









ХҒТАР 44.31.39

Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-150-1-93-110>

## Жоғарғы қысым жағдайында материалдардың сорбциялық қасиеттерін жоғары температурада талдау әдістемесі

К.Ж. Бекмырза<sup>1</sup>, К.А. Кутербеков<sup>1</sup>, А.М. Кабышев<sup>1</sup>, М.М. Кубенова<sup>1</sup>,  
А.А. Баратова<sup>1</sup>, Н.К. Айдарбеков\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физика-техникалық ғылымдары институты, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана 010008, Қазақстан

\*Хат алмасуға арналған автор: [nursultanaidarbeckov@yandex.kz](mailto:nursultanaidarbeckov@yandex.kz)

**Аңдатпа.** Мақалада материалдардың кең спектрінің сорбциялық қасиеттерін зерттеу үшін жоғары температуралы жоғары қысымды көлемдік талдауды (HPVA әдісі) қолдану әдістемесі келтірілген. HPVA әдісі әртүрлі газдардың (сутегі, көмірқышқыл газы, немесе көмірсутек қоспалары) адсорбциясы мен десорбциясын қалыпты және экстремалды жағдайларды қамтитын әртүрлі температура мен қысым режимдерінде дәл өлшеуге мүмкіндік береді, бұл сутекті сақтау, көмірқышқыл газын ұстау және өңдеу, химиялық реакцияларды катализдеу сияқты перспективалы салаларда қолданылатын материалдарды бағалау үшін өте маңызды. HPVA әдісін қолдану сорбциялық сыйымдылық туралы сандық деректерді, сондай-ақ газ молекулаларының материалдардың бетімен және ішкі кеуектерімен өзара әрекеттесу кинетикасы туралы нақты деректерге жақын жағдайларда мәліметтер алуға мүмкіндік береді. Мақалада HPVA әдістемесінің маңызды кезеңдері егжей-тегжейлі қарастырылады: үлгілерді эксперименттік талдауға дайындау мен қоса алдын-ала газсыздандыру және ылғалды кетіру процесі, жабдықты жоғары температура мен қысым жағдайын ескере отырып баптау және калибрлеу, сонымен қатар кеуекті құрылымның негізгі параметрлерін анықтауға мүмкіндік беретін деректерді өңдеу алгоритмдері (кеуек көлемі, олардың мөлшерінің таралуы, сорбциялық қабілеті). Алынған нәтижелер жаңа жоғары тиімді сорбенттерді, катализаторларды және энергия ресурстарын сақтауға арналған наноқұрылымды материалдарды әзірлеуде практикалық маңыздылыққа ие болады, экологиялық таза және үнемді технологияларды құру мүмкіндіктерін одан әрі кеңейтеді.

**Түйінді сөздер:** жоғары қысымды көлемдік талдау, сорбциялық қасиеттер, адсорбция изотермалары, газсыздандыру процесі.

Жіберілді 24.01.2025 Өзгертілді 19.02.2025. Қабылданды 19.02.2025 Онлайн қол жетімді 25.03.2025

<sup>1</sup>\*хат-хабар авторы

## Кіріспе

Газ және сұйық орталарды бөлу мен тазартудың заманауи әдістері адсорбция мен абсорбцияны қамтитын сорбция процестерін кеңінен қолданады. Екі құбылыста бір фазаның басқа молекулаларын сіңіру қабілетіне негізделген, бірақ олар ағын механизмі мен сорбент пен сорбаттың өзара әрекеттесу сипаты бойынша ерекшеленеді. Адсорбция – физикалық немесе химиялық өзара әрекеттесу арқылы фазалық шекара бөлігінде – қатты дененің немесе сұйықтықтың бетінде молекулалардың немесе иондардың жинақталу процесі. Яғни газдардың адсорбциясы кеуекті қатты заттар мен дисперсті ұнтақтардың құрылымын сипаттау үшін кеңінен қолданылатын әдіс болып табылады. Ал абсорбцияның адсорбциядан айырмашылығы, жұтылатын зат молекулаларының сұйықтық немесе қатты материал болсын, фазалық шекара бөлігінің ішкі көлеміне енуімен сипатталады. Абсорбция кезінде сорбат ерігіштік пен диффузия заңдарына сәйкес сорбент көлеміне таралады, ал кейбір жағдайларда ол химиялық реакцияларға түсіп, тұрақты қосылыстар түзеді.

Кеуекті құрылымдарды, металлорганикалық қаңқа қосылыстарын (MOF) және көміртекті адсорбенттерді қоса алғанда, газдарды сақтау және сорбциялау үшін қолданылатын заманауи материалдар энергетика, қоршаған ортаны қорғау және химия өнеркәсібіндегі өзекті мәселелерді шешуде ерекше орын алады. Су текті сақтау тиімділігін арттыруға, көмірқышқыл газын ұстауға және каталитикалық процестерді жақсартуға бағытталған технологияларды дамыту температура мен қысым бойынша өзгеретін жағдайларда аталған материалдардың сорбциялық сипаттамаларын егжей-тегжейлі зерттеуге сұраныстың артуымен қатар жүреді [1].

Мұндай материалдардың функционалдық әлеуеті мен пайдалану тиімділігін бағалау үшін нәтижелердің жоғары дәлдігі мен қайталануын қамтамасыз ететін эксперименттік әдістерді қолдану қажет. Бұл әдістер сорбциялық қасиеттерді оларды практикалық қолданудың нақты сценарийлеріне мүмкіндігінше жақын жағдайларда зерттеуге бағытталуы керек [2]. Бұл тиісті технологиялық процестерде өнімділік пен тұрақтылықтың жоғары көрсеткіштеріне қол жеткізу үшін перспективалы материалдарды анықтау және олардың қасиеттерін оңтайландыру үшін қажет.

Материалдардың сорбциялық қасиеттерін зерттеудің ең дәл және кеңінен қолданылатын әдістерінің бірі жоғары қысымды көлемдік талдау (HPVA – High-Pressure Volumetric Analysis). Бұл әдіс газдардың адсорбциясы мен десорбциясы процестерін температура мен қысымның кең диапазонында зерттеуге мүмкіндік береді, бұл нақты пайдалану орталарына мүмкіндігінше жақын жағдайларды модельдеуге мүмкіндік береді [3, 4].

HPVA әдісінің негізгі принциптері зерттелетін материалмен адсорбцияланатын немесе десорбцияланатын газ көлемінің изотермиялық және изобарлық өлшемдеріне негізделген. Мұндай өлшемдік параметрлер бұл тәсілді әртүрлі материалдардың адсорбциялық сипаттамаларын анықтауға арналған әмбебап құралға айналдырады. HPVA қолдану сорбциялық сыйымдылық, адсорбцияның кинетикалық аспектілері, сондай-ақ газдардың бетімен және материалдардың ішкі құрылымдарымен өзара

әрекеттесу процестерін сипаттайтын термодинамикалық параметрлер туралы кешенді мәліметтер алуды қамтамасыз етеді. Мұндай нәтижелер сорбция механизмдерін түсінуде шешуші рөл атқарады және материалдардың қасиеттерін әртүрлі салаларда, соның ішінде газдарды сақтау, көмірқышқыл газын ұстау, сондай-ақ каталитикалық және экологиялық процестерде тиімді қолдану үшін оңтайландырудың мүмкін жолдарын анықтауға мүмкіндік береді.

