

А.А. Кенбай^{1,2} , Д.Е. Ережеп^{1,2*} , А.У. Алдияров¹ 

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: darhan_13@physics.kz

ТӨМЕН ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ҰЯШЫҒЫ БАР ҚҰРЫЛҒАН КРИОГЕНДІ-КАПИЛЛЯРЛЫҚ ЖҮЙЕНІ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, КЕРОСИННІҢ FTIR-СПЕКТРЛЕРІН ТАЛДАУ ЖӘНЕ АЛУ

Бұл жұмыста көмірсутекті материалдардың төмен температура мен атмосфералық қысымдағы FTIR спектроскопиясының технологиясы берілген. Бұл құрылғы әртүрлі заттардың оптикалық қасиеттерін 77–300 K температура диапазонында вакуумды қолданбай және жаңа іргелі деректер алуды қажет етпей зерттеуге мүмкіндік береді, өйткені бұл саладағы зерттеулер жеткіліксіз. Мақсаты осы жағдайларда көмірсутекті отынның әрекеттері мен қасиеттері туралы жаңа іргелі білім алу болып табылады, өйткені бұл технологияны қолданатын зерттеулер салыстырмалы түрде сирек болып қала береді. Бұл тәсіл әртүрлі заттардың оптикалық қасиеттерін атмосфералық қысымда 77-ден 300 K-ге дейінгі температура диапазонында вакуумдық ортаны қолданбай-ақ зерттеуге мүмкіндік береді. Зерттеуде Фурье түрлендіру инфрақызыл (ИҚ) спектрометрі, диффузиялық шағылысу тіркемесі және екі Дьюар ыдысы көмегімен көмірсутекті талдау әдісі көрсетілген. Бір ыдыс үлгілерді криогендік капиллярлық жүйенің ішіндегі сұйық азотпен салқындату үшін пайдаланылады, ал екіншісі үлгілер орналастырылатын ИҚ-белсенді емес ортаны жасайды. Керосиндегі C-H функционалдық топтарының белгілі бір толқындық диапазондағы тербелістерінің түрлері мен жиіліктерін көрсететін FTIR спектрлері алынды. Бұл нәтижелер атмосфералық қысымда және төмен температурада әртүрлі заттардың әрекеттері мен қасиеттері туралы жаңа іргелі деректерді алу үшін ұқсас технологияларды әзірлеуді қолдайтын осындай зерттеулердің орындылығының дәлелі ретінде бүкіл әлем бойынша криофизика және криотехнология зертханаларында пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: көмірсутекті материалдар, төмен температуралар, криогенді капиллярлық жүйе, FTIR спектроскопиясы, төмен температуралы ұяшық.

A. Kenbay^{1,2}, D. Yerezhap^{1,2*}, A. Aldiyarov¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: darhan_13@physics.kz

Analysis and comparison of kerosene FTIR spectra using the developed cryogenic-capillary system with low-temperature cell

This work introduces a technology for FTIR spectroscopy of hydrocarbon materials at low temperatures and atmospheric pressure. This device allows to study optical properties of various substances at temperature range of 77 – 300 K without need of a vacuum and to obtain new fundamental data since there is insufficient research in this area. The purpose is to obtain new fundamental insights into the behavior and properties of hydrocarbon fuels under these conditions, as research utilizing this technology remains relatively uncommon. This approach allows for the examination of the optical properties of various substances under atmospheric pressure in the temperature range of 77 to 300 K, without the need for a vacuum environment. The study outlines a method for analyzing hydrocarbons using an infrared (IR) Fourier spectrometer, a diffuse reflection attachment, and two Dewar vessels. One vessel is used for cooling samples with liquid nitrogen inside the cryogenic capillary system, while the second creates an IR-inactive environment where the samples are placed. FTIR spectra of the characteristic C-H functional group peaks in kerosene were obtained, reflecting the types and frequencies of their vibrations in specific wavenumber ranges. These findings can be utilized in cryophysics and cryotechnology laboratories worldwide as proof of the feasibility of such research, supporting the

development of similar technologies to acquire new fundamental data on the behavior and properties of various substances at atmospheric pressure and low temperatures.

Keywords: hydrocarbon materials, low temperatures, cryogenic capillary system, FTIR-spectroscopy, low temperature cell.

А.А. Кенбай^{1,2}, Д.Е. Ережеп^{1,2*}, А.У. Алдияров¹

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

²Satbayev University, г.Алматы, Казахстан

*e-mail: darhan_13@physics.kz

Анализ и получение FTIR-спектров керосина с помощью разработанной криогенно-капиллярной системы с низкотемпературной ячейкой

В данной работе представлена технология ИК Фурье-спектроскопии углеводородных материалов при низких температурах и атмосферном давлении. Это устройство позволяет изучать оптические свойства различных веществ в диапазоне температур 77–300 К без необходимости использования вакуума и получать новые фундаментальные данные, поскольку исследований в этой области недостаточно. Цель состоит в том, чтобы получить новые фундаментальные знания о поведении и свойствах углеводородных топлив в этих условиях, поскольку исследования, использующие эту технологию, остаются относительно редкими. Этот подход позволяет изучать оптические свойства различных веществ при атмосферном давлении в диапазоне температур от 77 до 300 К без необходимости использования вакуумной среды. В исследовании излагается метод анализа углеводородов с использованием инфракрасного (ИК) Фурье-спектрометра, приставки диффузного отражения и двух сосудов Дьюара. Один сосуд используется для охлаждения образцов жидким азотом внутри криогенно-капиллярной системы, а второй создает ИК-неактивную среду, в которой размещаются образцы. Получены FTIR-спектры характерных пиков функциональных групп C-H в керосине, отражающие типы и частоты их колебаний в определенных диапазонах волновых чисел. Эти результаты могут быть использованы в лабораториях криофизики и криотехнологии по всему миру в качестве доказательства осуществимости таких исследований, поддерживая разработку аналогичных технологий для получения новых фундаментальных данных о поведении и свойствах различных веществ при атмосферном давлении и низких температурах.

Ключевые слова: углеводородные материалы, низкие температуры, криогенная капиллярная система, ИК Фурье-спектроскопия, низкотемпературная ячейка.

Кіріспе

Спектрометрия пайда болған кезде және көмірсутекті қосылыстарды төмен температурада спектроскопиялық әдістермен зерттеуге мүмкіндік беретін технологиялар пайда болғаннан бері процесс вакуумның пайда болуымен қатар жүрді, онсыз заттың наноқұрылымын [1-2], молекулалық құрамын [3-4], физикалық-химиялық, жылу және оптикалық қасиеттерін [5-9] ауада ылғалдың және басқа қоспалардың болуына байланысты сапалы зерттеуге және талдауға кедергі келтіретін кез келген спектроскопиялық әдістер арқылы, соның ішінде ИК-Фурье арқылы зерттеу қиын болды [10-13].

Заттарды, атап айтқанда, көмірсутекті қосылыстарын ИК-спектроскопияны қолдануды көздейтін төмен температуралық зерттеулер [14] ультра төмен қысымның, яғни вакуумның,

болуын болжайды [15-18], соның нәтижесінде атмосфералық қысымдағы көмірсутекті заттардың оптикалық қасиеттерін жоғары сапалы іргелі зерттеулердің нәтижелері әлі де өте сирек кездеседі, өйткені бұл жағдай бірқатар мәселемен байланысты, мысалы, атмосфералық жағдайларда төмен температураға қол жеткізуге мүмкіндік беретін спектроскопиялық зерттеу технологияларын әзірлеудің, техникалық қызмет көрсетудің және кейіннен жаңғыртудың күрделілігі, спектрлердің шу деңгейі төмендігі мен сәулелену қарқындылығы жоғары болуына байланысты дәлдікке қол жеткізуге мүмкіндік беретін инертті және ИК-белсенді емес немесе ИК-мөлдір органы құрудың күрделілігі [19-20], сонымен қатар қадамдық зерттеу әдістемесінің болмауы.

