получается следующее выражение:

$$A = \frac{\chi^{ek_B T}}{h} \exp\left(\frac{\Delta S^\ddagger}{R}\right) \quad (5)$$

После преобразования уравнения (5), изменение энтропии активного комплекса можно выразить уравнением (6):

$$\Delta S^\ddagger = R(\ln A - \ln \frac{\chi^{ek_B T}}{h}) \quad (6)$$

Изменения свободной энергии Гиббса и энтальпии активного комплекса можно выразить из известных термодинамических уравнений (7) и (8):

$$E_A = \Delta H + RT \quad (7)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (8)$$

$\Delta S$ ,  $\Delta H$  и  $\Delta G$  рассчитаны при температурных пиках ДТГ, что соответствует наибольшей скорости процесса термической деструкции.

### 3. Результаты и обсуждения

Термическая деструкция сополимера полиэтиленгликольфумарата с метакриловой кислотой происходила при различных скоростях нагрева (2.5, 5, 10, 20°C/мин) в интервале температур 30-600°C. Данный подход был необходим для получения кинетических параметров сополимера. Данные были обработаны методами Фридмана, Озавы-Флинн-Уолла и Киссинджера-Акахиры-Сануза. Кривые ТГ и ДТГ для разных скоростей нагрева показаны на рисунке 1.

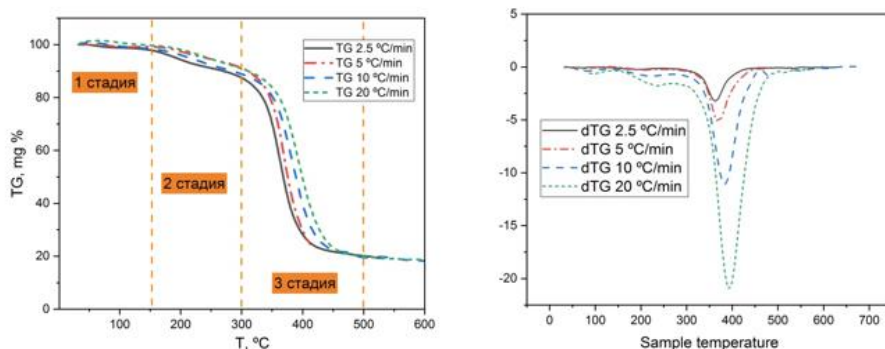
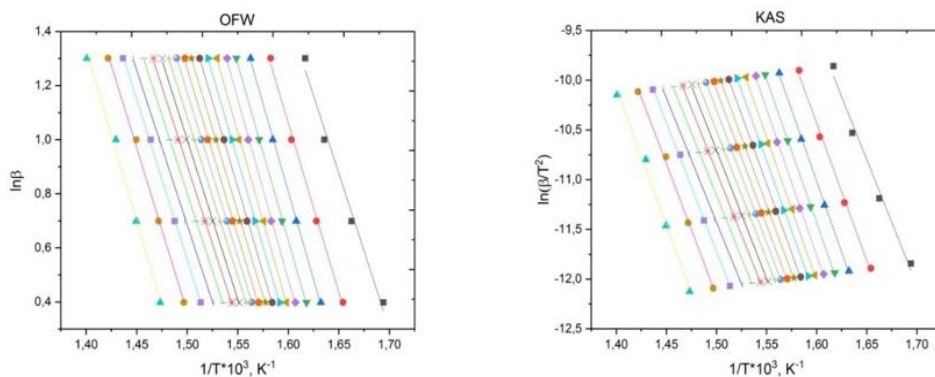


Рисунок 1 - Кривые ТГА и ДТГ сополимера п-ЭГФ:МАК 42,09:57,91 масс.%

Данные на рисунке 1 показывают, что при уменьшении скорости нагревания сополимер начинает разлагаться быстрее, что справедливо для всех неизотермических процессов. При термической деградации наблюдается 3 стадии потери веса. В интервале 30-150°C происходит незначительная потеря массы с выделением легколетучих соединений. Вторая стадия происходит в интервале 150-300°C потеря массы составляет ~10% от общей массы вещества. Третья стадия разложения, при которой наблюдается основная убыль образца является ключевой и начинается при температуре 300°C и оканчивается при 500°C. Масса остатка вещества составила ~15%.