HPVA әдісі сонымен қатар материалдардың кеуекті құрылымын егжей-тегжейлі зерттеуге кең мүмкіндіктер береді. Ол кеуектердің жалпы көлемі, кеуектердің мөлшері бойынша таралуы және жалпы сорбция қабілеті сияқты негізгі параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді. Бұл сипаттамалар материалдың әлеуетті қолдану салаларын бағалау үшін өте маңызды, соның ішінде газдарды сақтау, олардың селективті адсорбциясы немесе катализаторлар үшін тасымалдаушы ретінде пайдалану.

HPVA әдісімен жүргізілген зерттеулер материалдардың сорбциялық қасиеттерін сипаттап қана қоймай, олардың құрылымдық ерекшеліктерін түсінуді тереңдетуге мүмкіндік беретін құнды деректерді ұсынады. Бұл құрылымдық аспектілер өз кезегінде әртүрлі технологиялық процестердегі материалдың өнімділігіне айтарлықтай әсер етеді. Осылайша, HPVA әдісі материалдардың функционалдық сипаттамаларын оңтайландырудың, сондай-ақ заманауи өнеркәсіптік және ғылыми міндеттердің талаптарына сәйкес келетін жаңа шешімдерді әзірлеудің маңызды құралы болып табылады. Сонымен қатар сорбциялық материалдарды кешенді сипаттау үшін төмен қысымды манометриялық анализаторлар (BET әдісі), гравиметриялық анализаторлар (Dynamic Vapor Sorption analyzer) және калориметриялық қондырғылар (Differential Scanning Calorimetry) сияқты балама әдістер де қолданылады.

Micromeritics ASAP сияқты төмен қысымды манометриялық анализаторлар газ адсорбциясы изотермаларына негізделген материалдардың меншікті беті мен кеуектілігін анықтау үшін кеңінен қолданылады. HPVA материалдардың сорбциялық сипаттамаларын, кең ауқымды қысымда зерттеуге мүмкіндік береді, ал BET анализаторлары негізінен адсорбенттердің меншікті беті мен микрокеуекті құрылымын егжей-тегжейлі талдау үшін қолданылады.

Динамикалық типтегі гравиметриялық анализаторлар газдың қысымына немесе ылғалдылығына байланысты үлгінің массасының өзгеруін өлшейді. Бұл әдіс үлгі массасының шамалы өзгерістеріне жоғары сезімталдыққа ие, сондықтан бұл құрылғылар ылғалдандыру, бу сорбциясы және органикалық қосылыстағы заттарды зерттеуге қолайлы.

Калориметриялық әдістер сорбцияның жылу әсерін өлшеуге мүмкіндік береді. HPVA сорбцияның сандық параметрлерін анықтайды, ал калориметрия адсорбция жылуы туралы мәліметтер беру арқылы зерттеуді толықтырады.

Бұл мақалада үлгілерді дайындаудың негізгі кезеңдерін, өлшеу жүргізуді, жабдықты калибрлеуді, сондай-ақ алынған эксперименттік деректерді өңдеу мен түсіндіруді қамтитын HPVA қолдану әдістемесінің толық сипаттамасы берілген. Материалдарды алдын-ала дайындаудан бастап нәтижелерді егжей-тегжейлі талдауға дейінгі әдістемелік тәсілдің барлық аспектілеріне ерекше назар аударылады. Бұл кеуекті құрылымдарды

және олардың сорбциялық сипаттамаларын зерттеу үшін HPVA әдісінің мүмкіндіктерін жан-жақты бағалауға мүмкіндік береді [5].

Қарастырылып отырған әдістеме зерттеушілерге материалдардың құрылымдық және функционалдық қасиеттерін терең және объективті бағалау үшін қажетті құралдарды ұсынады [6]. Нәтижелер сорбциялық өнімділігі жақсартылған жаңа жоғары тиімді материалдарды әзірлеу үшін маңызды мәнге ие, бұл әсіресе өнеркәсіптік қолданбаларға қатысты. Атап айтқанда, газды сақтау, селективті адсорбция процестері және төтенше жағдайларда жұмыс істеу сияқты салалар жоғары сорбциялық сыйымдылықты сыртқы әсерлерге төзімділікпен біріктіретін материалдарды қажет етеді. Әдістеменің егжей-тегжейлі талдауы және ұсынылған тәсілдер қазіргі зерттеулерде HPVA қолдану әлеуетін кеңейту арқылы осы мәселелерді шешуге ықпал етеді.

## 2. HPVA жұмыс істеу принципі

### 2.1. Жабдықтың сипаттамасы.

Жоғары температуралы жоғары қысымды көлемдік анализатор, статикалық көлемдік әдіс негізінде сутегі ( $H_2$ ), метан ( $CH_4$ ) және көмірқышқыл газы ( $CO_2$ ) сияқты газдарды қолдана отырып, жоғары қысымды адсорбция изотермаларын алуға арналған. Бұл әдіс зерттеу камерасына орналастырылған зерттелетін үлгіге белгілі газ көлемін (адсорбтив) мөлшерлеп енгізуге негізделген. Адсорбцияланатын газ бен зерттелетін үлгі беті арасындағы тепе-теңдікке жеткеннен кейін соңғы тепе-теңдік қысымы жазылады. Осы мәліметтер негізінде үлгіге адсорбцияланған газдың мөлшері есептеледі.

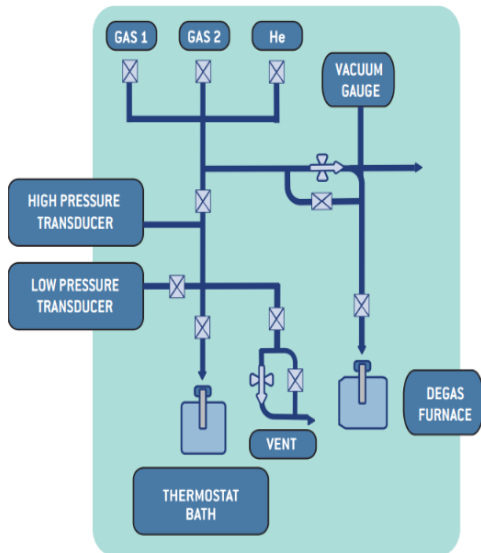
Процедура алдын ала белгіленген максималды мәнге жеткенге дейін берілген қысым аралықтарында қайталаынады. Адсорбцияланған газдың көлемін және сәйкес тепе-теңдік қысымын білдіретін алынған тепе-теңдік нүктелері адсорбция изотермасын құру үшін қолданылады.

Жоғары өнімділік пен өлшеу дәлдігін қамтамасыз ету үшін газды мөлшерлеу және үлгі камерасындағы қысымды бақылау үшін жеке датчиктер қолданылады. Мұндай техникалық шешім деректердің жоғары сенімділігіне және изотермаларды құру дәлдігіне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

HPVA сериясына екі негізгі модель кіреді: HPVA-100 және HPVA-200. Бірінші модель, HPVA-100, максималды қысымы 100 барға дейін жұмыс істеуге арналған, бұл бірқатар стандартты адсорбция және газды сақтау зерттеулеріне жарамды. Екінші модель 200 барға дейінгі қысымда жұмыс істейді, бұл ультра жоғары қысым жағдайында жұмыс істеуге арналған материалдарды талдауға мүмкіндік береді. Екі анализатор да бөлек газсыздандыру портымен жабдықталған, бұл өлшеу алдында үлгідегі қалдық ылғал мен ұшпа компоненттерді мұқият тазалап, шығарып тастауға мүмкіндік береді, осылайша нәтижелердің жоғары дәлдігі мен қайталануын қамтамасыз етеді.