Жалпы, көмірсутекті заттарды төмен температурада және атмосфералық қысымда зерттейтін технологиялар әлемде өте аз. Кейбір

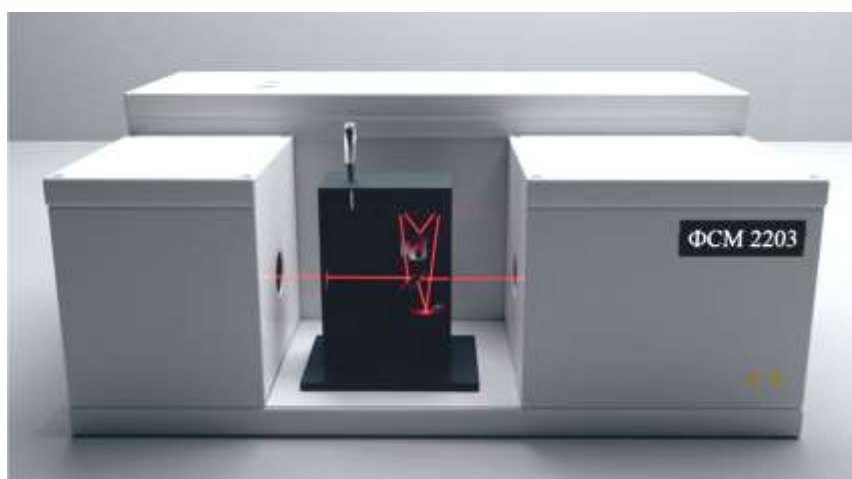
зерттеулерде [21-24] атмосфералық қысымда және төмен температурада спектроскопиялық тәжірибелер енгізілгенімен, жоғарыда сипатталған мәселелерге байланысты бұл бағыттағы ғылыми зерттеулер шектеулі. Көмірсутекті отындарды атмосфералық қысымда, бірақ төмен (77 К-ге дейін) температурада FTIR (Fourier transform infrared) спектроскопиялық зерттеу технологиясын [25] ұсынып отырмыз, ол вакуумнан тыс зерттеу кезінде жоғарыда аталған мәселелердің шешімін береді.

Осы мақаланың мақсаты көмірсутекті материалдардың атмосфералық қысымдағы төмен температуралық қасиеттері туралы іргелі деректерді беру болып табылады, бұл осы бағыттағы жоғары сапалы зерттеулердің кейінгі дамуына, оған қоса осы жағдайларда молекулалардың әрекетіне байланысты көбірек дәлелдемелердің болуына байланысты одан әрі дәлірек өңдеу жабдықтарын дамытуға ықпал бола алатын жағдайды ұсынатын аса құнды ақпарат. Осылайша, бұл зерттеу Біріккен Ұлттар Ұйымы қабылдаған Тұрақты Даму Мақсаттарына [26]

ТДМ 4 – Сапалы білім және ТДМ 9 – Индустрия, инновация және инфрақұрылымға сәйкес міндеттерге сәйкес келеді. Бұл жаңа деректерді STEM бағыты бар техникалық университеттердің жоғары оқу орындарының студенттеріне арналған оқулықтарды, сондай-ақ инновациялық энергетика саласына арналған теориялық деректерді жазу кезінде пайдалануға болады.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Атмосфералық қысымда көмірсутекті материалдарды төмен температуралы спектроскопиялық зерттеудің жоғары сапалы нәтижелерін алу үшін төмен температураны өлшейтін ұяшықпен криогенді-капиллярлық жүйені қолданып тәжірибелер жүргіземіз. Көмірсутек спектроскопиялық деректері туралы нақты ақпаратты қамтамасыз ету үшін біз Infracpec-тен $370\text{--}7800\text{ см}^{-1}$ диапазонында $0,125\text{ см}^{-1}$ спектрлік ажыратымдылығы бар жоғары дәлдіктегі орта инфрақызыл Фурье түрлендіру спектрометрін қолданамыз (1-сурет).



1-сурет – Диффузды шағылысу тіркемесі бар «FSM 2203» инфрақызыл Фурье спектрометрі

Атмосфералық қысымда төмен температуралы диффузды шағылысу спектроскопиясы бойынша эксперимент жүргізу үшін бізге осы жағдайларда көмірсутекті заттарды зерттеуге мүмкіндік беретін қондырғыны әзірлеу қажет болды. FSM 2203 спектрометрінің кюветтік бөлігінде орналасқан диффузиялық шағылысу тіркемесінде (2-сурет) зерттелетін үлгінің температурасын реттеу мүмкіндігіне басты назар аударылады. Температураны 77 К дейін төмендету мүмкіндігі ерекше маңызды. Диффузиялық шағылысу әдісін қолдану үлгіні дайындауға ең аз талаптарды талап етеді және тегіс емес беттер мен әртүрлі жабындарды, соның ішінде полимерлерді

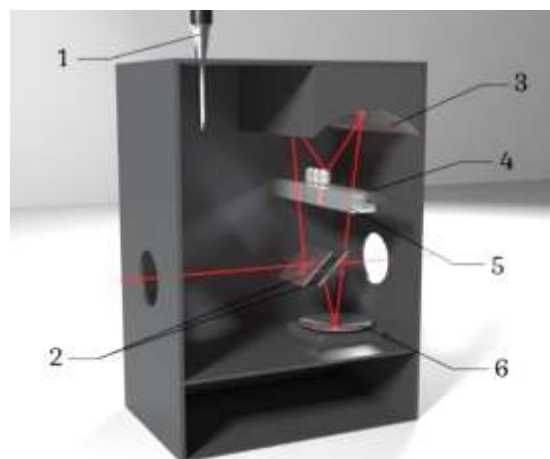
зерттеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бұл әдіс кең ауқымда спектрлік талдауға мүмкіндік береді, мұның дәстүрлі өткізу өлшеу әдістеріне қарағанда артықшылығы бар.

Бұл тіркеменің орталық құрамдас бөліктері айна жүйесінен және сынама үлгілері орналастырылатын тартылатын үлгі ұстағыштан тұрады (2-сурет, 4-зат). Микромметрлік бұранда (2-сурет, 1-зат) үлгі ұстағыштың тік орнын өзгерту үшін пайдаланылады, бағыттағышты (2-сурет, 5-зат) оның сызығы бойымен жылжыту арқылы біз көлденең күйді өзгерте аламыз. Тіркемеге түсетін сәуле оның кіріс тесігінен өтіп, екі жақты жалпақ айнаға түседі (2-сурет, 2-зат). Содан кейін бұл сәуле эллиптикалық айнаға қарай шағылысады (2-

сурет, 3-зат), ол оны тартылатын ұстағыштың ішіндегі сынақ үлгісінің бетіне бағыттайды. Үлгінің бетінен диффузиялық шағылысқан сәуле оны сфералық айнаға (2-сурет, 6-зат) бағыттайтын эллиптикалық айнаға қарай қайта бағытталады. Содан кейін шағылысқан сәуле FSM 2203 спектрометрінің детекторлық камерасына кірер алдында екі жақты жазық айнаның қарама-қарсы жағымен соқтығысады.

Алынған ИК-спектрлердің алғашқы өңдеуі FSpec бағдарламалық құралының көмегімен жүзеге асырылады, кейінгі талдау Origin бағдарламалық құралының көмегімен жүзеге асырылады.

Тіркеменің тартылатын ұстағышының ұяшығының ішіндегі сынақ үлгісінің температурасын төмендетуге қол жеткізу үшін стандартты үлгі ұстағыштың негізінде арнайы әзірленген модификация жүзеге асырылды (3-сурет).



1 – микрометрлік бұранда; 2 – екі жақты тегіс айна; 3 – эллиптикалық айна; 4 — тартылатын үлгі ұстағыш; 5 – бағыттаушы; 6 – сфералық айна

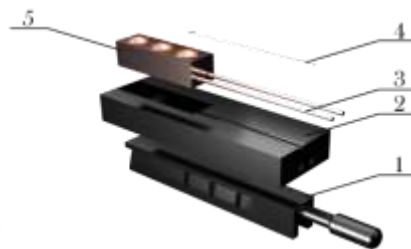
2-сурет – Диффузиялық шағылысу тіркемесінің схемалық көрінісі



а)



ә)



б)

а) стандартты тартылатын үлгі ұстағышы, ә) жинақталған нысандағы жаңартылған мамандандырылған тартылатын үлгі ұстағышы, б) бөлшектелген нысандағы жаңартылған мамандандырылған тартылатын үлгі ұстағышы. 1 – ұстағыш тұтқасы, 2 – жылу оқшаулағыш ұстағыш қақпағы, 3 – криогенді-капиллярлық жүйе, 4 – температура сенсоры (термопара), 5 – контейнер

3-сурет – Тартылатын ұстағыштың үш өлшемді моделі

Ұстағыштың жетілдірілген дизайны екі негізгі материалды қамтиды: полилактид және мыс. Нақты ұстағыш компоненттері үшін бұл материалдарды таңдау олардың сәйкес жылу өткізгіштік қасиеттеріне негізделген. Жылуөткізгіштігі шамамен 0,11-ден 0,19 Вт/м*К-ге дейін болатын полилактид мыс өзекшеге де, өлшем ұяшықтарына орналастырылған үлгілерге де сыртқы температураның жағымсыз әсеріне қарсы тұру үшін таңдалды.

