Манар Амангельдиевна Исабаева – кандидат химических наук, профессор кафедры химии и химических технологии НАО «Торайгыров университет», Павлодар, Казахстан; e-mail: isabaeva.manar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8119-3865.

Information about authors

Bulat Kunurovich Kasenov – Doctor of chemical sciences, professor, was the head of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: kasenov1946@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9394-0592.

Shuga Bulatovna Kasenova* – Doctor of chemical sciences, professor, head of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: kasenovashuga@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9755-7478.

Zhenisgul Imangalievna Sagintaeva – candidate of chemical sciences, associate professor, leading researcher of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: kai_sagintaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8655-356x.

Erbolat Ermekovich Kuanyshbekov – Master of engineering, senior researcher of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: mr.ero1986@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9172-9566.

Manar Amangeldievna Isabayeva – Candidate of Chemical Sciences, Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology of Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan; e-mail: isabaeva.manar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8119-3865.

Редакцияға енуі 03.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 21.05.2026
Жариялауға қабылданды 16.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-80

ҒТАХР: 31.15.31

CC BY 4.0
Check for updates

А.Қ. Әбдрәсіл[1], А.Ж. Керимкулова[1]*, Х.С. Рафикова[1], М.А. Кожайсакова[2], Д.Б. Адиканова[1]
[1]Satbayev University,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев көшесі 22
[2]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би көшесі 100
*e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university

ТАЗА ТЕХНОЛОГИЯЛАР, ЖАСЫЛ ХИМИЯ ЖӘНЕ ТҰРАҚТЫ ДАМУ ҮШІН ТЕРЕҢ ЭВТЕКТИКАЛЫҚ ЕРІТКІШТЕРДІ ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: *Терең эвтектикалық еріткіштер (ТЭЕ) – экологиялық қауіпсіздігі, төмен уыттылығы және физика-химиялық қасиеттерін бағытты реттеу мүмкіндігі арқасында жасыл химия мен тұрақты дамуда кеңінен қолданылатын жаңа буын жүйелер. Жұмыстың мақсаты – глицерин негізіндегі ТЭЕ жүйелерін синтездеп, олардың физика-химиялық, спектрлік және термиялық сипаттамаларына компоненттер табиғаты мен молярлық қатынастың әсерін кешенді зерттеу.*

Зерттеу барысында глицерин-лимон қышқылы (1:1-1:4) және глицерин-малон қышқылы (1:2-1:4) негізінде барлығы 7 эвтектикалық жүйе синтезделді. 1:2 молярлық қатынасы тұтқырлық пен термиялық тұрақтылықтың қолайлы теңгерімін көрсетті. Тығыздық ρ = 1,30-1,36 г/см³, тұтқырлық (25 °C) η = 550-1100 мПа·с аралығында өзгереді.

ИҚ-спектрлер гидроксил жолағының Δν = −30…−70 см⁻¹ төмен жиілікке ығысуы арқылы күшті сутектік байланыстардың түзілгенін көрсетті.

TGA/DTG/DSC зерттеулері ең жоғары термиялық тұрақтылықты глицерин–лимон қышқылы 1:2 жүйесі көрсеткенін анықтады (T_{onset} = 230 °C). Таиста таза қышқылдармен салыстырғанда балқу температурасының төмендеуі ΔT_m = −114…−125 °C құрап, эвтектикалық жүйелердің түзілуін растады.

Түйін сөздер: *терең эвтектикалық еріткіштер, ультракүлгін спектроскопия, инфрақызыл спектроскопия, молярлық қатынас, эвтектика.*

©А.Қ. Әбдрәсіл, А.Ж. Керимкулова, Х.С. Рафикова, М.А. Кожайсакова, Д.Б. Адиканова, 2026

Кіріспе

Жаһандық экологиялық проблемалар мен табиғи ресурстардың шектеулілігі жасыл химия қағидаттарына негізделген еріткіштерді іздеуді ғылымның басым бағытына айналдырды [1, 2]. Дәстүрлі органикалық еріткіштер – ацетон, бензол, метанол – жоғары уыттылығы, ұшқыштығы мен жарылыс қауіпімен шектелген [2]. Иондық сұйықтықтар балама ретінде жеткілікті зерттелгенімен, жоғары синтез құны мен токсикалық мәселелері кеңінен қолданылуына кедергі болуда [15, 17].

Терең эвтектикалық еріткіштер (ТЭЕ) – сутектік байланыс доноры (HBD) мен акцепторы (HBA) арасындағы күшті молекулааралық өзара әрекеттесу нәтижесінде жеке компоненттердің балқу температурасынан едәуір төмен балқу нүктесі бар қоспалар класы [10, 14]. 2004 жылы Abbott және т.б. холин хлориді–карбон қышқылдары жүйесі мысалында ТЭЕ тұжырымдамасын ұсынды [13]. Содан бері жарияланымдар саны жылына 2011 жылғы 20-дан аз мақаладан 2023 жылы 500-ден астамға дейін өсті [9]. ТЭЕ-тің негізгі артықшылықтары: биологиялық ыдырайтындылығы, синтездеудің қарапайымдылығы, төмен уыттылығы және физика-химиялық қасиеттерін бағыттап реттеу мүмкіндігі [4, 5, 10, 18, 21]. Бұл қасиеттер ТЭЕ жүйелерін катализ, экстракция, электрохимия, фармацевтика және агрохимия салаларында қолданылуға келешегі мол етеді [11, 15, 16].