HPVA анализаторында сынақтарды бастамас бұрын үлгідегі ылғалды тазалауға мүмкіндік беретін бөлек газсыздандыру портына орналастырылады. Кіріктірілген пеш температураны  $500^{\circ}C$  дейін сақтай алады, жылуды дәл басқару мүмкіндігіне ие. Пештің бағдарламаланатын жұмыс режимі термиялық өңдеу процесін үлгілерді дайындаудың

нақты талаптарына бейімдеуге мүмкіндік беретін сатылы қыздыру (ramp) және белгіленген температурада ұстау (soak) функцияларын қамтиды.



а)



б)

**1 – сурет. а) HPVA қондырғысының сызбасы; б) HPVA анализаторының жалпы көрінісі**

Қолданушының қауіпсіздігін қамтамасыз ету мақсатында HPVA анализаторы жүйеде газ мөлшерінің шектен тыс көбейіп кеткен жағдайда  $H_2$  деңгейінің жоғарылауын анықтауға арналған сутегі сенсорымен жабдықталған. Сенсор іске қосылған кезде қорғаныс жүйесі құрылғыны қауіпсіз режимге қояды, қуатты автоматты түрде өшіреді және барлық клапандар жабылады. Мұндай көп деңгейлі қорғаныс жүйесі тәуекелдерді азайтады және жабдықты қауіпсіз пайдалануды қамтамасыз етеді.

HPVA анализаторының стандартты түрдегі конфигурациясына вакуумдық манометрлі сорғы, тұрақты температурада ұсталатын газ коллекторы (әдетте  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ), екі қысым датчигі, үлгі камерасы, PID - реттегіші бар газсыздандыру пеші, сондай-ақ термостатталған ваннаға қосылатын термиялық контейнер кіреді (1-сурет). Сонымен қатар, құрылғы жиынтығына диафрагмалық тиекті клапандарымен жабдықталған тот баспайтын болаттан жасалған зерттелетін үлгіге арналған екі цилиндрлі ұстағыш кіреді.

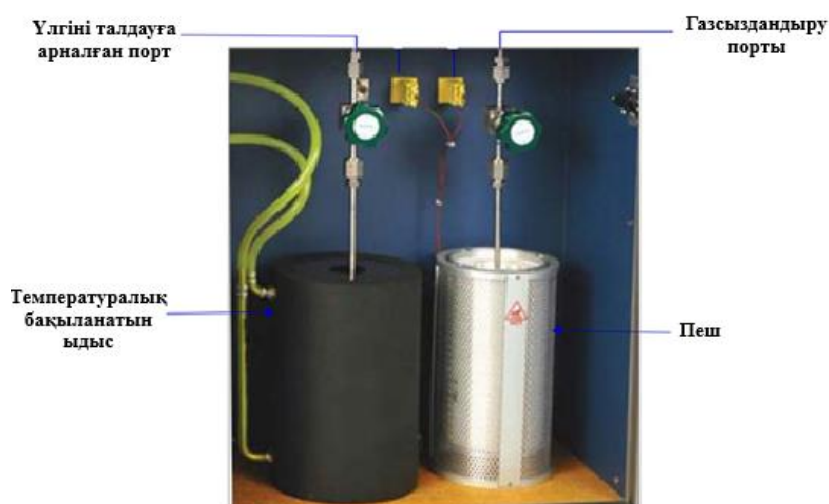
HPVA анализаторының жүйелік схемасының негізгі компоненттері қарапайым және құрылғының бағдарламалық интерфейсында қол жетімді. Ол қажет болған жағдайда клапандарды қолмен басқару үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл эксперименттер барысында қосымша икемділік пен бақылауды қамтамасыз етеді.

## Басқару элементтері және қосқыштар



2 – сурет. Температураны басқаруға арналған интерфейс

*Пештің температурасы: басқару және көрсету.* Пештің ішіндегі ағымдағы температураны Цельсий шкаласы бойынша көрсетеді. Берілген температураның мәнін арттыру немесе азайту арқылы дәл реттеу мүмкіндігі қарастырылған.



3 – сурет. Үлгіге арналған камера

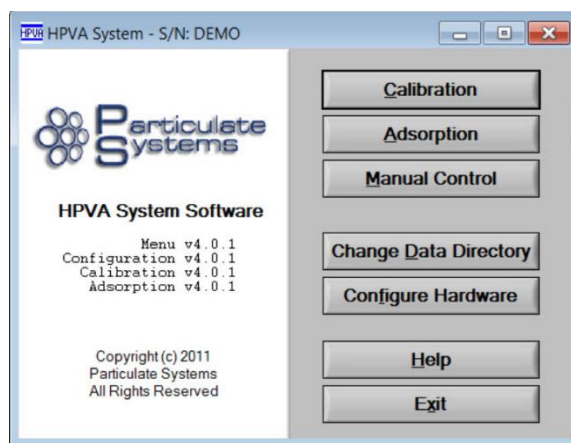
Температураны бақылау жүйесі бар ыдыс (сосуд) эксперимент барысында үлгінің тұрақты температурасын ұстап тұруға арналған, бұл жағдайлардың тұрақтылығын қамтамасыз етеді және дәл, қайталанатын нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік береді. Бұл температураны бақылау жүйесі экспериментте маңызды рөл атқарады, өйткені ол үлгіні дұрыс температура диапазонында ұстайды, газдың адсорбциясы немесе десорбциясы барысына әсер етуі мүмкін сыртқы тербелістерді азайтады.

Талдау порты эксперимент жүргізу үшін негізгі арна ретінде қызмет етеді, ол арқылы үлгіге газ жеткізіледі және адсорбция немесе десорбция деректері жазылады. Бұл арнайы байланыстырғыш газ беру процесін басқаруға мүмкіндік береді және адсорбент пен адсорбат арасындағы тұрақты өзара әрекеттесуді қамтамасыз етеді, бұл әртүрлі

қысымдар мен температураларда жұтылған немесе шығарылған газ көлемін дәл өлшеу үшін маңызды.

Газсыздандыру порты үлгіні талдауға алдын ала дайындауға арналған порт. Экспериментті орындау алдында үлгі осы порт арқылы тазарту процесінен өтеді, бұл эксперимент нәтижелерінің дәлдігіне әсер етуі мүмкін қалдық ылғал мен ұшпа қоспаларды тазалауға мүмкіндік береді. Дайындықтың бұл кезеңі үлгінің тазалығын және талдау кезінде алынған мәліметтердің дұрыстығын қамтамасыз ету үшін қажет.

Кіріктірілген пеш үлгіні талдауға дайындау кезінде қажетті температураны сақтайды. Бұл үлгіні қажетті деңгейге дейін қыздыруға және оны дайындықтың барлық кезеңінде тұрақты күйде ұстауға мүмкіндік береді. Бұл температура режимі үлгіні таза және эксперимент параметрлеріне ыңғайлы етіп, үлгіні адсорбция процесінде одан әрі өлшеуге мүмкіндігінше қолайлы етеді.