Үлгілерді орналастыруға арналған цилиндрлік тесіктері (ұяшықтары) бар өзекше (3-сурет, 5-зат) криогендік капиллярлық жүйемен қамтамасыз етілген температураның жылдам және біркелкі таралуына қол жеткізу үшін жоғары жылу өткізгіштігі бар материалдан жасалған.

Криогендік капиллярлық жүйенің өзі де (3-сурет, 3-зат) сол себептермен мыстан жасалған.

Зерттелетін үлгілерді 77 К температураға дейін салқындату криогенді капиллярлық жүйенің мыс түтігі арқылы сұйық және газ тәрізді азоттың үздіксіз ағыны арқылы жүзеге асырылады. Мыс түтік, мыс өзек пен ұяшықтар арасындағы тығыз байланыс, мыстың жоғары жылу өткізгіштігімен бірге материалдың қажетті температураға дейін тез салқындатылуын қамтамасыз етеді. Мыс өзекшенің температурасы LakeShore PID (Proportional–integral–derivative) контроллері арқылы сырықтың бетіне бекітілген термопара арқылы бақыланады (3-сурет, 4-зат). Сынақ үлгілері криогендік капиллярлық жүйе арқылы азот айналымын тоқтату арқылы қызады,

осылайша үлгі мен қоршаған орта арасындағы термодинамикалық тепе-теңдікті қалпына келтіреді. Криогендік капиллярлық жүйенің мыс түтіктері арқылы азотты айналдыру үшін арнайы Дьюар ыдысында қыздыру арқылы жоғары қысым жасалады. Бұл процесс азотты ыдыстан криогенді капиллярлық жүйеге шығарып, үлгілерді салқындатуға мүмкіндік береді.

Криогенді капиллярлық жүйе жоғарыда аталған Дьюар ыдысына тығыздалған бекіту жүйесі арқылы қосылады (4-сурет). Бұл қондырғы сұйық және газ тәрізді азоттың (77 К) мыс капиллярлары арқылы тұрақты айналымы бар төмен температуралы ұяшықта атмосфералық қысымда үлгілерді салқындату үшін арналған. Қондырғы Дьюар ыдысынан (термос) (4-сурет, 1-зат), бекіту жүйесінен (4-сурет, 3-зат), жылу оқшаулағыш жабынмен жабылған мыс түтіктен (4-сурет, 4-зат), манометрден (4-сурет, 2-зат), электр қосылымын және қыздырғыштан кернеу келу үшін электрлік қысқышқа арналған

контактілерден (4-сурет, 6-зат), термостың ішінде артық қысымды болдырмауына арналған кері клапаннан (4-сурет, 5-зат) тұрады.

Экспериментті бастау үшін қондырғының пайдалануға дайын екеніне көз жеткізу керек:

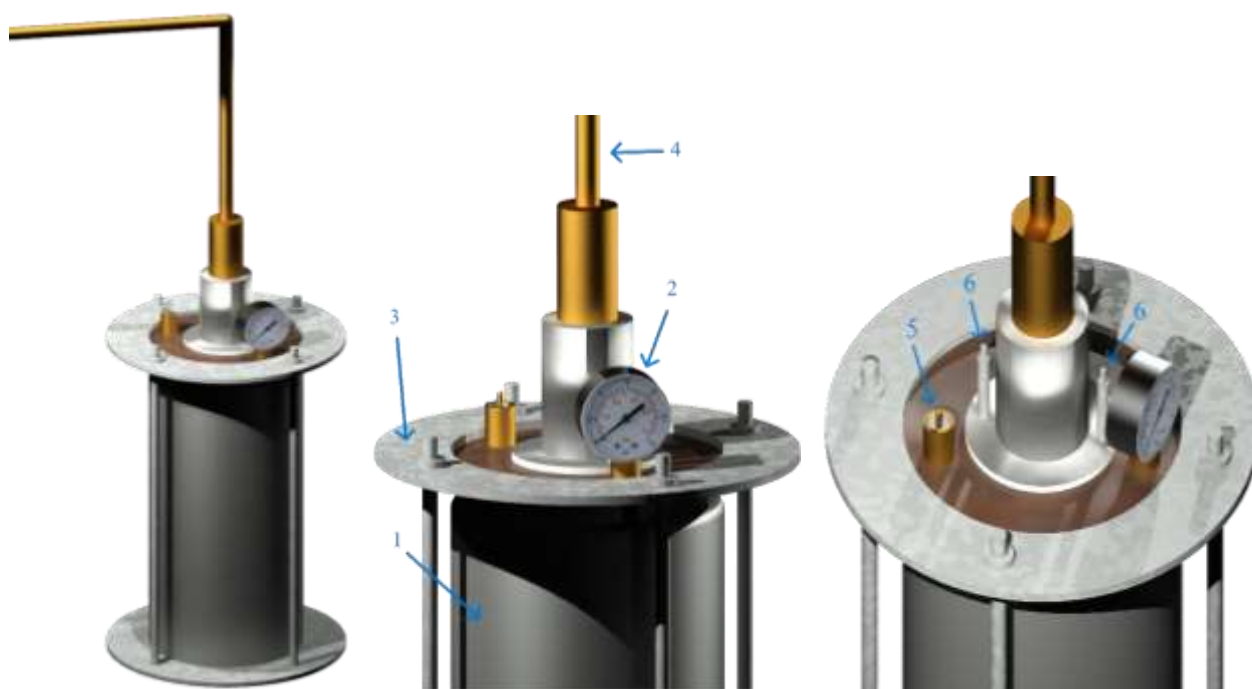
1) Криогендік капиллярлық жүйеге қосылған Дьюар ыдысы мықтап жабылған, кері клапаны кептелмеген және манометр (қысым сенсоры) кемінде 6 psi (0,4 атм.) қысымды көрсетеді.

2) Қыздырғыштан берілетін кернеу ыдыстың ішіндегі байланыс элементіне беріледі және жылу кеңеюіне байланысты капиллярлық жүйенің ішінде айналатын сұйық азотты қыздырады.

3) Қысқа тұйықталуды болдырмау үшін қондырғының басқа металл бөліктерімен электрлік байланыс жоқ

4) Термопара LakeShore PID контроллерімен дұрыс жұмыс істейді

5) Түтіктер азот айналымы кезінде қоршаған ортамен жылу өткізгіштікке жол бермеу үшін жылу оқшаулағыш жабынмен мұқият жабылған.



4-сурет – Криогенді капиллярлық жүйе және Дьюар ыдысы (термос)

Эксперименттің тазалығын қамтамасыз ету үшін диффузды шағылысу тіркемесіне үрлету жүйесі салынды. Тіркемеге азот газын енгізу арқылы үлгілер мен мыс өзекті аяз түзілуден қорғап қана қоймай, ИҚ-белсенді емес ортаны құру арқылы тәжірибенің тұтастығын сақтайтын инертті орта жасалады. Тәжірибелік әдістемеміздің келесі қадамы жоғарыда аталған үрлету жүйесін, газдандырғышты дайындау – газдандырғыштың герметикалығын қамтамасыз ету,

газдандырғыш ыдысына азотты құю, салқындату кезінде үлгілерде су буының тұнбасын болдырмау үшін және ішінде ИҚ-сәуле өтетін диффузды шағылысу тіркемесін инертті ИҚ-белсенді емес ортамен қамтамасыз ету үшін оны спектрометрдің кюветтік бөлігіне резеңке құбыршегімен қосу. Газдандырғышты дайындау төменде егжей-тегжейлі сипатталған:

1. Манометрдегі ине нөлді көрсетіп тұрғанына және газдандырғыштың Дьюар ыдысының

бос екеніне, және азотпен толтыруға дайын екеніне көз жеткізу, содан кейін ғана ыдыстың қақпағын ашу.

2. Құбыршек екі тесікке де мықтап бекітіліп, азот ағып кетпес үшін саңылаулары болмауы керек.