Кривые ТГ, полученные при различных скоростях нагрева, затем использовали для расчета энергии активации  $E_a$  и предэкспоненциального коэффициента  $A$ . были установлены графически на рисунке 2.



**Рисунок 2** - Линеаризация данных термогравиметрии исследуемых сополимеров п-ЭГФ: МАК при разных скоростях нагрева, исходном соотношении:– 42.09:57.9. масс.%. (в атмосфере азота) с помощью методов: (а) – Озавы-Флинн-Уолла; (б) – Киссинджера-Акахиры-Сануза.

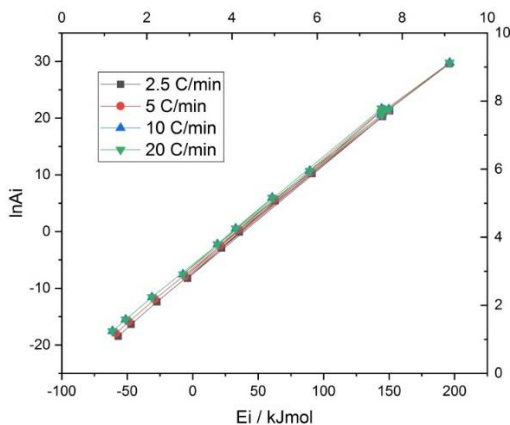
Как видно по графикам, точки, полученные интегральными методами Озавы-Флинн-Уолла и Киссинджера-Акахиры-Сануза имеют незначительные отличия и средняя энергия активации, полученная данными методами, имеет схожее значение.

**Таблица 1** - Зависимость энергии активации термической деструкции сополимеров п-ЭГФ с МАК от степени превращения

$\alpha$	кДж·моль <sup>-1</sup>		
	Фридмана	Озавы-Флинн-Уолла	Киссинджера-Акахиры-Сануза
0.05	225.89	209.18	209.93
0.10	246.47	228.03	229.51
0.15	251.52	236.58	238.37
0.20	246.80	237.76	239.53
0.25	246.84	243.04	245.02
0.30	239.32	238.29	239.95
0.35	232.38	232.32	233.63
0.40	228.86	230.05	231.18
0.45	223.64	225.37	226.20
0.50	223.14	224.99	225.75
0.55	219.41	220.78	221.29
0.60	212.79	214.43	214.55
0.65	214.43	214.66	214.75
0.70	212.89	211.48	211.34
0.75	213.29	209.57	209.26
0.80	214.90	208.02	207.57
0.85	228.66	215.41	215.24
0.90	236.42	221.49	221.52
0.95	244.14	229.43	229.68
ср. $\alpha$	229.57	223.73	224.44

Как видно по таблице, значения энергий активации изменяются в зависимости от степени превращения  $\alpha$ . При начальных степенях конверсии значения энергии активации имеют тенденцию к увеличению. При  $\alpha = 0.25$

энергия активации имеет максимальное значение, результат предполагает, что именно при этих значениях разрушается полимерная сетка исследуемого вещества, после чего энергия активации начинает уменьшаться и находит свой минимум при  $\alpha = 0.75 - 0.80$ .



**Рисунок 3** - Наблюдаемый эффект компенсации между предэкспоненциальным множителем и кажущейся энергией активации для термического разложения сополимера п-ЭГФ:МАК при различных скоростях нагрева

Рисунок 3 показывает корреляцию, между  $\ln A_i$  и  $E_i$  полученные методом СЕ (ABS). Значения, полученные для всех 13-и моделей реакций. Можно наблюдать, что коэффициент корреляции близится к единице при использовании всех моделей ( $R=0.99$ ), что свидетельствует о хорошей корреляции между всеми параметрами независимо от использования моделей.

Для углубленного изучения механизма термической деградации сополимера, были рассчитаны изменения энтропии ( $\Delta S$ ), свободной энергии Гиббса ( $\Delta G$ ) и энтальпии ( $\Delta H$ ). Значения приведены в таблице 2.