4 – сурет. HPVA бағдарламасының интерфейсін визуализациялау

Негізгі мәзір HPVA жүйесінің бағдарламалық жасақтамасының барлық негізгі мүмкіндіктеріне қол жеткізуге мүмкіндік береді, бұл пайдаланушыға талдау параметрлерін реттеуден бастап деректерді бақылауға және өңдеуге дейінгі эксперименттің барлық кезеңдерін басқаруға мүмкіндік береді. Бұл мәзір арқылы қажетті құралдар мен режимдерге, соның ішінде температураны басқаруға, қысымды реттеуге, үлгіні газсыздандыруға және адсорбция мен десорбция изотермаларын құруға және талдауға арналған функцияларға оңай өтуге болады. Негізгі мәзірдің интуитивті интерфейсі эксперимент процесін жеңілдетеді және жүйенің барлық мүмкіндіктеріне ыңғайлы қол жетімділікті қамтамасыз етеді, бұл HPVA тәжірибесін мүмкіндігінше тиімді және дәл етеді.

Калибрлеу (Calibration) – жүйенің коллекторының көлемін реттеуге және калибрлеуге арналған функция. Бұл мүмкіндікке тек рұқсат етілген техникалық қолдау мамандары қол жеткізе алады, бұл жүйе параметрлерінің қауіпсіздігі мен дәлдігіне кепілдік береді.

Адсорбция (Adsorption) – температура мен қысым сияқты эксперимент параметрлерін орнатуға және экспериментті тікелей жүргізуге мүмкіндік беретін модуль. Мұнда оператор нақты адсорбция деректерін алу үшін қажетті шарттарды енгізе алады.

Қолмен басқару (Manual Control) – экранда аспап схемасын көрсете отырып, визуалды интерфейс арқылы жүйені қолмен басқаруға мүмкіндік береді. Бұл режим жеке операцияларды жүргізуге немесе жүйені диагностикалауға ыңғайлы.

Деректер каталогын өзгерту (Change Data Directory) – эксперимент деректері сақталатын каталогты таңдауға немесе өзгертуге мүмкіндік беретін функция. Ол оператордың талаптарына сәйкес деректерді ұйымдастыруға және құрылымдауға көмектеседі.

Жабдықты күйге келтіру (Configure Hardware) – анализатордың жұмысына әсер ететін параметрлерді реттеуге арналған құрал. Ол арқылы құрылғының жұмысын нақты қажеттіліктерге немесе эксперименттің ерекшеліктеріне бейімдеу үшін жүйенің негізгі параметрлерін өзгертуге болады.

Анықтама (Help) – HPVA жүйесі үшін егжей-тегжейлі оператор нұсқаулығына қол жеткізуді қамтамасыз етеді. Оператор құрылғының жұмысы мен конфигурациясы туралы қажетті ақпаратты жылдам іздеу үшін бетбелгілер мен мазмұн кестесін пайдалана алады.

Шығу (Exit) – HPVA бағдарламалық жасақтамасын аяқтайды және бағдарламаны жабады.

### 3. Экспериментке үлгіні дайындау процедурасы

Эксперимент жүргізу үшін үлгіні дайындау эксперименттік деректердің ықтимал бұрмалануын болдырмау үшін қажет таза және құрғақ цилиндрлі ұстағышты дұрыс көлемде таңдаудан басталады. Маңызды кезең-аналитикалық таразыларды дайындау, оларды калибрлеу және нөлдік мәнде тұрақтандыру, бұл кейінгі өлшеулердің жоғары дәлдігін қамтамасыз етеді. Содан кейін эксперимент барысында бақылау мәні ретінде пайдаланылатын бос цилиндрлі ұстағыштың массасы анықталады.

Бос цилиндрдің массасын анықталғаннан кейін таразыдан алынып тасталады және үлгінің жоғалуын болдырмайтын және ұстағыштың біркелкі толтырылуына ықпал ететін шұңқыр орнатылады. Үлгіні шұңқырға ақырындап себелеп қосады (5 –сурет (а)), бұл бос орындардың пайда болуын болдырмайды және материалдың цилиндр ішінде біркелкі таралуын қамтамасыз етеді.

Содан кейін өлшеудің жоғары дәлдігін қамтамасыз ету үшін таразыны қайта бағаналау процесі жүргізіледі. Осыдан кейін цилиндрдің массасы үлгімен қоса өлшеніп, бекітіледі. Үлгі толтырылған цилиндрдің массасы мен бос цилиндрдің массасы арасындағы айырмашылық анықталады. Алынған мән эксперименттік параметрлерді конфигурациялау кезінде қолданылады.

$$m_{sh} - m_h = m_s \quad (1)$$

мұндағы  $m_{sh}$  – үлгі цилиндрінің массасы (*sample+holder*);  $m_h$  – үлгісіз цилиндрдің массасы (*holder*);  $m_s$  – үлгінің массасы (*sample*).

Бұл процедуралар реттілігін қатаң сақтау өлшеу нәтижелерінің жоғары дәлдігі мен қайталануын қамтамасыз ете отырып, ықтимал қателіктерді азайтуға мүмкіндік береді.



Зерттеу тәжірибесінің нәтижесінде алынған деректердің дұрыстығына кепілдік бере отырып, материалдардың адсорбциялық қасиеттерін талдауға сенімді жағдай жасайды.

*Газсыздандыру процесі.*

Бірінші кезеңдегі негізгі қадам үлгі ұстағыш цилиндрді құрастырудан басталады. Ол үшін фильтрлі сақина (*gasket*) цилиндрге орнатылады (5 –сурет (ә)), содан кейін ұстағыштың жоғарғы бөлігі цилиндрге бекітіледі (5 –сурет (б)). Байланыстырушы гайка бастапқы бекітілгенге дейін қолмен бұралады.

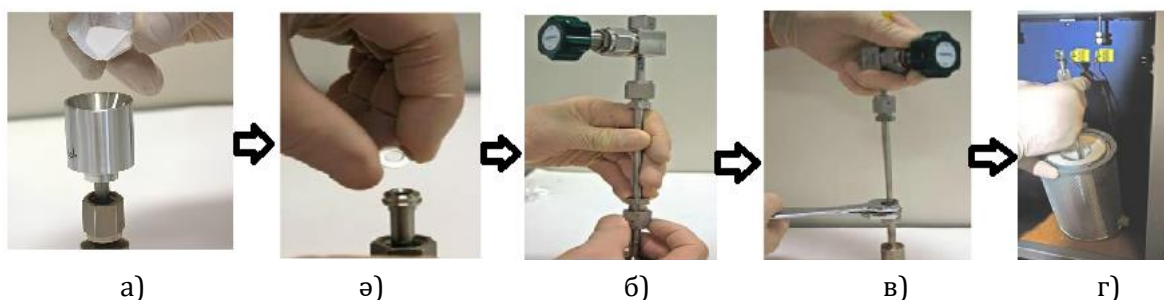
Эксперименттерге арналған фильтрлі сақинаның екі түрі бар: сүзгімен және сүзгісіз. Сүзгілі тығыздағыштар ұсақ ұнтақтармен жұмыс істеу үшін ұсынылады, өйткені олар бөлшектердің үлгіден шығып кетуіне жол бермейді және дәлірек нәтиже береді. Сүзгісіз тығыздағыштар материалдардың басқа түрлерін талдау үшін жеткілікті таңдау болып табылады, мұнда сүзгінің болмауы деректердің дұрыстығына әсер етпейді.

Байланыстырғыштың сенімділігін қамтамасыз ету және үлгілердің ықтимал шығып кетуінің алдын алу үшін екі бұрандалы кілт қолданылады (5 –сурет (в)). Кілттердің көмегімен қосылыс қосымша 1/8 айналымға бұрылады, бұл компоненттердің тығыз орналасуына кепілдік береді. Бұл тәсіл газсыздандыру процесінде үлгілердің цилиндр ішінде нық орналасуын қамтамасыз етеді және кейінгі қайталанатын өлшеулердің дұрыстығын қамтамасыз етеді.