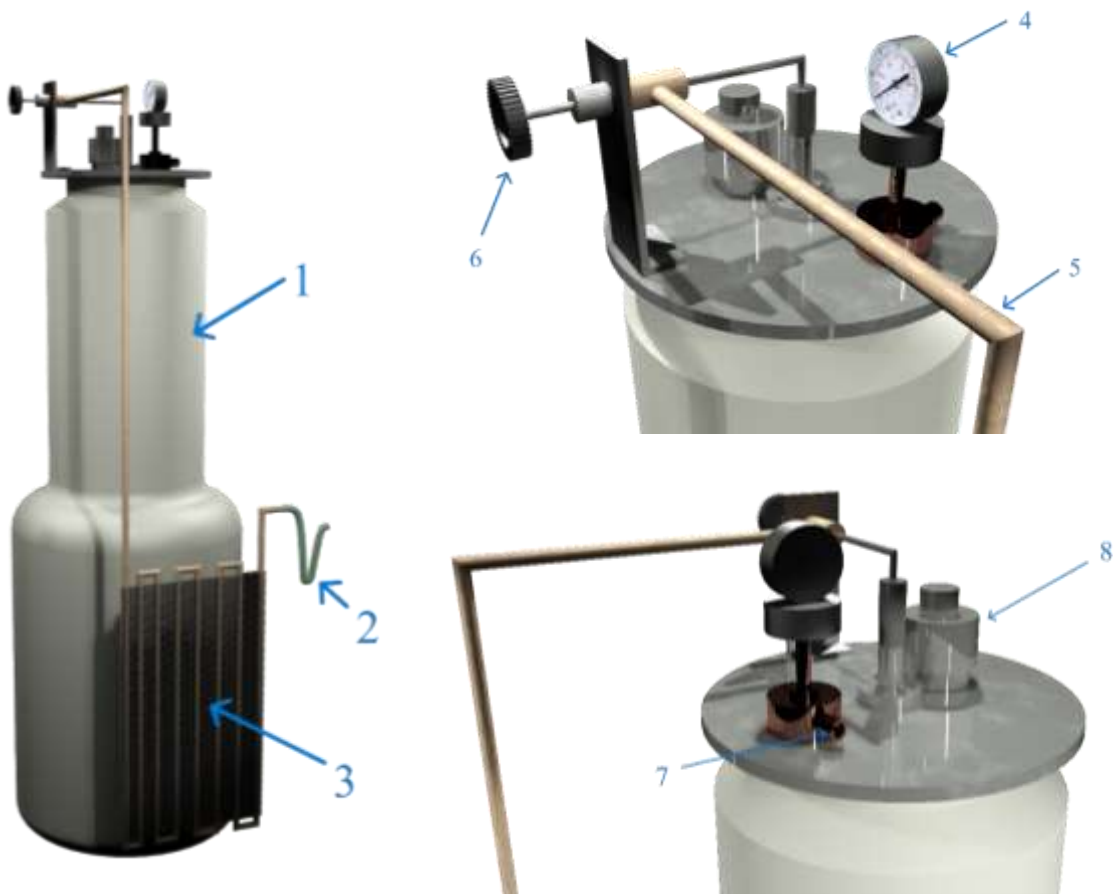
3. Азот газының жақсы ағынын қамтамасыз ету үшін барлық радиаторларда аяз жоғын тексеру.

4. Газдандырғыш толтыруға дайын болғанда, басқа Дьюар ыдысынан азотты оның ыдысына абайлап құюды бастау.

5. Ыдыстың қақпағын мықтап жабу және оның манометрі қосымша қысым көрсететініне көз жеткізу.

6. Құбыршек ұшын азоттың кедергісіз ағуына тексеру.

Газдандырғыштың құрылымы 5-суретте көрсетілген – ыдыс (5-сурет, 1-зат) азот сақтауға арналған, өйткені ол да Дьюар ыдысы, манометр (5-сурет, 4-зат) ыдыстың ішінде артық қысымды көрсетеді және азоттың шамамен сарқылу уақытын есептеуге көмектеседі, спектрометрге қосылған резеңке құбыршек (5-сурет, 2-зат) диффузиялық шағылысу тіркемесін ИҚ сәулеленуге инертті азотпен қамтамасыз етеді, азотты тасымалдауға арналған капиллярлық түтік (5-сурет, 5-зат), жылуды өткізуге арналған және тек азот газын беруге көмектесетін радиаторлар (5-сурет, 3-зат), азоттың ағып кетуін болдырмайтын қақпақ (5-сурет, 8-зат), азот ағынын реттеуге арналған шүмек (5-сурет, 6-зат), артық қысымның алдын алуға арналған кері клапан (5-сурет, 7-зат).



5-сурет – Инертті ИҚ-белсенді емес орта үшін азот шығаратын газдандырғыш

Контейнер ұяшықтарындағы үлгілердің температурасы оларды азот ағынымен салқындату немесе азот айналымын тоқтату арқылы қыздыру кезінде өзгереді. Спектрді алу кезінде үлгілердің нақты температурасын білуіміз керек. Үлгі температурасын өлшеу үшін біз LakeShore Model 325 криогенді PID температура реттегішіне қосылған Е-типті (хромель және

константан) термопараны пайдаланамыз. Контроллер интерфейсінен біз бастапқы температураны, бөлме температурасын, термопара түрін, термопараның түйреуішінің шығысын (А немесе В) және т.б. таңдай аламыз.

Контроллер екі бөлек пропорционалды-интегралдық-туынды (PID) басқару циклін қамтамасыз етеді. PID алгоритмі температураның

орнатылған мәні мен басқару сенсорынан кері байланыс негізінде басқару шығысын анықтайды. Кең көлемді теңшеу опцияларының арқасында ол криогенді салқындату жүйелерінің көпшілігімен және көптеген шағын жоғары температуралы пештермен үйлесімді. Жоғары ажыратымдылықтағы цифрлық-аналогтық түрлендіргіш біркелкі басқару шығысын қамтамасыз етеді. Пайдаланушылар PID мәндерін қолмен орната алады немесе реттеу процесін автоматты түрде реттеу үшін автоматты реттеу функциясын пайдалана алады.

Криогенді капиллярлық жүйені ұяшыққа қосып, оны FSM 2203 ИҚ Фурье-спектрометрінің ішіндегі диффузды шағылысу тіркемесіне орналастырып, біз тәжірибемізді бастаймыз. Көмірсутекті заттың кристалдану нүктесіне жеткеннен кейін температура төмендегендіктен, біз әрбір бірнеше белгілі температурада спектрлерді аламыз. Біздің мақсаттарымыздың бірі – атмосфералық қысымдағы және азоттың қайнау температурасындағы (77 К) көмірсутектердің физика-химиялық қасиеттерін зерттеу және осы жағдайларда үлгілердің спектрлерін алу. Үлгі температурасы өзінің минималды нүктесіне жеткенде және PID контроллері 77 К мәнін көрсеткенде, біз FTIR спектрлерін аламыз және азот ағынын тоқтату және термодинамикалық тепе-теңдіктің пайда болуына мүмкіндік беру арқылы қыздыру процесін бастаймыз және дәл осылай әр белгілі бірнеше температурада спектрлерді аламыз.

Бізге қажетті барлық қондырғылар мен аспаптардың дайын екеніне көз жеткізіп, төмен температурада (77 К) және атмосфералық қысымда зерттелетін заттардың (көмірсутекті қосылыстардың) оптикалық қасиеттерін зерттеуге арналған тәжірибемізді бастаймыз. Эксперимент жүргізу үшін келесі қадамдарды орындаймыз:

1 - кезең: Газдандырғыш пен криогенді капиллярлық жүйені азотпен толтыру және оларды дұрыс жабу. Оларды келесі құрылғыларға қосу: 1) инертті ортаны жасауға арналған резеңке құбыршегі бар газдандырғышты спектрометрдің кюветалық бөлігінің кірісіне қосу, 2) криогенді капиллярлық жүйені Е типті (хромель – константан) термопарасы бар LakeShore 325 PID температура реттегішіне және түтік ішінде азоттың айналымын жақсартатын қыздыру мен қосымша қысым жасауға арналған қысқыштар арқылы сымдармен қыздырғышқа қосу.

2 - кезең: Тек микрометр бұрандасы мен тартылатын ұстағыш үшін шағын орын қалдырып сапасы жоғары ИҚ спектрін алу үшін кюветаның ішінде ИҚ-белсенді емес инертті азот ортасын

сақтау үшін кюветалық бөлігін полипропилен және полиэтилен пленкасымен жабу. Ауа мен N₂ молекулалық салмақтары салыстырмалы ұқсас болғандықтан, мұндай ортаны сақтау қиын жұмыс емес.