Глицерин – биодизель өндірісінің жанама өнімі және жыл сайын миллиондаған тонна көлемінде алынатындықтан, қолжетімді HBD ретінде қарастырылады [13]. Оның құрамында үш –OH тобы бар болғандықтан, түрлі HBA-мен берік сутектік байланыс торларын құруға қабілетті [12, 13]. Глицерин негізіндегі ТЭЕ жүйелерін зерттеу олардың экологиялық тиімділігі мен шикізат көзінің тұрақтылығына байланысты ерекше ғылыми мәнге ие [6, 12, 18].

Алдыңғы зерттеулерге сүйенсек, Rybakova және басқалар [7] глицерин-карбон қышқылы жүйелерінің тек экстракциялық қасиеттерін қарастырған, ал Dunn және басқалар [8] холин хлориді-глицерин жүйесінің термодинамикасын зерттеген. Di Gioia және басқалары [9] осы жүйелерді кешенді спектроскопиялық тұрғыдан салыстыру жұмыстарының жетіспейтінін көрсеткен.

Ғылыми жаңалық. Глицерин негізіндегі екі ТЭЕ жүйесінің (лимон және малон қышқылдарымен) компоненттері әдебиетте белгілі болғанымен, барлық 7 молярлық қатынас (лимон қышқылы үшін 1:1-1:4, малон қышқылы үшін 1:2-1:4) үшін физика-химиялық, спектроскопиялық және термиялық параметрлер бір методология бойынша алғаш рет жүйелі салыстырылып, фазалық диаграммалар тұрғызылды. Бұл жұмыста алғаш рет әрбір қатынас үшін балқу температуралары анықталып, эвтектикалық нүктелер нақты локализацияланды.

Мақсаты – глицерин негізіндегі ТЭЕ синтездеу және олардың физика-химиялық, спектроскопиялық, термиялық сипаттамаларын кешенді зерттеу.

Зерттеу әдістері

Реактивтер мен материалдар: HBD ретінде глицерин (≥99%, Sigma-Aldrich), HBA ретінде лимон қышқылы (≥99%) және малон қышқылы (≥99%) пайдаланылды. Барлық реактивтер қосымша тазартусыз қолданылды.

ТЭЕ синтезі: классикалық қыздыру-араластыру әдісі [3] бойынша компоненттер қажетті молярлық қатынаста өлшеніп (аналитикалық таразы, ±0,0001 г), магнитті араластырғышта 40-50 °C-та мөлдір біртекті сұйық фаза түзілгенше (30-60 мин) араластырылды. Зерттелген қатынастар: глицерин:лимон қышқылы = 1:1, 1:2, 1:3, 1:4; глицерин:малон қышқылы = 1:2, 1:3, 1:4.

Физика-химиялық параметрлер. Тығыздық (ρ) пикнометриялық әдіспен 25, 40 және 60 °C-та анықталды. Тұтқырлық (η) Оствальд вискозиметрімен ASTM D445 бойынша өлшенді. Балқу температурасы Linkam THMS600 микроскопиялық термоүстелінде (5 °C/мин, –50…+200 °C) анықталды, әр үлгі үшін 3 рет өлшеу жүргізіліп, орташа мән алынды.

Зерттеу барысында келесі формулалар пайдаланылды:

Молярлық үлес (қышқыл үшін): $x=\frac{n_{(\text{қышқыл})}}{n_{(\text{қышқыл})}+n_{(\text{глицерин})}}$

Динамикалық тұтқырлық: $\eta=v\cdot\rho$

ИҚ-спектрлердегі гидроксил жолағының ығысуы: $\Delta v=v_{\text{ТЭЕ}}-v_{\text{реагент}}$

мұндағы $v_{\text{ТЭЕ}}$ – ТЭЕ құрамындағы –OH тербеліс жиілігі, $v_{\text{реагент}}$ – таза қышқылдағы –OH жиілігі.

Термиялық ыдыраудың басталу температурасы (T_{onset}) массаның 5% жоғалуына сәйкес анықталды.

ИҚ-спектроскопия. FTIR спектрлері Smart iTX (Diamond) қондырғысында 400-4000 $см^{-1}$, 32 сканерлеу, 4 $см^{-1}$ ажыратымдылықпен, бөлме температурасында алынды.

УК-спектроскопия. Peak Instruments C-7000UV спектрофотометрінде 200-400 нм, кварц кюветада (l = 1 см). Әрбір үлгі 3 рет өлшеніп, орташа ± SD түрінде берілді.

Термиялық талдау. TGA/DTG/DSC TG-DSC термоанализаторында ауа атмосферасында (50 мл/мин), 25-400 °C, 10 °C/мин жүргізілді.

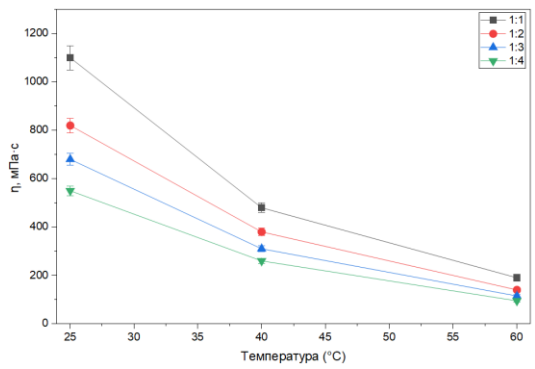
Барлық өлшеулер n=3, нәтижелер орташа ± SD. Молярлық қатынастың әсері бір факторлы ANOVA және Student's t-test арқылы бағаланды, статистикалық маңыздылық $p < 0,05$ деп белгіленді.