Келесі кезең пештің термопара сымдары үлгі салынатын камераның ішіндегі тиісті қосқыштарға қосылады. Бұл эксперимент барысында температураны дәл бақылауға және бірқалыпты деңгейде ұстап тұруға мүмкіндік береді.

Дайындалған үлгіні пештің қыздыру бөліміне сәл көлбеу етіп орналастырылады, бұл орнатуды жеңілдетеді (5 –сурет (г)). Үлгі ұстағыш газсыздандыру портына қосылады, үлгінің нық орналасуын қамтамасыз ету үшін тығыздағыш сақинаның дұрыс орнатылғанына көз жеткізу керек.

Үлгі ұстағыш цилиндр орнатылғаннан кейін газсыздандыру портына бекітіледі. Гайка бастапқы бекітілгенге дейін қолмен қатайтылады, содан кейін соңғы қатайту үшін екі бұрандалы кілт қолданылады. Бұл жағдайда портты зақымдаудан немесе қосылыстың деформациясына әкелуі мүмкін шамадан тыс күш салудан аулақ болу керек.



**5 – сурет. Газсыздандыру процесінің орындалу реттілігі: а) зерттелетін үлгіні цилиндрге себелеп салу процесі; ә) фильтрлі сақина (*gasket*) цилиндрге орналастыру; б) ұстағышты цилиндрге бекіту; в) бұрандалы кілтпен байланысты қатайту; г) дайындалған үлгіні пешке орналастыру**

Температураны құрылғының алдыңғы жағында орналасқан температураны басқару интерфейсында (\* ) түймені басу арқылы, содан кейін температураны жоғарылату түймесін басу керек. Қажетті деңгейге жеткенше мәндерді реттеліп, содан кейін түймені босату керек. Пешті қыздыру процесі басталып және белгіленген температураға шамамен 15 минуттан кейін жетеді.

Жүйені бағдарламалық жасақтама арқылы басқару үшін келесі әрекеттер орындалады:

– Бағдарлама интерфейсында жүйенің сызбасы бар терезені ашу үшін «Manual Control» опциясы таңдалады.

– 10 клапанының суретінің түймесін екі рет басылады. Осыдан кейін клапан белгішесі түсін жасылға өзгертеді, бұл оның ашылғанын білдіреді.

– Вакуумдық процесті бастау үшін газсыздандыру портының жоғарғы жағында орналасқан жасыл түстегі клапан баяу ашылады.

Үлгіні вакуумдық жүйеде материалдың сипаттамаларына сәйкес ұсынылған уақытқа қалдыру керек. Газсыздандыру процесі аяқталғаннан кейін, операцияны аяқтау үшін газсыздандыру портының жоғарғы жағындағы жасыл түстегі клапан ақырын жабылады. «Manual Control» схемасы терезесінде 10 клапанды жабу керек. Осыдан кейін оның индикаторы сәтті жабылғанын көрсететін сары түске өзгереді. Контроллерді пайдаланып пештің температурасын бөлме температурасына дейін төмендетіп, үлгінің толығымен суытылғанын күту қажет. Үлгі бөлме температурасына жеткеннен кейін үлгі ұстағышты газсыздандыру портынан алып тастау керек.

Үлгі ұстағышын алып тастағаннан кейін, тығыздағыш сақинаның газсыздандыру портында қалуын қадағалау керек. Содан кейін оның ластануын болдырмау және жүйенің тығыздығын сақтау үшін портты жабу керек.

*Үлгі камерасын қосу және экспериментті баптау процедурасы.*

Газсыздандыру портының жоғарғы жағындағы гайканы бұрап алып, түтік пен клапанмен бірге үлгі камерасын алу қажет. Камераны талдау портына алып келіп және гайканы ақырын қатайту керек. Бағдарламалық жасақтамадағы «Manual Control» терезесін жауып, «Adsorption» терезесін ашамыз. Қолда бар үлгілерді пайдалану және қажет болған жағдайда эксперимент параметрлерін өңдеу үшін «Recall Template» түймесі қолданылады.

*Эксперимент параметрлерін баптау:* Эксперимент идентификаторы, оператор идентификаторы, үлгінің салмағы және оның атауы сияқты қажетті деректерді енгіземіз. Өлшеу параметрлеріне өту үшін «Edit» терезесіндеі батырма арқылы өтеміз.

– Эксперимент жоспарына сәйкес адсорбция (Adsorption) және десорбция (Desorption) үшін қысым кезеңдері.

– Эксперимент температурасы, қоршаған температура (Ambient) және үлгіні ұстау уақыты.

– Үлгіні шығару уақыты (тәртіп бойынша 10 минут, талаптарға байланысты өзгерту мүмкіндігі бар) осы шарттар орнатылады.

Пайдаланатын газ үшін дұрыс порт таңдалғанына көз жеткізіп, қажетті газды және тиісті газ портын таңдаймыз. «Measure FS» опциясын белгілеп, температураны басқару әдісі таңдалады. Барлық опцияларды орнатқаннан кейін негізгі терезеге оралу үшін «OK» түймесін басамыз. Файлдық қалыпты кейінірек тағы да пайдалану мақсатында бірегей атаумен сақтаған жөн.

HPVA құрылғысында адсорбция процесі жүйедегі газ қысымын кезең-кезеңімен арттыру арқылы жүзеге асырылады, бұл әртүрлі жағдайларда сорбция изотермасын құруға мүмкіндік береді. Бірінші кезеңде газ дозалау камерасына берілген бастапқы қысымға дейін енгізіледі (мысалы, 1 бар), содан кейін клапанды ашу арқылы ол үлгі орналастырылған камераға түседі. Тепе-теңдік күйі орнаған сайын қысымның өзгеруі тіркеледі, оның негізінде сіңірілген газдың көлемі есептеледі. Әрі қарай қысым дәйекті түрде артады (мысалы, 5, 10, 20, 50, 100 бар және одан жоғары) және процесс қайталанады, бұл берілген қысым диапазонында адсорбциялық изотерманы құруды қамтамасыз етеді.

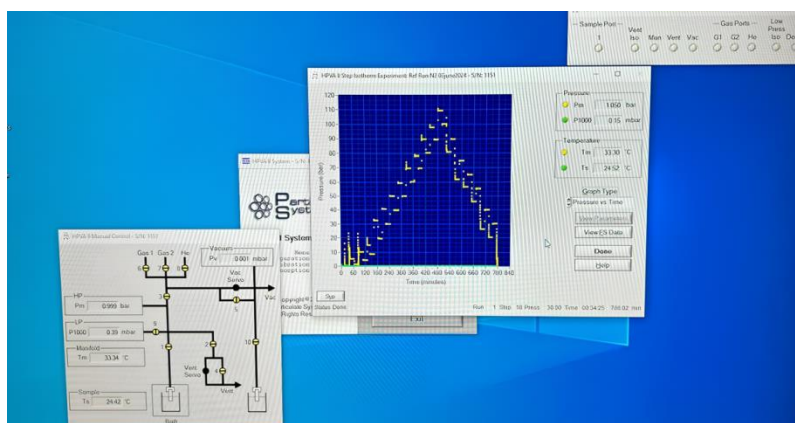
HPVA құрылғысындағы десорбция процесі үлгі камерасындағы қысымды біртіндеп төмендету арқылы жүзеге асырылады, бұл материалдың бұрын адсорбцияланған газды шығару қабілетін бағалауға мүмкіндік береді. Бұл процесс сорбцияның қайтымдылығын, сорбенттің регенерациясын және десорбция кинетикасын зерттеу үшін өте маңызды.