3 - кезең: Қоршаған ортадан ылғалды сіңіретін калий бромидінің алдын ала ұнтақталған үлгісін тартпа контейнерінің таяқшасының бірінші ұяшығына салу, осылайша біз оның спектрін аламыз және оны негіз ретінде пайдалана отырып кейін оған сынақ зат спектрін бөлеміз. Сынақ үлгісін екінші және үшінші ұяшықтарға салу және ұстағышты диффузиялық шағылысу тіркемесіне салу.

4 - кезең: Тік микрометрлік бұранданы әрбір ұяшық үшін бөлек реттеу арқылы ИҚ сәулесінің ең жоғары қарқындылығы бар ұстағыштың орнын анықтау. Ол табылғаннан кейін біз реттеуді тоқтатамыз, содан кейін «FSpec» көмегімен үлгілердің спектрлерін жазып, оларды «Origin» бағдарламалық құралында талдау үшін осы позицияны пайдаланамыз.

5 - кезең: Үлгілерді салқындату кезінде бөлме температурасынан (290-300 К) бастап азоттың қайнау температурасына дейін (77 К) үлгі температурасын шынайы уақыт режимінде анықтау үшін температура реттегішін және ыдыстың ішіндегі азотты түтік арқылы қарқындырақ жүргізу үшін қыздырғышты қолдану арқылы спектрлерді алу. Айырмашылықтарды әрі қарай сипаттау үшін зерттелетін заттың фазалық ауысуын жіберіп алмау және әр фазада оның спектрлерін жазу маңызды. Фазалық ауысу температурасынан өткеннен кейін әрбір нақты температурада ең төменгі нүкте – 77 К жеткенше бірнеше спектрлерді аламыз және осы нүктедегі үлгілердің спектрлерін жазамыз. Осыдан кейін біз қыздырғышты тоқтатамыз, осылайша азоттың айналымын бәсеңдетеміз және жылулық тепе-теңдіктің пайда болуына мүмкіндік береміз. Бұл спектрлерді алған кезде үлгі қызып, оның температурасы жоғарылатады. Осыдан кейін үлгінің салқындату және қыздыру спектрлерін салыстырып, олардың айырмашылықтарын сипаттаймыз.

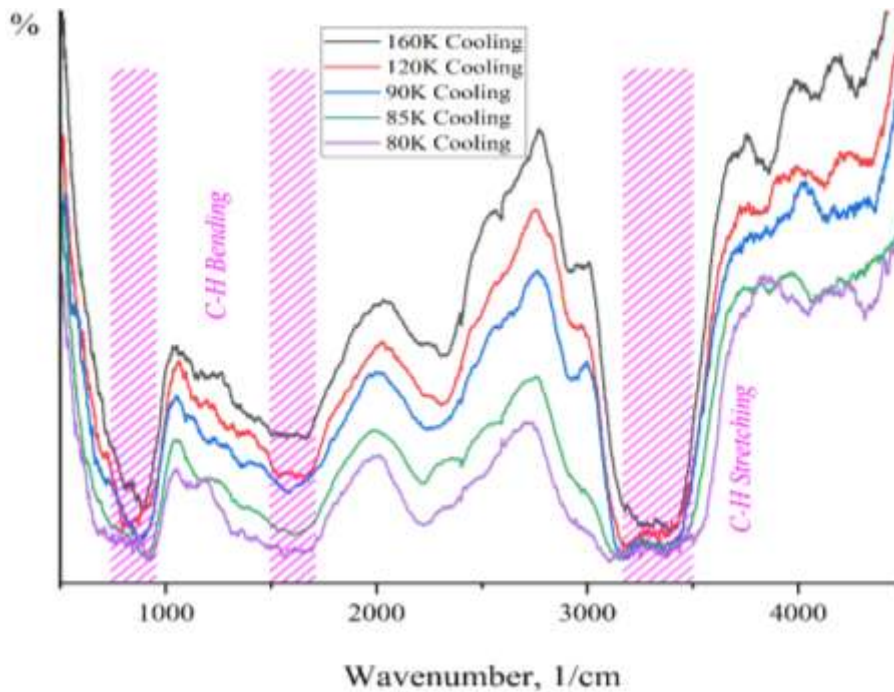
6 - кезең: Бізге қажетті спектрлерді алғаннан кейін ұстағышты тіркемеден, термостағы электрлік контактілерді және PID реттегіштің термопараларын алу арқылы тәжірибені тоқтатамыз. Бқтимал қалдық көмірсутек буларынан құтылу үшін спектрометр бөлімін азот газымен тазалаймыз және сол арқылы диффузиялық шағылысу тіркемесінің және FSM 2203 спектрометрінің ішін тазалаймыз.

Осыдан кейін біз осы эксперимент кезінде алынған спектрлерді талдап, нәтижелерді

ресімдеуіміз керек. Бұл зерттеулер мен тәжірибелер көмірсутекті материалдардың көптеген спектроскопиялық зерттеулері үшін іргелі ақпарат ретінде пайдаланылуы мүмкін, өйткені нәтижелер төмен температурада, бірақ атмосфералық қысымда алынады. Бірақ бұған дейін біздің нәтижелерімізді төмен температуралы қондырғыларды пайдаланып көмірсутек спектрлерін сипаттаған басқа деректермен салыстыру маңызды.

Зерттеу нәтижелері және талқылау

Тәжірибе нәтижелері 6-суретте келтірілген. Зерттелетін зат керосин, энергетикалық, технологиялық және басқа салаларда отын немесе еріткіш ретінде қолданылатын көмірсутек болып табылады. Суретте керосиннің функционалдық топтардың тән шыңдары, атап айтқанда, С-Н байланыстарының созылуы және иілуі көрсетілген.



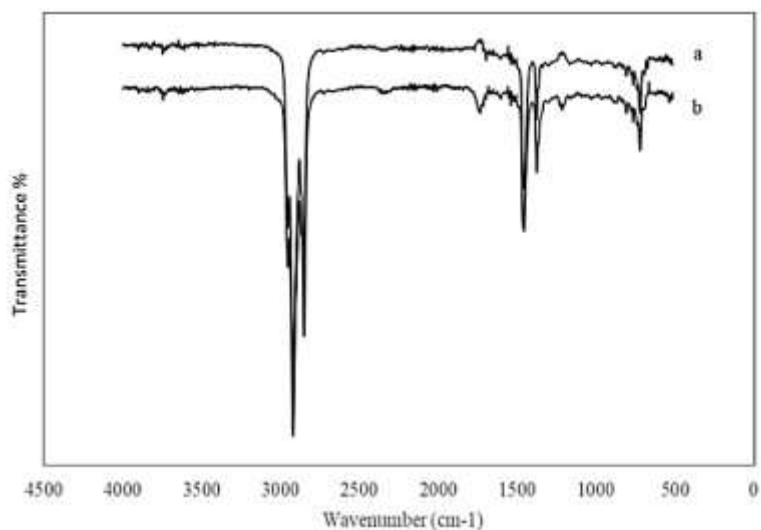
6-сурет – Бөлме температурасынан салқындатылған керосиннің спектрлері (тек бірнеше температура көрсетілген)

Төменде басқа авторлардың нәтижелері (7-сурет) және біздің экспериментпен салыстырмалы талдау берілген. Көріп отырғанымыздай, 3200-3500 cm^{-1} толқындар диапазонында С-Н созылуы үшін айқын гипсохромдық ығысу бар, С-Н иілісі (қайшы) үшін 1500-1700 cm^{-1} диапазонында әлсіз ығысу және 600-900 cm^{-1} диапазонында С-Н иілу (айналмалы және жазықтықтан тыс) үшін дерлік жылжу жоқ. Қалыпты жағдайда толқын ұзындығына сәйкес келетін басқа авторлардың нәтижелеріне қатысты үшін: 2800-3000 cm^{-1} -де С-Н созылу, 1300-1500 cm^{-1} С-Н иілу (қайшы) және 800 cm^{-1} нүктеде С-Н иілісі (айналмалы және жазықтықтан) [27].