Зерттеу нәтижелері

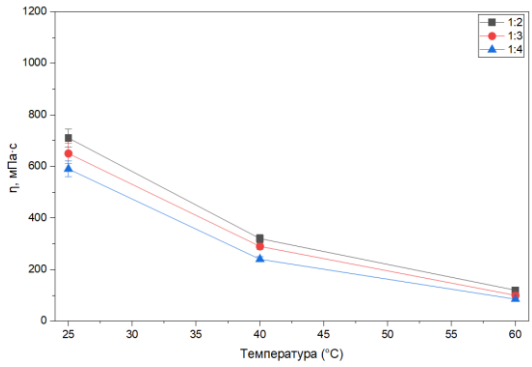
1-кестеде синтезделген 7 ТЭЕ жүйесінің тығыздығы мен тұтқырлығының температуралық тәуелділігі келтірілген. Тұтқырлық пен тығыздық температура өскен сайын экспоненциалды төмендейді. 1:1 қатынасында глицерин-лимон қышқылы жүйесінің тұтқырлығы (1100 мПа·с) таза глицериннен (934 мПа·с) жоғары, ал қышқыл үлесі артқан сайын тұтқырлық төмендейді (1:4 – 550 мПа·с). Малон қышқылы негізіндегі ТЭЕ тұтқырлығы глицериннен төмен (710 мПа·с, 1:2). Лимон қышқылы негізіндегі жүйелер үшін ANOVA нәтижесі молярлық қатынастың тұтқырлыққа ($F(3,8) = 12,47$; $p < 0,01$) және тығыздыққа ($F(3,8) = 8,93$; $p < 0,01$) әсері статистикалық маңызды екенін көрсетті. Қосымша t-test бойынша 1:2 және 1:4 арасындағы айырмашылық $p < 0,05$ деңгейінде маңызды (сурет 1, 2).

Кесте 1 – ТЭЕ жүйелерінің физика-химиялық қасиеттері

Жүйе	Молярлық қатынас	η, мПа·с (25°C)	η, мПа·с (40°C)	η, мПа·с (60°C)	ρ, г/см³ (25°C)	ρ, г/см³ (40°C)	ρ, г/см³ (60°C)
Глицерин	–	934 ± 10	310 ± 20	95 ± 10	1,261 ± 0.003	1,252 ± 0.002	1,239 ± 0.003
Лимон қышқылы	–	–	–	–	1.66 ± 0.03	–	–
Малон қышқылы	–	–	–	–	1.61 ± 0.02	–	–
Глицерин + лимон қышқылы	1:1	1100 ± 50	480 ± 20	190 ± 10	1,36 ± 0,01	1,33 ± 0,01	1,29 ± 0,01
	1:2	820 ± 30	380 ± 15	140 ± 8	1,34 ± 0,01	1,31 ± 0,01	1,27 ± 0,01
	1:3	680 ± 25	310 ± 12	115 ± 6	1,33 ± 0,01	1,30 ± 0,01	1,26 ± 0,01
Глицерин + малон қышқылы	1:2	710 ± 35	320 ± 15	120 ± 6	1,32 ± 0,01	1,29 ± 0,01	1,25 ± 0,01
	1:3	650 ± 40	290 ± 12	100 ± 5	1,31 ± 0,01	1,28 ± 0,01	1,24 ± 0,01
	1:4	590 ± 30	240 ± 10	85 ± 4	1,30 ± 0,01	1,27 ± 0,01	1,23 ± 0,01



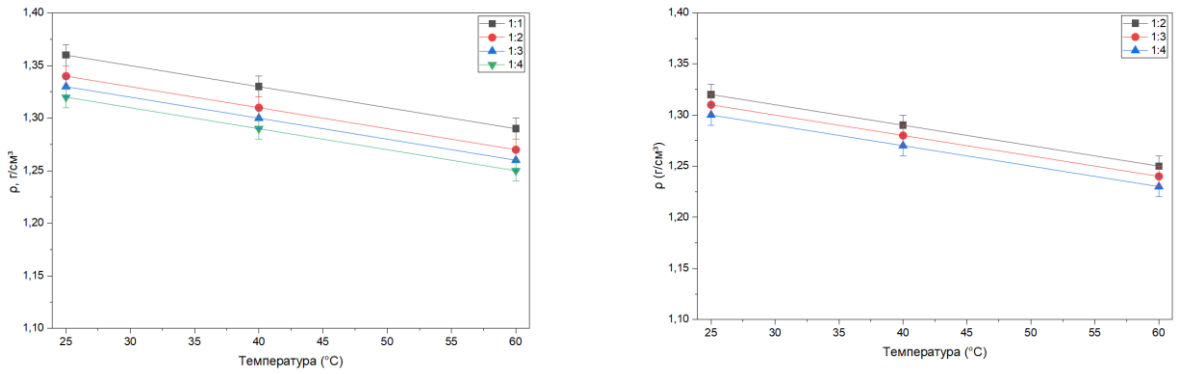
а) Лимон қышқылы+глицерин



ә) Малон қышқылы+глицерин

Сурет 1 – Синтезделген ТЭЕ жүйелерінің молярлық қатынасына байланысты динамикалық тұтқырлығының (η) температуралық тәуелділік қисықтары