Қысымды төмендету арқылы изотермиялық десорбция жүйеде әр қысым кезеңінде тепе-теңдік күйді тіркеумен қатар, қысымның дәйекті төмендеуі кезінде бөлінетін газдың көлемін сандық бағалауға мүмкіндік береді (мысалы, 100 → 50 → 20 → 10 → 5 → 1 бар). Алынған мәліметтер бөлінген газ мөлшерінің қысымға тәуелділігін көрсететін десорбциялық изотерманы құру үшін қолданылады. Десорбциялық сипаттамаларды талдау сорбенттің кеуекті құрылымындағы ықтимал капиллярлық әсерлерді көрсететін гистерезис құбылыстарын бағалауды, сондай-ақ қайтымсыз адсорбция процестерін анықтауға және сорбциялық материалдың регенерация дәрежесін бағалауға мүмкіндік беретін қалдық сорбциялық сыйымдылықты анықтауды қамтиды.

#### *Эксперименттің басталуы.*

Газ желілерін дайындау: Қажет газдарды гелий (He): 3,5 Бар (шығыс қысымы 150 Бар); сутегі (H<sub>2</sub>): 120 Бар (шығыс қысымы 200 Бар) эксперимент параметрлері бойынша бапқа келтіріледі.

Эксперименттің бастау үшін «Run Experiment» батырмасын басу арқылы жүзеге асырылады. Эксперимент басталғаннан кейін талдау портында жасыл клапанды баяу ашамыз. Жүйе барлық берілген тізбектерді автоматты түрде орындайды. Эксперимент аяқталғаннан кейін экранда эксперименттік талдаудың сәтті аяқталғанын растайтын «Stating Done» хабаламалық терезесі пайда болады.



6 – сурет. Эксперимент барысын бақылауға арналған интерфейс

### Нәтижелерді өңдеу және есеп жасау.

Талдау нәтижелері эксперимент барысында компьютер экранында нақты уақыт режимінде көрсетіледі, бұл өлшеу барысын жедел бақылауға мүмкіндік береді. Әрі қарай талдау және құжаттау үшін деректерді құрылғының бағдарламалық жасақтамасында берілген Microsoft® Excel макросының көмегімен егжей-тегжейлі зерттеуге және экспорттауға болады. Бұл нәтижелерді өңдеудің ыңғайлылығын және басқа талдау құралдарымен интеграцияны қамтамасыз етеді.

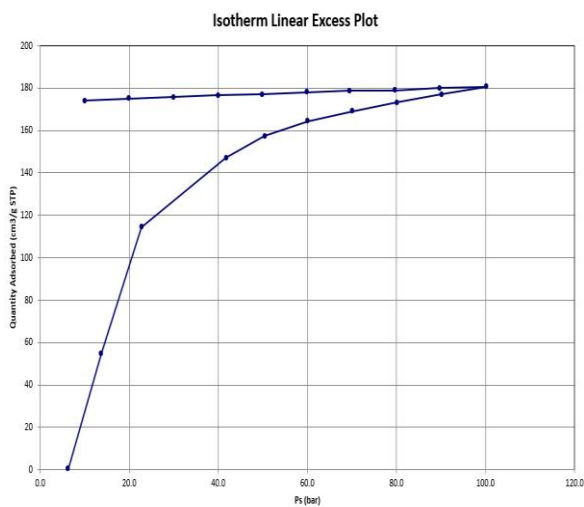
HPVA құрылғысының көмегімен алынған эксперименттік деректерді өңдеу үшін зерттелетін материалдардың сорбциялық қасиеттерін сандық сипаттауға мүмкіндік беретін классикалық адсорбция модельдері қолданылады.

Ленгмюр моделі біртекті беттегі моноқабатты адсорбцияны сипаттау үшін қолданылады, бұл белсенді орталықтардың шектеулі санын және адсорбцияланған молекулалар арасындағы өзара әрекеттесудің болмауын болжайды.

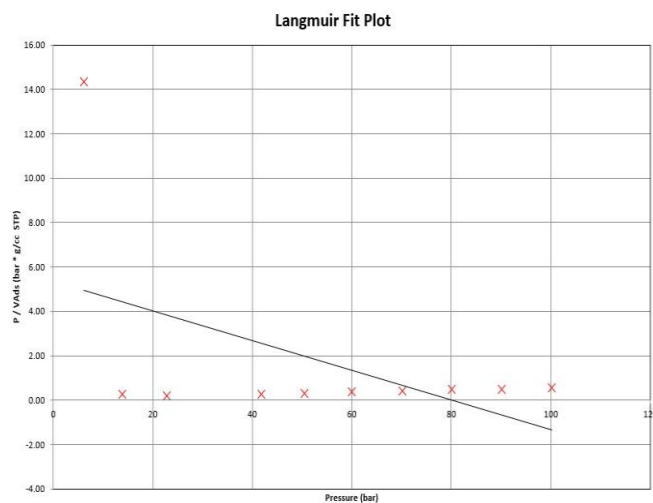
Брунауэр-Эмметт-Теллер (BET) моделі көп қабатты адсорбцияны бағалау және материалдың меншікті бетін анықтау үшін қолданылады, бұл мезопоралық құрылымдарды зерттеу кезінде өте маңыздылыққа ие.

Дубинин-Радушкевич (DR) моделі кеуекті құрылым мен сорбциялық энергияны бағалауға мүмкіндік беретін сорбция потенциалы теориясына негізделген микропоралардағы адсорбцияны талдау үшін пайдаланылды.

Талдау аяқталғаннан кейін «Done» батырмасын басу арқылы эксперимент терезесі жабылады. Жұмыс үстеліндегі HPVA Macro файлына өтіп, ашу арқылы талдау нәтижелерін алуға болады. Ашылған қолданбада қалаған есеп түрін таңдап, таңдау каталогынан изотермалар туралы есепті көруге болады (7-сурет). Пайда болған терезеде дайындық кезеңінде жазылған үлгінің салмағын енгізіп, «OK» түймесін басыңыз. Осыдан кейін негізгі есеп түрлері көрсетіледі, мысалы: *Isotherm Run 1* – изотермалар туралы мәліметтер (7-сурет (а)). *Langmuir Fit Run 1* – Ленгмюр моделіне негізделген талдау нәтижелері (7-сурет (ә)). Файл мәзірін пайдаланып есепті Excel форматында сақтау процесі орындалуы қажет. Сақталған файлды Macro қолданбай, таңдалған каталогта көруге және өңдеуге болады.



а)



ә)

7 – сурет. Эксперимент нәтижесінің графикалық көрінісі: а) изотермалар туралы мәліметтер; ә) Лангмюр моделіне негізделген талдау нәтижелері

#### 4. HPVA жүйесімен жұмысты аяқтау

Құрылғыны күту режиміне қою арқылы HPVA бағдарламасын жабамыз, компьютерді сөндіріп, жүйенің қуатын өшіру керек (соның ішінде HPVA II, сорғы, компрессор және ISO контроллері), үлгі камерасы мен ұстағышты ажыратыңыз, зерттеу үлгісін қайта өлшеп, оның массасын қайта жазу керек, содан кейін газсыздандыру және талдау порттарын қорғаныс гайкаларымен және газ клапандарын жабамыз.