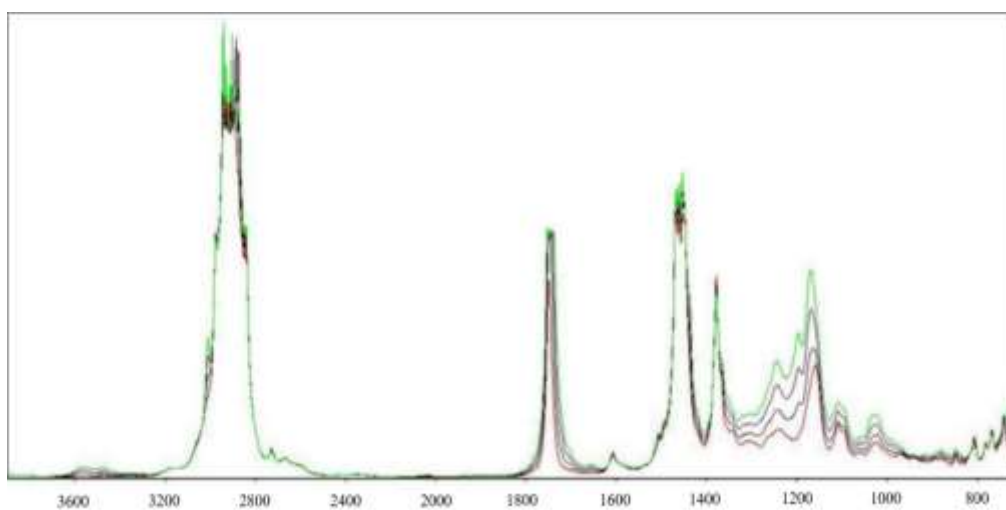
Басқа нәтижелер 8-суретте көрсетілген – бұл зерттеудегі керосин қалдық күнбағыс майынан алынған биодизельмен араласқанымен [28], біздің зерттеуіміздегі керосиннің FTIR спектрлеріне сәйкес келетін барлық сипаттамалық шыңдар, атап айтқанда, С-Н тербелісі, бар, бұл біздің

зерттеуімізде қолданылған өлшеу әдісінің өнімділігі мен тиімділігін одан әрі растайды. 8-суреттегі 1750 cm^{-1} толқын ұзындығына сәйкес келетін қосымша шыңы С-О созылуына жатады, себебі биодизельде оттегі бар.

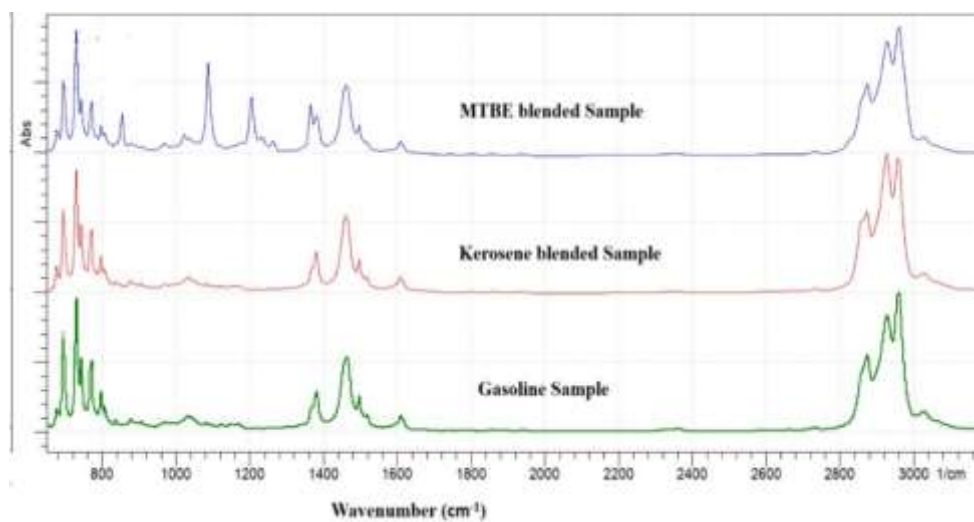
Осы саладағы басқа авторлардың [29] FTIR спектрлері 9-суретте көрсетілген. Бұл суретте басты назар осы жұмыста біздің нәтижелерімізбен салыстырылып отырған керосин қоспасының үлгісіне (керосин+бензин) берілген. Біз алдыңғы салыстыруларда байқалған сипаттамалық шыңдарды, атап айтқанда С-Н созылуын 2800-3000 cm^{-1} , С-Н иілісі (қайшы) 1500 cm^{-1} және С-Н иілісі (тербеліс және жазықтықтан тыс) 800 cm^{-1} -ді көре аламыз. Керосин бензинмен араласқанымен, бұл заттардың барлығы С (көміртек) және Н (сутегі) компоненттерінен тұрады, олардың тербелісі біздің зерттеуімізде қарастырылады.



7-сурет – Керосиннің ИҚ спектрлері (а) ультрадыбыстық сәулеленуге дейін және (b) кейін



8-сурет – Керосин + биодизельдің ИҚ спектрлері



9-сурет – 650–3200 cm^{-1} диапазонында МТВЕ, керосин және бензинмен араласқан үлгілердің FTIR спектрлері

Басқа авторлардың спектрлеріне қатысты біздің спектрлерімізде байқалған гипсохромдық ығысу үлгілерімізді салқындату жолының нәтижесінде байланысты. Бүкіл тәжірибе атмосфералық қысымда жүргізілгендіктен, спектрлердің вакуумда алынған басқа авторлардың нәтижелерінен ерекшеленетіні анық. Біздің экспериментімізде үлгілер орналасқан орта азотпен толтырылды, ал басқа авторларда үлгілер іс жүзінде ортасы жоқ вакуумда болды. Ығысу зерттелетін үлгінің (керосин) сұйық фазадан 300 К температурадан 77 К-ге дейін салқындатылуына, фазалық ауысудан өтуіне байланысты FTIR спектрінің соңғы нәтижесіне әсер етпеуі мүмкін емес.

Жоғарыда келтірілген салыстырмалы талдау төмен температурада (300 К-ден 80 К-ге дейін) және атмосфералық қысымда (101 325 Па, 1 атм) тәжірибелерімізде қолданылған төмен температуралы ұяшығы мен криогенді-капиллярлық жүйесі бар қондырғымыздың өнімділігі мен тиімділігін дәлелдейді.

Қорытынды

Бұл мақалада көмірсутек қосылыстарын, әсіресе керосинді, азоттық үрлету жүйесі,

газдандырғыш және жоғары ажыратымдылықтағы FTIR спектрометрі бар криогенді капиллярлық жүйені пайдаланып, төмен температурада және атмосфералық қысымда зерттеуге арналған тәжірибелік қондырғы және өлшеу әдістемесі сипатталған. Біздің қондырғы арқылы алынған керосиннің FTIR спектрлерін басқа зерттеушілер хабарлаған FTIR спектрлерінің нәтижелерімен салыстыру арқылы жүргізілген тексеру жақсы корреляция бар деген қорытындыға әкеледі.

Ұсынылған қондырғының атмосфералық қысымда төмен температуралы үлгілерді зерттеу мүмкіндігі, әдеттен тыс жағдайларда көмірсутекті заттардың қасиеттері мен құрылымы туралы түбегейлі жаңа іргелі деректер алу және оны атмосфералық қысымда криогендік зерттеулерге арналған жаңа жұмыс істейтін құрылғы ретінде ғылыми қоғамдастыққа ұсыну мүмкіндігі сияқты бірқатар артықшылықтары бар.

АЛҒЫС СӨЗ

Зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті (грант № AP19678245) қаржыландырды.