Балқу температуралары және фазалық диаграммалар. 2-кестеде барлық жүйелердің балқу температуралары, 3-суретте ликвидус қисықтары көрсетілген. Екі жүйеде де 1:2 молярлық қатынас (x=0,67) эвтектикалық нүктеге сәйкес келеді: лимон қышқылы үшін 28°C, малон қышқылы үшін 22°C. Таза компоненттермен салыстырғанда балқу температурасының төмендеуі ΔT_m = -114…-125 °C құрайды.

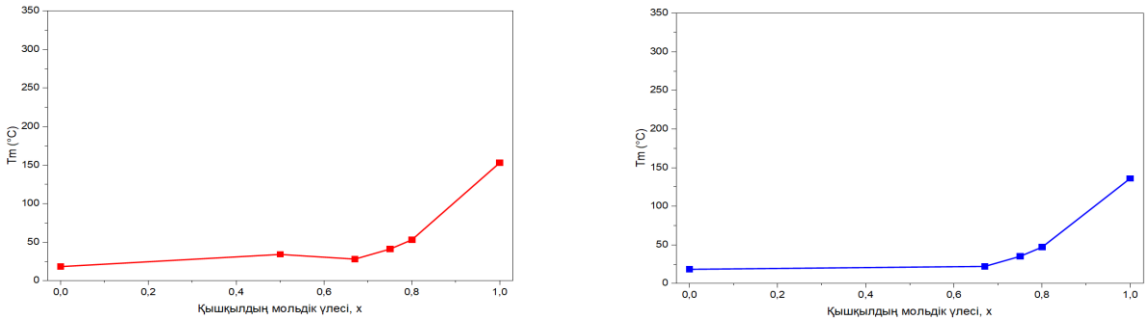


а) Лимон қышқылы+глицерин ә) Малон қышқылы+глицерин

Сурет 2 – Синтезделген ТЭЕ жүйелерінің молярлық қатынасына байланысты тығыздығының (ρ) температуралық тәуелділік қисықтары

Кесте 2 – ТЭЕ жүйелерінің балқу температуралары

Жүйе	Молярлық қатынас	Қышқылдың үлесі (x)	T_m(орташа), °C
Глицерин	–	0.00	18.2 ± 0.3
Лимон қышқылы	–	1.00	153.0 ± 0.5
Малон қышқылы	–	1.00	136.0 ± 0.5
Глицерин + лимон қышқылы	1:1	0.50	34.0 ± 0.4
	1:2 (эвтектика)	0.67	28.0 ± 0.2
	1:3	0.75	41.0 ± 0.5
	1:4	0.80	53.0 ± 0.4
Глицерин + малон қышқылы	1:2 (эвтектика)	0.67	22.0 ± 0.2
	1:3	0.75	35.0 ± 0.4
	1:4	0.80	47.0 ± 0.4



а) Лимон қышқылы+глицерин ә) Малон қышқылы+глицерин

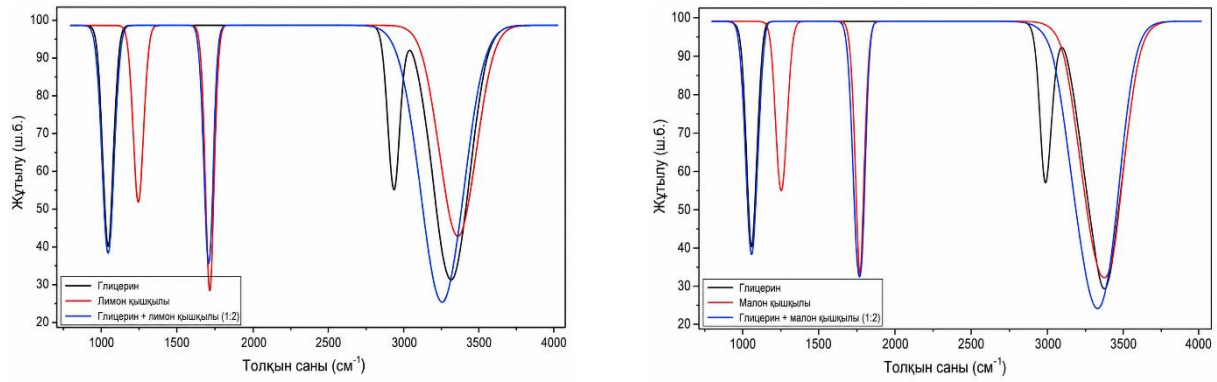
Сурет 3 – Глицерин негізіндегі ТЭЕ жүйелерінің фазалық күй диаграммасы (Liquidus қисықтары)

Мұнда x осі – қышқылдың мольдік үлесі, y осі – балқу температурасы.

3-кестеде FTIR деректері жинақталған, 4-суретте спектрлер берілген. Гидроксил жолағының төмен жиілікке ығысуы (Δν = −30…−70 $см^{-1}$) күшті сутектік байланыстардың түзілуін көрсетеді. C=O және C–O тербелістеріне сәйкес жолақтардың сақталуы бастапқы функционалдық топтардың жүйе түзілуі барысында сақталғанын көрсетеді.