Тәжірибе аяқталғаннан кейін, кептіру шкафын 110°C дейін алдын ала қыздырып, үлгі салынған цилиндрді тазалау процесін бастаймыз. Цилиндрді 5 грамм жуғыш заттан (мысалы, Alconox) 500 мл жылы суға дайындалған ерітіндімен тазалаңыз және жуғыш заттың толық ерігеніне көз жеткізу қажет. Ультрадыбыстық ваннаны цилиндрді толығымен жабу үшін жеткілікті сумен толтырыңыз және цилиндрдің ішкі бөлігін тазалау үшін ұзын тамшуыр арқылы сумен бүркіп тазалаймыз. Ультрадыбысты ваннаны қосып, цилиндрді ыстық сумен тазалап, суды цилиндр арқылы тамшуырмен өткізіп және бұл процедураны бірнеше рет қайталау керек болады (ұнтақты үлгіні қолданғанда цилиндрдің ішін толығымен тазарту мақсатында). Содан кейін цилиндрді изопропил спиртімен шайып, цилиндрдің ішін сығылған азотпен немесе ауамен құрғатып және оны алдын ала қыздырылған кептіру шкафына саламыз. Цилиндрді 110 °C температурада екі сағат қыздырып, содан кейін оны бөлме температурасына дейін суытамыз.

Құрылғыны толыққанды қауіпсіз мақсатта қолдану үшін, құрылғы сапалы желдеткіш жүйелерімен жабдықталған жақсы желдетілетін бөлмеде пайдаланулы қажет. Жабдықтың тұрақты жұмысын қамтамасыз ету және өлшеудегі ықтимал ауытқуларды азайту үшін қоршаған ортаның температурасын 24-25 °C аралығында ұстау ұсынылады.

## 5. Қорытынды

Бұл жұмыста материалдардың физика-химиялық қасиеттерін зерттеуге мүмкіндік беретін жоғары қысым жағдайында жоғары температуралық талдау жүргізу әдістемесі келтірілген. Бұл әдісті қолдану үлгілердің термиялық тұрақтылығын, реактивтілігін және құрылымдық өзгерістерін зерттеу үшін жұмыс параметрлерін дәл көбейтуді қамтамасыз етеді. Алынған деректердің сенімділігіне кепілдік беретін температура мен қысым диапазондарын қоса алғанда, эксперименттің оңтайлы жағдайларын таңдауға ерекше назар аударылады.

Әзірленген әдіс қатты электролиттер, катализаторлар және сорбенттер сияқты материалдардың әртүрлі түрлерін талдауға мүмкіндік береді. Қолданылатын жабдық өлшеудің жоғары сезімталдығын және жылдам жүретін процестерді тіркеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Әдістеме бақылау эксперименттерінің сериясымен расталған жоғары өнімділікке ие. Жоғары қысымды зерттеу материалдардың нақты жұмыс жағдайларын модельдеуге мүмкіндік береді, бұл әсіресе энергетика мен химия өнеркәсібіне қатысты.

Бұл әдіснаманы қолдану әсіресе жоғары тұрақтылықты, селективтілікті және тиімділікті қажет ететін инновациялық материалдарды әзірлеуге қатысты. HPVA сорбциялық процестер мен материалтану бойынша заманауи зерттеулердің мүмкіндіктерін кеңейтетін құрал ретінде өзінің маңыздылығын растайды.

### Авторлардың қосқан үлесі

**К.Ж. Бекмырза** – зерттеу тұжырымдамасы мен құрылымын әзірлеу, авторлар тобының жұмысын үйлестіру, мақаланың негізгі мәтінін дайындау және редакциялау.

**К.А. Кутербек** – әдістемені әзірлеуге қатысу, жабдықты калибрлеуді және деректерді талдауды қоса алғанда, HPVA әдістемесінің негізгі кезеңдерін сипаттау.

**А.М. Кабышев** – HPVA анализаторының функционалдық мүмкіндіктерін қамтитын жабдықтың техникалық сипаттамасын әзірлеу.

**М.М. Кубенова** – эксперименттік бөлімді орындау және эксперименттік деректерді өңдеу әдістемесі бөлімін әзірлеу.

**А.А. Баратова** – материалдардың сорбциялық қасиеттерін сипаттауға арналған бөлімдерді дайындау, үлгілерді дайындау рәсімін әзірлеуге қатысу.

**Н.К. Айдарбеков** – алынған деректерді талдау, қорытынды жасау, пайдаланылған көздердің тізімін дайындау, мақаланы рәсімдеу.

### Қаржыландыру

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі ұсынған BR21882359 нөмірі бар гранттың қаржылық қолдауымен орындалды.

### Әдебиеттер тізімі

1. J.K. Junga, I.G. Kim, S.K. Jeon, K-T. Kim, U.B. Baek, S.H. Nahm, *Volumetric analysis technique for analyzing the transport properties of hydrogen gas in cylindrical-shaped rubbery polymers*, Polymer Testing, - 2021. – V. 99. – Number of article 107147, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107147> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

2. A.H. Mohd Hafiz, C.E. Snape, L. Stevens, *Bed Height of Zeolite Affected CO<sub>2</sub> Hydrate Formation Using High Pressure Volumetric Analyzer*, Asian Journal of Chemistry, – 2018. - Vol. 30, No. 10. – P. 2269-2272, <https://doi.org/10.14233/ajchem.2018.21420> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

3. G.V. Olivieri, R.B.Torres, *Thermodynamic and spectroscopic study of binary mixtures containing {dimethyl carbonate (DMC) + alcohols} at T = (288.15–308.15) K and p = (0.1–40) MPa: Experimental study and modelling*, The Journal of Chemical Thermodynamics, - 2019. - Vol.133. – P. 229-260, <https://doi.org/10.1016/j.jct.2019.02.011> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

4. D.B. Hauk, R.B. Torres, J.V. Hallak Dangelo, *Measurement and correlation of high-pressure volumetric properties of binary mixtures of 1-Ethyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide ([EMIM][NTf<sub>2</sub>]) with alcohols*, The Journal of Chemical Thermodynamics, – 2023. – Vol. 185. - Number of article 107122, <https://doi.org/10.1016/j.jct.2023.107122> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

5. H. Wang, N. Zhang, X. Wang, *Densities and viscosities for binary mixtures of dimethyl carbonate with 1-heptanol, 1-octanol, 1-nonanol, and 1-decanol*, The Journal of Chemical Thermodynamics, – 2021. Vol. 157. - Number of article 106404, <https://doi.org/10.1016/j.jct.2021.106404> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

6. M. Królikowska, M. Więckowski, M. Skonieczny, *P-ρ-T measurements and derived properties of series dimethyl – and diethyl phosphate – based ionic liquids*, Fluid Phase Equilibria, – 2025. – Vol. 591. - Number of article 114313, <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2024.114313> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

**К.Ж. Бекмырза<sup>1</sup>, К.А. Кутербеков<sup>1</sup>, А.М. Кабышев<sup>1</sup>, М.М. Кубенова<sup>1</sup>, А.А. Баратова<sup>1</sup>,  
Н.К. Айдарбеков\*<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт физико-технических наук, Евразийский национальный университет  
имени Л.Н. Гумилева, Астана 010008, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [nursultanaidarbeckov@yandex.kz](mailto:nursultanaidarbeckov@yandex.kz)