Әдебиеттер

- 1 Shaalan N.M. An approach to fabricate nanomaterials using a closed low-temperature growth system // *Materials Chemistry and Physics*. – 2024. – Vol. 328. – Art. 129930. DOI: [10.1016/j.matchemphys.2024.129930](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129930)
- 2 Sorokin N.I., Arkharova N.A., & Karimov D.N. Synthesis of nano-sized solid electrolyte $\text{Pr}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$ and the effect of heat treatment on the ionic conductivity of fluoride nanoceramics. // *Crystallography Reports*. – 2024. – Vol. 69(4). – P.561–568. DOI: [10.1134/S106377452460145X](https://doi.org/10.1134/S106377452460145X)
- 3 Carrascosa H., Muñoz Caro G.M., Martín-Doménech R., Cazaux S., Chen Y.-J., & Fuente A. Formation and desorption of sulphur chains (H_2S x and S x) in cometary ice: Effects of ice composition and temperature. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2024. – Vol. 533(1). – P.967–978. DOI: [10.1093/mnras/stae1768](https://doi.org/10.1093/mnras/stae1768)
- 4 Kakkenpara Suresh S., Dulieu F., Vitorino J., & Caselli P. Experimental study of the binding energy of NH_3 on different types of ice and its impact on the snow line of NH_3 and H_2O . // *Astronomy & Astrophysics*. – 2024. – Vol. 682. – Art. A163. DOI: [10.1051/0004-6361/202245775](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245775)
- 5 Sokolov D.Y., Yerezhap D., Vorobyova O., Ramos M.A., & Shinbayeva A. Optical studies of thin films of cryocondensed mixtures of water and admixture of nitrogen and argon. // *Materials*. – 2022. – Vol.15(21). – P.7441. DOI: [10.3390/ma15217441](https://doi.org/10.3390/ma15217441)
- 6 Sokolov D.Y., Yerezhap D., Vorobyova O., Golikov O., & Aldiyarov A.U. Infrared analysis and effect of nitrogen and nitrous oxide on the glass transition of methanol cryofilms. // *ACS Omega*. – 2022. – Vol.7(50). – P.46402–46410. DOI: [10.1021/acsomega.2c05090](https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05090)
- 7 Yerezhap D., Akylbayeva A., Golikov O., Sokolov D.Y., Shinbayeva A., & Aldiyarov A.U. Analysis of vibrational spectra of tetrafluoroethane glasses deposited by physical vapor deposition. // *ACS Omega*. – 2023. – Vol.8(22). – P.19567–19574. DOI: [10.1021/acsomega.3c00985](https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00985)
- 8 Golikov O.Yu., Yerezhap D.E., & Sokolov D.Yu. Researching carbon dioxide hydrates in thin films via FTIR spectroscopy at temperatures of 11-180 K. // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2023. – Vol.23(3). – P.483–492. DOI: [10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492)
- 9 Bhavani G., Durga Rao T., Niranjana M.K., Kumar K.R., Sattibabu B., Petkov V., Kannan E.S., & Reddy B.H. Structural, magnetic, optical and electronic properties of $\text{Gd}_2\text{NiIrO}_6$. // *Physica B: Condensed Matter*. – 2024. – Vol.695. – Art.No 416477. DOI: [10.1016/j.physb.2024.416477](https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416477)
- 10 Xu J., Liu Q., Zheng T., Xie M., Shen H., Li Y., Guo F., Zhang Q., Duan M., & Wu, K.-H. Comparing low-temperature NH_3 -SCR activity, operating temperature window and kinetic properties of the Mn-Fe-Nb/TiO₂ catalysts

prepared by different methods. // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol.356. – Art.No 129906. DOI: [10.1016/j.seppur.2024.129906](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129906)

11 Nishikino T., Sugimoto T., & Kandori H. Low-temperature FTIR spectroscopy of the L/Q switch of proteorhodopsin. // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2024. – Vol.26(35). – P.22959–22967. DOI: [10.1039/D4CP02248C](https://doi.org/10.1039/D4CP02248C)

12 Yang Z., Su B., Ding H., Qiu Y., & Zhong D. Prediction of asphalt low-temperature performance by FTIR spectra using comparative modelling strategy. // Road Materials and Pavement Design – 2024. – P.1–16. DOI: [10.1080/14680629.2024.2383915](https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2383915)

13 Moszczyńska J., Liu X., & Wiśniewski M. Non-thermal ammonia decomposition for hydrogen production over carbon films under low-temperature plasma—In-situ ftir studies. // International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – Vol.23(17). – P.9638. DOI: [10.3390/ijms23179638](https://doi.org/10.3390/ijms23179638)

14 Moody G., Kavir Dass C., Hao K., Chen C.-H., Li L.-J., Singh A., Tran K., Clark G., Xu X., Berghäuser G., Malic E., Knorr, A., & Li X. Intrinsic homogeneous linewidth and broadening mechanisms of excitons in monolayer transition metal dichalcogenides. // Nature Communications. – 2015. – Vol.6(1). – P.8315. DOI: [10.1038/ncomms9315](https://doi.org/10.1038/ncomms9315)

15 Goliko, O.Yu., Yerezhep D.E., & Sokolov D.Yu. Researching carbon dioxide hydrates in thin films via FTIR spectroscopy at temperatures of 11-180 K. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2023. – Vol.23(3). – P.483–492. DOI: [10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492)

16 Golikov O.Yu., Yerezhep D., & Sokolov D.Yu. Improvement of the automatic temperature stabilisation process in the cryovacuum unit. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2023. – Vol. 23(1). – P.62–67. DOI: [10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67)

17 Sokolov D.Y., Yerezhep D., Vorobyova O., Ramos M.A., & Shinbayeva A. Optical studies of thin films of cryocondensed mixtures of water and admixture of nitrogen and argon. // Materials. 2022. – Vol.15(21). – P.7441. DOI: [10.3390/ma15217441](https://doi.org/10.3390/ma15217441)

18 Golikov O.Yu., Yerezhep D., & Sokolov D.Yu. Improvement of the automatic temperature stabilisation process in the cryovacuum unit. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2023. – Vol.23(1). – P.62–67. DOI: [10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67)

19 Dillinger S., Mohrbach J., Hewer J., Gaffga M., & Niedner-Schatteburg G. Infrared spectroscopy of N₂ adsorption on size selected cobalt cluster cations in isolation. // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2015. – Vol.17(16). – P.10358–10362. DOI: [10.1039/C5CP00047E](https://doi.org/10.1039/C5CP00047E)

20 Fortes P.R., Da Silveira Petrucci J.F., Wilk A., Cardoso A.A., Raimundo Jr I.M., & Mizaikoff B. Optimized design of substrate-integrated hollow waveguides for mid-infrared gas analyzers. // Journal of Optics. – 2014. – Vol.16(9). – Art.No 094006. DOI: [10.1088/2040-8978/16/9/094006](https://doi.org/10.1088/2040-8978/16/9/094006)

21 Serdyukov V.I., Sinitisa L.N., Lugovskoi A.A., & Emel'yanov N.M. Liquid-nitrogen-cooled optical cell for the study of absorption spectra in a fourier spectrometer. // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2020. – Vol.33(4). – P.393–399. DOI: [10.1134/S1024856020040144](https://doi.org/10.1134/S1024856020040144)

22 Serdyukov V.I., Sinitisa L.N., Lugovskoi A.A., & Emel'yanov N.M. Low-temperature cell for studying absorption spectra of greenhouse gases. // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2019. – Vol.32(2). – P.220–226. DOI: [10.1134/S1024856019020106](https://doi.org/10.1134/S1024856019020106)

23 Sung K., Mantz A.W., Smith M.A. H., Brown L.R., Crawford T.J., Devi V.M., & Benner D.C. Cryogenic absorption cells operating inside a Bruker IFS-125HR: First results for 13CH₄ at 7µm. // Journal of Molecular Spectroscopy. –2010. – Vol.262(2). – P.122–134. DOI: [10.1016/j.jms.2010.05.004](https://doi.org/10.1016/j.jms.2010.05.004)

24 Mantz A.W., Sung K., Brown L. R., Crawford T.J., Smith M.A.H., Malathy Devi V., & Chris Benner D. A cryogenic Herriott cell vacuum-coupled to a Bruker IFS-125HR. // Journal of Molecular Spectroscopy. – 2014. – Vol.304. – P.12–24. DOI: [10.1016/j.jms.2014.07.006](https://doi.org/10.1016/j.jms.2014.07.006)

25 Kenbay A.A., Golikov O.Yu., Aldiyarov A.U., & Yerezhep D.E. Low-temperature cell for IR Fourier spectrometric investigation of hydrocarbon substances. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2023. – Vol.23(4). – P.696–702. DOI: [10.17586/2226-1494-2023-23-4-696-702](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-4-696-702)

26 Nguyen T.-D., & Ngo T.Q. The role of technological advancement, supply chain, environmental, social, and governance responsibilities on the sustainable development goals of SMEs in Vietnam. // Economic Research-Ekonomska Istraživanja. – 2022. – Vol.35(1). – P.4557–4579. DOI: [10.1080/1331677X.2021.2015611](https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.2015611)

27 Dollah A., Zainol Rashid Z., Hidayati Othman N., Nurliyana Che Mohamed Hussein S., Mat Yusuf S., & Shuhadah Japperi N. Effects of ultrasonic waves during waterflooding for enhanced oil recovery. // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol.7(3.11). – P.232. DOI: [10.14419/ijet.v7i3.11.16015](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.11.16015)

28 Mirea R., & Cican G. Theoretical assessment of different aviation fuel blends based on their physical-chemical properties. // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2024. – Vol.14(3). – P.14134–14140. DOI: [10.48084/etasr.6524](https://doi.org/10.48084/etasr.6524)

29 Biaktluanga L., Lalhruitluanga J., Lalramnghaka J., & Thanga H.H. Analysis of gasoline quality by ATR-FTIR spectroscopy with multivariate techniques. // Results in Chemistry. – 2024. – Vol.8. – Art.No 101575. DOI: [10.1016/j.rechem.2024.101575](https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101575)