Кесте 3 – FTIR спектрлеріндегі негізгі жұтылу жолақтарының сәйкестендірілуі және ТЭЕ түзілуінің спектрлік белгілері

Жүйе	ν(O–H), $см^{-1}$	Δν(O–H), $см^{-1}$	ν(C=O), $см^{-1}$	ν(C–O), $см^{-1}$	Негізгі спектрлік өзгеріс	Молекулааралық әсерлесу сипаты
Глицерин	3290-3320	-	-	1040-1060	Кең O–H жолағы	Ішкі сутектік байланыстар
Лимон қышқылы	3300-3400	-	1715-1725	1240-1260	Айқын C=O жолағы	Кристалдық димерлік құрылым
Малон қышқылы	3250-3350	-	1690-1710	1240-1260	Кең O–H және C=O жолақтары	Молекулааралық байланыстар
Глицерин + лимон қышқылы (1:2)	3230-3260	-50…-70	1710-1715	1040-1060	O–H төмен жиілікке ығысқан	Күшті сутектік байланыс
Глицерин + малон қышқылы (1:2)	3240-3270	-30…-50	1710-1720	1040-1060	O–H ығысуы байқалады	Орташа молекулааралық байланыс



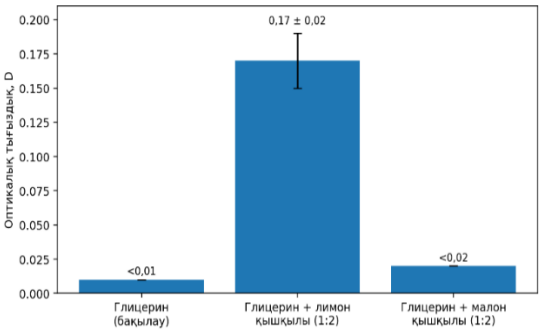
а) Лимон қышқылы+глицерин ә) Малон қышқылы+глицерин

Сурет 4 – Синтезделген ТЭЕ үлгілері мен бастапқы компоненттердің ИҚ-спектрлері

УК-спектроскопия. 4-кесте мен 5-суретте УК-деректерінің сандық көрсеткіштері берілген. Глицерин-лимон қышқылы (1:2) жүйесі λ=290 нм-де D=0,17±0,02 мәнін көрсетеді, бұл карбоксил тобының n→π* ауысуына сәйкес [19, 20]. Глицерин-малон қышқылы жүйесінде оптикалық тығыздық D<0,02.

Кесте 4 – ТЭЕ жүйелерінің УК-спектроскопиялық көрсеткіштері

Жүйе / Үлгі	Молярлық қатынас	λmax, нм	Оптикалық тығыздық, D (орташа ± SD)	Электрондық ауысу түрі	Оптикалық сипаттамасы
Глицерин (бақылау)	–	–	< 0.01	–	УК-аймақта толық мөлдір
Глицерин + лимон қышқылы	1:2	290	0.17 ± 0.02	n→π*	Карбоксил тобының хромофорлы белсенділігі
Глицерин + малон қышқылы	1:2	–	< 0.02	–	Оптикалық таза, инертті орта

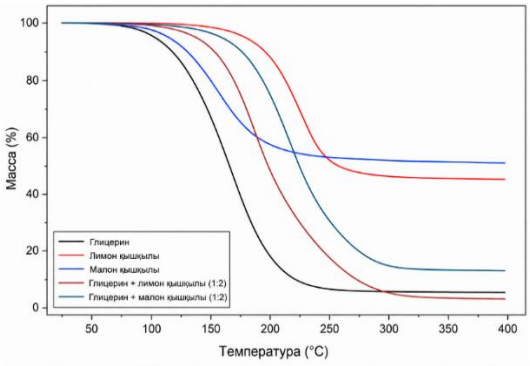


Сурет 5 – ТЭЕ жүйелерінің УК-спектроскопиядағы негізгі оптикалық көрсеткіштері

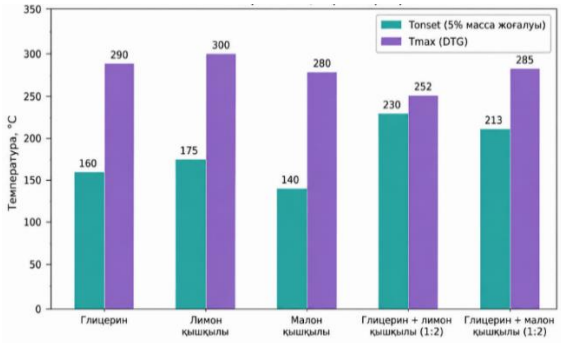
5-кестеде негізгі термиялық параметрлер, 6-суретте TGA қисығы, ал 7-суретте TGA/DTG талдауларынан алынған негізгі термиялық параметрлердің салыстырмасы берілген. Глицерин-лимон қышқылы (1:2) жүйесі 230°C, ал глицерин-малон қышқылы (1:2) 213°C T_{onset} мәндерін көрсетті. DSC бойынша ТЭЕ балқу температуралары 22°C және 28°C болып анықталған, бұл эвтектикалық жүйелердің түзілуін қолдайды.