**Таблица 2** - Термодинамические параметры деградации сополимера

$\beta$ (°C/мин)	$\Delta H$ кДж/моль	$\Delta G$ кДж/моль	$\Delta S$ Дж/моль
2.5	224.490	333.488	-298.625
5	220.465	330.351	-301.057
10	203.849	314.258	-302.491
20	224.039	333.814	-300.753

Используя уравнения (4) были рассчитаны термодинамические характеристики энергии Гиббса ( $\Delta G$ ), энтропии активации ( $\Delta S$ ) и энтальпии ( $\Delta H$ ) при разных скоростях нагрева. Положительные значения Гиббса  $\Delta G$  свидетельствует о вынужденном процессе разрушения сополимера. Отрицательное значение  $\Delta S$  говорят об уменьшении случайных эффектов на

границе газ-твердое тело и уменьшении степени свободы веществ в процессе термической деградации сополимера.

На рисунке 4 представлен график зависимости параметров компенсации для сополимеров сополимера п-ЭГФ: МАК – 42.09:57.91 масс. %.

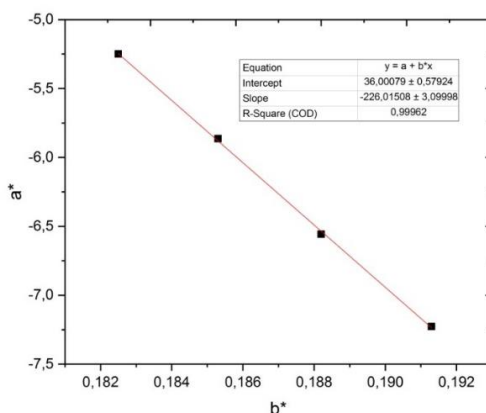


Рисунок 4 - График отношения корреляции  $a^*$  и  $b^*$

Кинетические параметры для сополимера п-ЭГФ:МАК были получены по наклону и пересечению графика  $E$  и  $\ln A$ . Значения энергии активации полученные данным методом схож со значениями полученными методами Озавы-Флинн-Уолла; Фридмана; Киссинджера - Акахиры-Сануза и составляют  $E=226 \text{ кДж/моль}$ .

#### 4. Заключение

В результате проведения кинетических расчётов, полученные данные чрезвычайно полезны для оптимизации процессов пиролиза и могут быть в дальнейшем использованы в материаловедении. Термогравиметрический анализ показал, что термическая стабильность данного сополимера происходит в три стадии. Кинетические расчеты, полученные методами Озавы-Флина-Уолла, Киссинджеры-Акахиры-Сануза и Рассчитанные термодинамические характеристики сополимера показали, что процесс деградации происходит вынужденно. С использованием методов Ахара-Брендли-Шарпа и инвариантных кинетических параметров были рассчитаны кинетические триплеты сополимера. В работе представлен обширный анализ деградации сополмера п-ЭГФ:МАК с использованием наиболее популярных кинетических методов расчета.

**Финансирование:** Исследование не получало никаких грантов от финансирующих организаций государственного, коммерческого или некоммерческого секторов

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов между авторами, требующего раскрытия в данной статье.



## ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЬФУМАРАТТЫҢ МЕТАКРИЛ ҚЫШҚЫЛЫМЕН СОПОЛИМЕРІНІҢ ТЕРМИЯЛЫҚ ҰДЫРАУЫН ЗЕРТТЕУ

С.Ж. Дәуренбеков<sup>1</sup>, Ұ.Б. Төлеуов<sup>1\*</sup>, А.Н. Болатбай<sup>1</sup>, Д.Хавличек<sup>2</sup>,  
Т.О. Хамитова<sup>3</sup>, Э.Ж. Жақыпбекова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Химия Факультеті, Бөкетов атындағы Қарағанды Университеті, Қарағанды, Қазақстан

<sup>2</sup>Карлов Университеті, Прага, Чехия

<sup>3</sup>Топырақтану және агрохимия кафедрасы, Сәкен Сейфуллин атындағы Агротехникалық университет, Нур-Сұлтан, Қазақстан

E-mail: [bekalols1@gmail.com](mailto:bekalols1@gmail.com)