References

- 1 N.M. Shaalan, *Materials Chemistry and Physics* 328, 129930 (2024). [DOI: 10.1016/j.matchemphys.2024.129930](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129930)
- 2 N.I. Sorokin, N.A. Arkharova, and D. N. Karimov, *Crystallography Reports* 69, 561–568 (2024). [DOI: 10.1134/S106377452460145X](https://doi.org/10.1134/S106377452460145X)
- 3 H. Carrascosa, G.M. Muñoz Caro, R. Martín-Doménech, S. Cazaux, Y.-J. Chen, and A. Fuente, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 533, 967–978 (2024). [DOI: 10.1051/0004-6361/202245775](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245775)
- 4 S.K. Suresh, F. Dulieu, J. Vitorino, and P. Caselli, *Astronomy & Astrophysics* 682, A163 (2024). [DOI: 10.1051/0004-6361/202245775](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245775)
- 5 D.Y. Sokolov, D. Yerezhep, O. Vorobyova, M. A. Ramos, and A. Shinbayeva, *Materials* 15, 7441 (2022). [DOI: 10.3390/ma15217441](https://doi.org/10.3390/ma15217441)
- 6 D.Y. Sokolov, D. Yerezhep, O. Vorobyova, O. Golikov, and A.U. Aldiyarov, *ACS Omega* 7, 46402–46410 (2022). [DOI: 10.1021/acsomega.2c05090](https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05090)
- 7 D. Yerezhep, A. Akylbayeva, O. Golikov, D.Y. Sokolov, A. Shinbayeva, and A.U. Aldiyarov, *ACS Omega* 8, 19567–19574 (2023). [DOI: 10.1021/acsomega.3c00985](https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00985)
- 8 O.Yu. Golikov, D.E. Yerezhep, and D.Yu. Sokolov, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 23, 483–492 (2023). [DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492)
- 9 G. Bhavani, T. Durga Rao, M.K. Niranjana, K.R. Kumar, B. Sattibabu, V. Petkov, E. S. Kannan, and B. H. Reddy, *Physica B: Condensed Matter* 695, 416477 (2024). [DOI: 10.1016/j.physb.2024.416477](https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416477)
- 10 J. Xu, Q. Liu, T. Zheng, M. Xie, H. Shen, Y. Li, F. Guo, Q. Zhang, M. Duan, and K.-H. Wu, *Separation and Purification Technology* 356, 129906 (2025). [DOI: 10.1016/j.seppur.2024.129906](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129906)
- 11 T. Nishikino, T. Sugimoto, and H. Kandori, *Physical Chemistry Chemical Physics* 26, 22959–22967 (2024). [DOI: 10.1039/D4CP02248C](https://doi.org/10.1039/D4CP02248C)
- 12 Z. Yang, B. Su, H. Ding, Y. Qiu, and D. Zhong, *Road Materials and Pavement Design* 1, 1–16 (2024). [DOI: 10.1080/14680629.2024.2383915](https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2383915)
- 13 J. Moszczyńska, X. Liu, and M. Wiśniewski, *International Journal of Molecular Sciences* 23, 9638 (2022). [DOI: 10.3390/ijms23179638](https://doi.org/10.3390/ijms23179638)
- 14 G. Moody, C. Kavir Dass, K. Hao, C.-H. Chen, L.-J. Li, A. Singh, K. Tran, G. Clark, X. Xu, G. Berghäuser, E. Malic, A. Knorr, and X. Li, *Nature Communications* 6, 8315 (2015). [DOI: 10.1038/ncomms9315](https://doi.org/10.1038/ncomms9315)
- 15 O.Yu. Golikov, D. E. Yerezhep, and D. Yu. Sokolov, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 23, 483–492 (2023). [DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492)
- 16 O.Yu. Golikov, D. Yerezhep, and D. Yu. Sokolov, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 23, 62–67 (2023). [DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67)
- 17 D.Y. Sokolov, D. Yerezhep, O. Vorobyova, M. A. Ramos, and A. Shinbayeva, *Materials* 15, 7441 (2022). [DOI: 10.3390/ma15217441](https://doi.org/10.3390/ma15217441)
- 18 O.Yu. Golikov, D. Yerezhep, and D. Yu. Sokolov, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 23, 62–67 (2023). [DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67)
- 19 S. Dillinger, J. Mohrbach, J. Hewer, M. Gaffga, and G. Niedner-Schatteburg, *Physical Chemistry Chemical Physics* 17, 10358–10362 (2015). [DOI: 10.1039/C5CP00047E](https://doi.org/10.1039/C5CP00047E)
- 20 P.R. Fortes, J. F. Da Silveira Petrucci, A. Wilk, A. A. Cardoso, I. M. Raimundo Jr., and B. Mizaikoff, *Journal of Optics* 16, 094006 (2014). [DOI: 10.1088/2040-8978/16/9/094006](https://doi.org/10.1088/2040-8978/16/9/094006)
- 21 V.I. Serdyukov, L. N. Sinitsa, A. A. Lugovskoi, and N. M. Emel'yanov, *Atmospheric and Oceanic Optics* 33, 393–399 (2020). [DOI: 10.1134/S1024856020040144](https://doi.org/10.1134/S1024856020040144)
- 22 V.I. Serdyukov, L. N. Sinitsa, A. A. Lugovskoi, and N. M. Emelyanov, *Atmospheric and Oceanic Optics* 32, 220–226 (2019). [DOI: 10.1134/S1024856019020106](https://doi.org/10.1134/S1024856019020106)
- 23 K. Sung, A. W. Mantz, M. A. H. Smith, L. R. Brown, T. J. Crawford, V. M. Devi, and D. C. Benner, *Journal of Molecular Spectroscopy* 262, 122–134 (2010). [DOI: 10.1016/j.jms.2010.05.004](https://doi.org/10.1016/j.jms.2010.05.004)
- 24 A.W. Mantz, K. Sung, L. R. Brown, T. J. Crawford, M. A. H. Smith, V. M. Malathy Devi, and D. C. Benner, *Journal of Molecular Spectroscopy* 304, 12–24 (2014). [DOI: 10.1016/j.jms.2014.07.006](https://doi.org/10.1016/j.jms.2014.07.006)
- 25 A.A. Kenbay, O. Yu. Golikov, A. U. Aldiyarov, and D. E. Yerezhep, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 23, 696–702 (2023). [DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-696-702](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-4-696-702)
- 26 T.D. Nguyen and T. Q. Ngo, *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja* 35, 4557–4579 (2022). [DOI: 10.1080/1331677X.2021.2015611](https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.2015611)
- 27 A. Dollah, Z. Zainol Rashid, N. H. Othman, S. N. Che Mohamed Hussein, S. Mat Yusuf, and N. S. Japperi, *International Journal of Engineering & Technology* 7, 232 (2018). [DOI: 10.14419/ijet.v7i3.11.16015](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.11.16015)
- 28 R. Mirea and G. Cican, *Engineering, Technology & Applied Science Research* 14, 14134–14140 (2024). [DOI: 10.48084/etasr.6524](https://doi.org/10.48084/etasr.6524)
- 29 L. Biakluanga, J. Lalhruaitluanga, J. Lalramnghaka, & H.H. Thanga, *Results in Chemistry*, 8, 101575 (2024). [DOI: 10.1016/j.rechem.2024.101575](https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101575)

Article history:

Received 18 October 2024

Accepted 8 December 2024

Мақала тарихы:

Түсті – 18.10.2024

Қабылданды – 8.12.2024

Information about authors:

1. **Alisher Kenbay** – Engineer, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mr.kenbay@gmail.com

2. **Darkhan Yerezhep** (corresponding author) – PhD, Ass. Prof., Head of the Department of Standardization, Certification and Metrology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: darhan_13@physics.kz

3. **Abdurakhman Aldiyarov** – Cand.Phys.-Math.Sci, Prof., Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. e-mail: abdurakhman.aldiyarov@kaznu.kz

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Алишер Кенбай** – инженер, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: mr.kenbay@gmail.com

2. **Дархан Ережеп** (автор корреспондент) – PhD, Асс.проф., Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің стандарттау, сертификаттау және метрология кафедрасының меңгерушісі, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: darhan_13@physics.kz

3. **Абдурахман Алдияров** – физ.-мат.ғыл.канд., проф., Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан e-mail: abdurakhman.aldiyarov@kaznu.kz