Кесте 5 – Бастапқы реагенттер мен оптималды ТЭЕ (1:2) жүйелерінің термиялық сипаттамалары

Жүйе	Tonset (5% масса жоғалту), °C	Максималды ыдырау температурасы T_{max} (DTG), °C	400 °C-тағы көмірленген қалдық, %	DSC бойынша негізгі эндотермиялық ауысулар, °C
Глицерин	160	290	~5.0	18.2 (балқу), 290 (қайнау/ыдырау)
Лимон қышқылы	175	300	~45.0	153.0 (балқу), 225 (декарбоксилдену)
Малон қышқылы	140	280	~50.0	136.0 (балқу), 185 (декарбоксилдену)
Глицерин + Лимон қышқылы (1:2)	230	252	4.25	28.0 (ТЭЕ балқуы), 235 (ыдырау басы)
Глицерин + Малон қышқылы (1:2)	213	285	14.27	22.0 (ТЭЕ балқуы), 215 (ыдырау басы)



Сурет 6 – Үлгілердің термиялық ыдырау (TGA) қисықтары



Сурет 7 – TGA/DTG/DSC талдауларынан алынған негізгі термиялық параметрлердің салыстырмасы

Қорытынды

1. Глицерин мен карбон қышқылдары (лимон, малон) негізінде 7 ТЭЕ жүйесі сәтті синтезделіп, температураның жоғарылауымен тығыздық пен тұтқырлықтың төмендейтіні анықталды.
2. Linkam THMS600 көмегімен толық фазалық диаграммалар құрылып, 1:2 молярлық қатынаста (x = 0,67) эвтектикалық нүктелер анықталды: лимон қышқылы үшін 28 °C, малон қышқылы үшін 22 °C. Тиісті таза қышқылдармен салыстырғанда балқу температурасының төмендеуі ΔT_m = −114…−125 °C құрап, эвтектикалық жүйелердің түзілуін растады.
3. FTIR талдауы гидроксил жолағының Δν = −30…−70 $см^{-1}$ төмен жиілікке ығысуын көрсетіп, күшті сутектік байланыстардың қалыптасқанын растады.
4. УК-спектроскопияда глицерин-лимон қышқылы жүйесі 290 нм-де n→π* ауысуына сәйкес жұтылу (D=0,17) көрсетсе, глицерин-малон қышқылы жүйесі УК-аймақта толық мөлдір (D<0,02).
5. TGA/DTG/DSC зерттеулері жүйелердің 213–230 °C аралығындағы T_{onset} мәндері бойынша жоғары термиялық тұрақтылық көрсететінін анықтады, бұл олардың жасыл химия процестерінде қолдануға перспективалы екенін көрсетеді.
6. Алынған нәтижелерді әдебиеттегі ұқсас жүйелермен салыстырғанда [7, 8, 12], біздің жұмыста алғаш рет барлық 7 молярлық қатынас үшін кешенді физика-химиялық, спектроскопиялық және термиялық деректер біріктірілді, фазалық диаграммалар тұрғызылып, эвтектикалық нүктелер нақтыланды.

Әдебиеттер тізімі

1. Glubokie ehvtekticheskie rastvoriteli v biotekhnologii / O.V. Morozova i dr. – 2023. https://www.fbras.ru/wp-content/uploads/2023/01/9-Morozova.pdf. (in Russian).
2. Deep eutectic solvents in green chemistry: A review / B. Barman et al // Journal of Ravishankar University. Ser. B. – 2025. – Vol. 38, № 1. https://doi.org/10.52228/jrub.2025-38-1-7.
3. Ferreira S. A comprehensive review of deep eutectic solvents and their applications for the extraction of bioactive compounds of pharmaceutical interest / S. Ferreira, M. Sarraguca // Pharmaceuticals. – 2024. – Vol. 17, № 1. – Art. 124. https://doi.org/10.3390/ph17010124.
4. Deep eutectic solvents towards eco-friendly polymeric materials / U.A. Virasinghe et al // Green Chemistry. – 2024. – Vol. 26. – P. 8497-8527. https://doi.org/10.1039/D4GC00532E.