### **Методика высокотемпературного анализа сорбционных свойств материалов в условиях высокого давления**

**Аннотация.** В статье приведена методика применения высокотемпературного объемного анализа высокого давления (метод НРВА) для изучения сорбционных свойств широкого спектра материалов. Метод НРВА позволяет точно измерять адсорбцию и десорбцию различных газов (водорода, углекислого газа, или углеводородных смесей) при различных режимах температуры и давления, включая нормальные и экстремальные условия, что имеет решающее значение для оценки материалов, используемых в перспективных областях, таких как хранение водорода, улавливание и обработка углекислого газа, а также катализирование химических реакций. Применение метода НРВА позволяет получать количественные данные о сорбционной емкости, а также данные в условиях, близких к фактическим данным о кинетике взаимодействия молекул газа с поверхностью и внутренними порами материалов. В статье подробно рассматриваются основные этапы методики НРВА: процесс предварительной дегазации и удаления влаги, включая подготовку и подготовку образцов к экспериментальному анализу, настройку и калибровку оборудования с учетом условий высокой температуры и давления, а также алгоритмы обработки данных, позволяющие определить основные параметры пористой структуры (объем

пор, распределение их размеров, сорбционная способность). Полученные результаты имеют практическое значение при разработке новых высокоэффективных сорбентов, катализаторов и наноструктурированных материалов для хранения энергоресурсов, еще больше расширяют возможности создания экологически чистых и экономичных технологий.

**Ключевые слова:** Высокотемпературный анализ в условиях высокого давления, сорбционные свойства, изотермы адсорбции, дегазация.

**K.Zh. Bekmyrza<sup>1</sup>, K.A. Kuterbekov<sup>1</sup>, A.M. Kabyshev<sup>1</sup>, M.M. Kubenova<sup>1</sup>, A.A. Baratova<sup>1</sup>,  
N.K. Aidarbekov\*<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Physical and Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University,  
Astana 010008, Kazakhstan*

*\*Correspondence: nursultanaidarbekov@yandex.kz*

### **Methodology for high-temperature analysis of sorption properties of materials under high-pressure conditions**

**Abstract.** This article presents a methodology for applying high-pressure high-temperature volumetric analysis (HPVA) to investigate the sorption properties of a wide range of materials. The HPVA method enables precise measurement of gas adsorption and desorption (e.g., hydrogen, carbon dioxide, or hydrocarbon mixtures) under various temperature and pressure regimes, including both standard and extreme conditions. Such measurements are critically important for evaluating materials used in advanced fields such as hydrogen storage, carbon dioxide capture and processing, and catalytic chemical reactions. The application of HPVA provides quantitative data on sorption capacity, as well as information under conditions closely approximating the actual kinetics of gas molecules interacting with the surface and internal pores of the materials. The article thoroughly examines key stages of the HPVA methodology: the preliminary degassing and moisture removal process, including the preparation of samples for experimental analysis; the setup and calibration of equipment under high-temperature and high-pressure conditions; and the data processing algorithms that make it possible to determine fundamental parameters of porous structures (pore volume, pore size distribution, sorption capacity). The results obtained have practical significance for the development of novel high-performance sorbents, catalysts, and nanostructured materials for energy resource storage, thereby further expanding opportunities for creating environmentally friendly and economically viable technologies.

**Keywords:** High-temperature analysis under high pressure, sorption properties, adsorption isotherms, degassing.

#### **References**

1. J.K. Junga, I.G. Kim, S.K. Jeon, K-T. Kim, U.B. Baek, S.H. Nahm, *Volumetric analysis technique for analyzing the transport properties of hydrogen gas in cylindrical-shaped rubbery polymers*, Polymer Testing, - 2021. – V. 99. – Number of article 107147, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107147> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
2. A.H. Mohd Hafiz, C.E. Snape, L. Stevens, *Bed Height of Zeolite Affected CO<sub>2</sub> Hydrate Formation Using High Pressure Volumetric Analyzer*, Asian Journal of Chemistry, – 2018. - Vol. 30, No. 10. – P. 2269-2272, <https://doi.org/10.14233/ajchem.2018.21420> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы



3. G.V. Olivieri, R.B. Torres, *Thermodynamic and spectroscopic study of binary mixtures containing {dimethyl carbonate (DMC) + alcohols} at  $T = (288.15-308.15) K$  and  $p = (0.1-40) MPa$ : Experimental study and modelling*, The Journal of Chemical Thermodynamics, - 2019. - Vol.133. - P. 229-260, <https://doi.org/10.1016/j.jct.2019.02.011> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

4. D.B. Hauk, R.B. Torres, J.V. Hallak Dangelo, *Measurement and correlation of high-pressure volumetric properties of binary mixtures of 1-Ethyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide ([EMIM][NTf<sub>2</sub>]) with alcohols*, The Journal of Chemical Thermodynamics, – 2023. – Vol. 185. - Number of article 107122, <https://doi.org/10.1016/j.jct.2023.107122> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

5. H. Wang, N. Zhang, X. Wang, *Densities and viscosities for binary mixtures of dimethyl carbonate with 1-heptanol, 1-octanol, 1-nonanol, and 1-decanol*, The Journal of Chemical Thermodynamics, – 2021. Vol. 157. - Number of article 106404, <https://doi.org/10.1016/j.jct.2021.106404> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

6. M. Królikowska, M. Więckowski, M. Skonieczny, *P-ρ-T measurements and derived properties of series dimethyl – and diethyl phosphate – based ionic liquids*, Fluid Phase Equilibria, – 2025. – Vol. 591. - Number of article 114313, <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2024.114313> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

#### Авторлар туралы мәлімет:

**К.Ж. Бекмырза** – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Техникалық физика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Астана, Қазақстан

**К.А. Кутербеков** – физика-математика ғылымдарының докторы, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» халықаралық кафедрасының профессоры, Астана, Қазақстан

**А.М. Кабышев** – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» халықаралық кафедрасының доценті, Астана, Қазақстан

**М.М. Кубенова** – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының оқытушы-зерттеушісі, Астана, Қазақстан

**А.А. Баратова** – PhD, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» халықаралық кафедрасының доценті, Астана, Қазақстан

**Н.К. Айдарбеков** – хат-хабар авторы, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» халықаралық кафедрасының аға оқытушысы, Астана, Қазақстан.

**К.Ж. Бекмырза** – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Технической физики» Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**К.А. Кутербеков** – доктор физико-математических наук, профессор международной кафедры «Ядерной физики, новых материалов и технологий» Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**А.М. Кабышев** – PhD, доцент международной кафедры «Ядерной физики, новых материалов и технологий» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**М.М. Кубенова** – PhD, преподаватель-исследователь кафедры стандартизации, сертификации и метрологии Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан  
**А.А. Баратова** – PhD, доцент международной кафедры «Ядерной физики, новых материалов и технологий» Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан  
**Н.К. Айдарбеков** – автор для корреспонденции, PhD, старший преподаватель международной кафедры «Ядерной физики, новых материалов и технологий» Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

**К.Ж. Бекмырза** – PhD, associate professor of the Department of «Technical Physics» of the L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

**К.А. Кутербеков** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the International Department of «Nuclear Physics, New Materials and Technologies» of the L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

**А.М. Кабышев** – PhD, associate professor of the International Department of «Nuclear Physics, New Materials and Technologies» of the L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

**М.М. Кубенова** – PhD, researcher-teacher of the Department of «Standardization, Certification and Metrology» of the L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

**А.А. Баратова** – PhD, associate professor of the International Department of «Nuclear Physics, New Materials and Technologies» of the L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

**Н.К. Айдарбеков** – corresponding author, PhD, Senior Lecturer at the International Department of «Nuclear Physics, New Materials and Technologies» of the L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).