**Түйіндеме.** *Кіріспе.* Жұмыста полиэтиленгликольфумараттың метакрил қышқылымен сополимерінің динамикалық режимде, азоттың инертті ортасындағы термиялық сипаттамалары қарастырылған. Термиялық деструкция процесінің кинетикалық сараптамасы мәліметтерді өңдеудің үш әр-түрлі әдістері кезінде (Фридман, Озава-Флин-Уолл, Киссинджер-Ахахира-Сануза) жүргізілді. Түрлі әдістердің комбинациясы қолданыла отырып,  $E_a$ ,  $A$ ,  $g(a)$  кинетикалық трипплеттары алынды. Алынған кинетикалық параметрлер Гиббс энергиясы ( $\Delta G$ ), энтальпия ( $\Delta H$ ) және активация энтропиясының ( $\Delta S$ ) термодинамикалық сипаттамаларын есептеу үшін қолданылды. Теріс  $\Delta S$  Газ - қатты шекарадағы кездейсоқ әсерлердің азаюы және сополимердің термиялық ыдырау процесінде заттардың еркіндік дәрежесінің төмендеуі туралы айтады. Сополимердің термогравиметриялық анализі (ТГА) мен дифференциалдық термогравиметриялық анализінің (ДТА) қисықтары азот атмосферасында жылыту жылдамдығының 2,5, 5, 10, 20°C/мин кезінде зерттелінді. Реакция моделі және экспоненциал алдылық көбейткішті анықтау үшін инвариантты кинетикалық параметрлер әдісі қолданылды. Сополимер ыдырауының дифференциалдық қисықтағы шыңымен дәлелденген, температураның тар интервалында жүретін негізгі кезеңі анықталды. 30-150°C аралығында Жеңіл ұшқыш қосылыстардың бөлінуімен массаның шамалы жоғалуы байқалады. Екінші кезең 150-300°C аралығында жүреді массаның жоғалуы заттың жалпы массасының ~10% құрайды. Ыдыраудың үшінші кезеңі, онда үлгінің төмендеуі байқалады және 300°C температурада басталып, 500°C температурада аяқталады. Қалдық массасы 15% DTG шыңдарының температурасы қыздыру жылдамдығымен байланысты екенін көруге болады: қыздыру жылдамдығының жоғарылауымен DTG максимумындағы температура жоғарылайды, сонымен қатар процестің басталуы мен аяқталуы кезінде жоғары мәнге ауысқанын байқауға болады р-EGF:MAA сополимерінің кинетикалық параметрлері  $E$  және  $\ln A$  графигінің еңісі мен қиылысуынан алынды. Реакцияның 13 моделінің мәндері алынды. Қолданылған әдістер активация энергиясының 223-229 кДж моль<sup>-1</sup> аралығында дұрыс келісін берді. Есептік және эксперименталдық мәліметтер ұқсас мәндерге ие болды. ТГА мен ДТГ қисықтарының сараптауы аталған сополимерлердің азот атмосферасындағы жеткілікті термотұрақтылығын көрсетті. Есептеулер нәтижелері бойынша бұл әдістер арқылы табылған мәндер түрлендіруге қатты тәуелді емес екенін көруге болады.

**Түйін сөздер:** динамикалық термогравиметрия, термиялық деструкция, полиэтиленгликольфумараттың метакрил қышқылымен сополимері, активация энергиясы, изоконверсиондық кинетикалық анализ