5. Coutinho J.A.P. A comprehensive overview of deep eutectic solvents: Properties, applications, and future perspectives / J.A.P. Coutinho, A.R. Ferreira, M.G. Freire // Green Chemistry. – 2023. – Vol. 25. – P. 3542-3570. https://doi.org/10.1039/D2GC04715C.
6. Deep eutectic solvents (DESs) and natural deep eutectic solvents (NADESs): Designer solvents for green extraction of anthocyanins / M. Minu et al // Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2023. – Vol. 34. – Art. 101168. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101168.
7. Rybakova A. Deep eutectic solvents based on carboxylic acids and glycerol or propylene glycol as green media for extraction of bioactive substances / A. Rybakova, N. Kudrina, E. Losev // Molecules. – 2023. – Vol. 28. – Art. 6978. https://doi.org/10.3390/molecules28196978.
8. Dunn J. Thermodynamic study of choline chloride-based deep eutectic solvents with water and methanol / J. Dunn, C. Hawkins, S.D. Sherrod // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2020. – Vol. 65. – P. 1540-1549. https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b01113.
9. Di Gioia M.L. Advances in the development and application of deep eutectic solvents / M.L. Di Gioia, A.R.C. Duarte, M.B. Gawande // Frontiers in Chemistry. – 2023. – Vol. 11. – Art. 1258718. https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1258718.
10. Ijardar S.P. Revisiting the physicochemical properties and applications of deep eutectic solvents / S.P. Ijardar, V. Singh, R.L. Gardas // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 4. – Art. 1368. https://doi.org/10.3390/molecules27041368.
11. Deep eutectic solvents: A review of fundamentals and applications / B.B. Hansen et al // Chemical Reviews. – 2021. – Vol. 121, № 3. – P. 1232-1285. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00385.
12. Makris D.P. Glycerol and glycerol-based deep eutectic mixtures as emerging green solvents for polyphenol extraction: The evidence so far / D.P. Makris, S. Lalas // Molecules. – 2020. – Vol. 25, № 24. – Art. 5842. https://doi.org/10.3390/molecules25245842.
13. Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: versatile alternatives to ionic liquids / A.P. Abbott et al // Journal of the American Chemical Society. – 2004. – Vol. 126, № 29. – P. 9142-9147. https://doi.org/10.1021/ja048266j.
14. Smith E.L. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications / E.L. Smith, A.P. Abbott, K.S. Ryder // Chemical Reviews. – 2014. – Vol. 114, № 21. – P. 11060-11082. https://doi.org/10.1021/cr300162p.
15. Potential applications of deep eutectic solvents in nanotechnology / A. Abo-Hamad et al // Chemical Engineering Journal. – 2015. – Vol. 273. – P. 551-567. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.091.
16. Chen Y. Revisiting greenness of ionic liquids and deep eutectic solvents / Y. Chen, T. Mu // Green Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 174-186. https://doi.org/10.1016/j.gce.2021.01.004.
17. Martins M.A.R. Insights into the nature of eutectic and deep eutectic mixtures / M.A.R. Martins, S.P. Pinho, J.A.P. Coutinho // Journal of Solution Chemistry. – 2019. – Vol. 48, № 7. – P. 962-982. https://doi.org/10.1007/s10953-018-0793-1.
18. Perna F.M. Deep eutectic solvents and their applications as green solvents / F.M. Perna, P. Vitale, V. Capriati // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. – 2020. – Vol. 21. – P. 27-33. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.10.002.
19. Silverstein R.M. Spectrometric Identification of Organic Compounds / R.M. Silverstein, F.X. Webster, D.J. Kiemle. – 8th ed. – Wiley, 2015. – 450 p.
20. Pretsch E. Structure Determination of Organic Compounds / E. Pretsch, P. Bühlmann, M. Badertscher. – 5th ed. – Springer, 2020. – 430 p.
21. Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications / Q. Zhang et al // Chemical Society Reviews. – 2025. – Vol. 54. – P. 1-25. https://doi.org/10.1039/D4CS00123K.

А.Қ Әбдрәсіл[1], А.Ж. Керимкулова[1]*, Х.С. Рафикова[1], М.А. Кожайсакова[2], Д.Б. Адиканова[1]
[1]Satbayev University, 050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[2]Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
*e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university

РАЗРАБОТКА ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЧИСТЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЗЕЛЁНОЙ ХИМИИ И УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Глубокие эвтектические растворители (ГЭР) – это системы нового поколения, широко применяемые в зелёной химии и устойчивом развитии благодаря экологической безопасности, низкой токсичности и возможности целенаправленного регулирования физико-химических свойств. Цель работы – синтез ГЭР -систем на основе глицерина и комплексное исследование влияния природы компонентов и молярного соотношения на их физико-химические, спектральные и термические характеристики.

В ходе исследования синтезировано 7 эвтектических систем на основе глицерин-лимонной кислоты (1:1-1:4) и глицерин-малоновой кислоты (1:2-1:4). Молярное соотношение 1:2 показало благоприятный баланс вязкости и термической стабильности. Плотность составляет ρ = 1,30-1,36 г/см³, вязкость (при 25 °C) варьируется в интервале η = 550-1100 мПа·с.

ИК-спектры показали образование сильных водородных связей, о чём свидетельствует смещение гидроксильной полосы на Δν = −30…−70 см⁻¹ в низкочастотную область.

Исследования TGA/DTG/DSC показали, что наивысшей термической стабильностью обладает система глицерин–лимонная кислота 1:2 (T_{onset} = 230 °C). По сравнению с соответствующими чистыми кислотами температура плавления снизилась на ΔT_m = −114…−125 °C, что подтверждает образование эвтектических систем.

Ключевые слова: *глубокие эвтектические растворители, ультрафиолетовая спектроскопия, инфракрасная спектроскопия, молярное соотношение, эвтектика.*

A.K. Abdrasil[1], A.Zh. Kerimkulova[1]*, H.S. Rafikova[1], M.A. Kozhaisakova[2], D.B. Adikanova[1]
[1]Satbayev University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street 22
[2]Almaty University of Technology,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole Bi Street 100
*e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university

DEVELOPMENT OF DEEP EUTECTIC SOLVENTS FOR CLEAN TECHNOLOGIES, GREEN CHEMISTRY, AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Deep Eutectic Solvents (DES) are a new generation of systems widely used in green chemistry and sustainable development due to their environmental safety, low toxicity, and the ability to tune their physicochemical properties in a targeted manner. The aim of this work is to synthesize DES systems based on glycerol and to comprehensively study the effect of component nature and molar ratio on their physicochemical, spectral, and thermal characteristics.