*Дәуренбеков Сантай Жанәбілұлы* профессор, химия ғылымдарының докторы

*Төлеуов Ұлықбек Борашұлы* Докторант

*Болатбай Абылайхан Нұрманұлы* Докторант

*Хавличек Давид* Доцент

*Хамитова Толқын Өндірісқызы* Химия ғылымдарының докторы

*Жакупбекова Эльмира Жұматайқызы* Химия ғылымдарының кандидаты

## Список литературы:

1. P. Penczek, Boncza- Z. Tomaszewski. Unsaturated polyester resins on the verge of the 21st century. *Polimery*, **1999**, 44, 709-715. DOI: <https://doi.org/10.14314/polimery.1999.709>
2. N. Sheikh, L. Jalili, F. Anvari. A study on the swelling behavior of poly(acrylic acid) hydrogels obtained by electron beam crosslinking. *Radiation Physics and Chemistry*, **2010**, 79, 735-739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2009.12.013>
3. A. Baudry, J. Dufay, N. Regnier, B. Mortaigne. Thermal degradation and fire behaviour of unsaturated polyester with chain ends modified by dicyclopentadiene. *Polymer Degradation and Stability*, **1998**, 61, 441-452. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00230-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00230-9)
4. M.Zh. Burkeyev, E.M. Tazhbayev, A.N. Bolatbay, et al. Study of Thermal Decomposition of the Copolymer Based on Polyethylene Glycol Fumarate with Acrylic Acid. *Journal of Chemistry*, **2022**. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3514358>
5. M.Zh. Burkeev, G.K. Kudaibergen, E.M. Tazhbayev, D. Hranicek., G.K. Burkeyeva, E.Zh. Sarsenbekova. Synthesis and investigation of copolymer properties on the basis of poly(ethylene glycol)fumarate and methacrylic acid, *Bulletin of the Karaganda University "Chemistry" series*, **2019**, 93, 32-38. DOI: <https://doi.org/10.31489/2019Ch1/32-38>
6. M.Zh. Burkeev, G.K. Kudaibergen, G.K. Burkeeva, et al. New Polyampholyte Polymers Based on Polypropylene Glycol Fumarate with Acrylic Acid and Dimethylaminoethyl Methacrylate. *Russian Journal of Applied Chemistry*, **2018**, 91, 1145-1152. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427218070121>
7. S. Żóltowska, I. Koltsov, K. Alejski, H. Ehrlich, M. Ciałkowski, T. Jesionowski. Thermal decomposition behaviour and numerical fitting for the pyrolysis kinetics of 3D spongin-based scaffolds. *Polymer Testing*, **2021**, 97, 107148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107148>
8. L.T. Vlaev, I.G. Markovska, L.A. Lyubchev. Non-isothermal kinetics of pyrolysis of rice husk. *Thermochimica Acta*, **2003**, 406, 1-7. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00222-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00222-3)

## References

1. P. Penczek, Boncza- Z. Tomaszewski. Unsaturated polyester resins on the verge of the 21st century. *Polimery*, **1999**, 44, 709-715. DOI: <https://doi.org/10.14314/polimery.1999.709>
2. N. Sheikh, L. Jalili, F. Anvari. A study on the swelling behavior of poly(acrylic acid) hydrogels obtained by electron beam crosslinking. *Radiation Physics and Chemistry*, **2010**, 79, 735-739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2009.12.013>
3. A. Baudry, J. Dufay, N. Regnier, B. Mortaigne. Thermal degradation and fire behaviour of unsaturated polyester with chain ends modified by dicyclopentadiene. *Polymer Degradation and Stability*, **1998**, 61, 441-452. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00230-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00230-9)
4. M.Zh. Burkeyev, E.M. Tazhbayev, A.N. Bolatbay, et al. Study of Thermal Decomposition of the Copolymer Based on Polyethylene Glycol Fumarate with Acrylic Acid. *Journal of Chemistry*, **2022**. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3514358>
5. M.Zh. Burkeev, G.K. Kudaibergen, E.M. Tazhbayev, D. Hranicek., G.K. Burkeyeva, E.Zh. Sarsenbekova. Synthesis and investigation of copolymer properties on the basis of poly(ethylene glycol)fumarate and methacrylic acid, *Bulletin of the Karaganda University "Chemistry" series*, **2019**, 93, 32-38. DOI: <https://doi.org/10.31489/2019Ch1/32-38>
6. M.Zh. Burkeev, G.K. Kudaibergen, G.K. Burkeeva, et al. New Polyampholyte Polymers Based on Polypropylene Glycol Fumarate with Acrylic Acid and Dimethylaminoethyl Methacrylate. *Russian Journal of Applied Chemistry*, **2018**, 91, 1145-1152. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427218070121>
7. S. Żóltowska, I. Koltsov, K. Alejski, H. Ehrlich, M. Ciałkowski, T. Jesionowski. Thermal decomposition behaviour and numerical fitting for the pyrolysis kinetics of 3D spongin-based scaffolds. *Polymer Testing*, **2021**, 97, 107148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107148>
8. L.T. Vlaev, I.G. Markovska, L.A. Lyubchev. Non-isothermal kinetics of pyrolysis of rice husk. *Thermochimica Acta*, **2003**, 406, 1-7. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00222-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00222-3)