During the study, a total of 7 eutectic systems were synthesized based on glycerol-citric acid (1:1-1:4) and glycerol-malonic acid (1:2-1:4). The 1:2 molar ratio showed a favorable balance between viscosity and thermal stability. The density ranges from ρ = 1.30-1.36 g/cm³, and the viscosity (at 25 °C) varies in the range η = 550-1100 mPa·s.

IR spectra showed the formation of strong hydrogen bonds, as evidenced by a shift of the hydroxyl band by Δν = −30…−70 cm⁻¹ toward lower wavenumbers.

TGA/DTG/DSC studies revealed that the highest thermal stability was exhibited by the glycerol–citric acid 1:2 system (T_{onset} = 230 °C). Compared with the corresponding pure acids, the melting temperature decreased by ΔT_m = −114…−125 °C, confirming the formation of eutectic systems.

Key words: *deep eutectic solvents, ultraviolet spectroscopy, infrared spectroscopy, molar ratio, eutectics.*

Авторлар туралы мәлімет

Алина Қанатқызы Әбдрәсіл – 1 курс магистранты, Satbayev University; e-mail: alinaabdrassil@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7643-5483.

Айгуль Жадраевна Керимкулова* – қауымдастырылған профессор, Satbayev University; e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4167-8921.

Хадичахан Сабыржановна Рафикова – профессор, Satbayev University; e-mail: kh.rafikova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8028-2244.

Мадина Амановна Кожайсакова – сеньор-лектор, Алматы технологиялық университеті; e-mail: madinaamanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4414-3287.

Динара Бакытбековна Адиканова – аға оқытушы, Satbayev University; e-mail: adikanovadinara@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1445-1553.

Сведения об авторах

Алина Қанатқызы Әбдрәсіл – магистрант 1-го курса, Satbayev University; e-mail: alinaabdrassil@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7643-5483.

Айгуль Жадраевна Керимкулова* – ассоциированный профессор, Satbayev University; e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4167-8921.
Хадичахан Сабыржановна Рафикова – профессор, Satbayev University; e-mail: kh.rafikova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8028-2244.
Мадина Амановна Кожайсакова – сеньор-лектор, Алматинский технологический университет; e-mail: madinaamanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4414-3287.
Динара Бакытбековна Адиканова – старший преподаватель, Satbayev University; e-mail: adikanovadinara@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1445-1553.

Information about the authors
Alina Kanatkyzy Abdrassil – 1st-year master's student, Satbayev University; e-mail: alinaabdrassil@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7643-5483.
Aigul Zhadraevna Kerimkulova* – Associate professor, Satbayev University; e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4167-8921.
Khadichakhan Sabyrzhanovna Rafikova – Professor of Chemical and Biochemical Engineering Department, Satbayev University; e-mail: kh.rafikova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8028-2244.
Madina Amanovna Kozhaisakova – Senior Lecturer, Almaty Technological University; e-mail: madinaamanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4414-3287.
Dinara Bakytbekovna Adikanova – Senior Lecturer Satbayev University; e-mail: adikanovadinara@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1445-1553.

Редакцияға енуі 07.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 17.08.2026
Жариялауға қабылданды 18.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-81

IRSTI: 67.09.43

S. Ashimova [1], T. Mukanov[2,3], Y. Amirbayev[4], D. Alizhanov[4], G. Aitkaliyeva[2]
[1]JSC "Kazakhstan Road Research Institute", 050061, Kazakhstan, Almaty, 2A Nurpeisov Street
[2]JV "CASPI BITUM" LLP, 130000, Kazakhstan, Aktau, Promzona 5
[3]Satbayev University, 050013, Kazakhstan, Almaty, Satbayev Street 22
[4]Kazakhstan Highway Research Institute, 010000, Kazakhstan, Astana, 37 Jekebatyr Street
*e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university

BIO-BASED REJUVENATOR FOR RESTORING THE PROPERTIES OF AGED BITUMEN

Annotation: *The aging of bitumen during production and service life leads to the formation of oxygen-containing functional groups, increased stiffness, and deterioration of pavement performance. Therefore, the development of effective and environmentally friendly rejuvenators for restoring aged bitumen remains an important task in asphalt recycling technologies.*

In this study, a bio-based rejuvenator was synthesized using oleic acid and imidazoline and applied to RTFOT-aged BND 70/100 bitumen at concentrations of 1, 3, and 5 wt.%. The influence of the rejuvenator on the properties of aged bitumen was evaluated using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TG), and conventional physical tests.

FTIR analysis revealed changes in the intensity of carbonyl and sulfoxide absorption bands, indicating interaction between the rejuvenator and the aged bitumen matrix. TG analysis showed that the modified binders maintained high thermal stability up to 400 °C. The addition of the rejuvenator improved the physical properties of aged bitumen by increasing penetration and ductility while reducing the softening point. The most significant effect was achieved at a rejuvenator content of 5 wt.%.

The results demonstrate the potential of the developed bio-based rejuvenator for restoring the performance characteristics of aged bituminous binders and enhancing the sustainability of asphalt recycling technologies.

Key words: *aged bitumen; bio-based rejuvenator; oleic acid; imidazoline; asphalt recycling; FTIR; thermogravimetric analysis.*

©S. Ashimova, T. Mukanov, Y. Amirbayev, D. Alizhanov, G. Aitkaliyeva, 2026